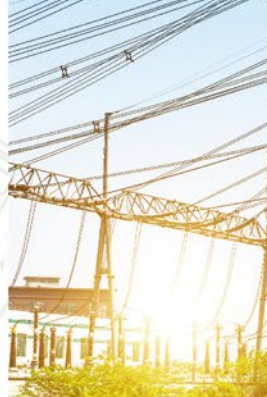


Ações de Eficiência Energética Associadas à Geração Distribuída

Estudo de Caso:
Campus Darcy Ribeiro
da Universidade de Brasília



Coordenação

Jorge Andrés Cormane Angarita

Loana Nunes Velasco

Anésio de Leles Ferreira Filho

Organizador

Sergio de Oliveira Frontin

Ações de Eficiência Energética Associadas à Geração Distribuída

Estudo de Caso:
Campus Darcy Ribeiro
da Universidade de Brasília

Coordenação

Jorge Andrés Cormane Angarita
Loana Nunes Velasco
Anésio de Leles Ferreira Filho

Organizador

Sergio de Oliveira Frontin

2ª Edição

Brasília
2020

Impressão: VTPrint Outdoor e Gráfica
Tiragem: 2.000 livros

Ações de Eficiência Energética Associadas à Geração Distribuída

Estudo de Caso:
Campus Darcy Ribeiro
da Universidade de Brasília



*PEE - Programa de
Eficiência Energética*
*P&D - Programa de Pesquisa
e Desenvolvimento*

Proponente



Cooperada



Executoras



Ações de Eficiência Energética Associadas à Geração Distribuída Estudo de Caso: Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília

Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)

SGAN Quadra 603, Módulos I e J, Asa Norte.

CEP: 70830-030. Brasília (DF).

André Pepitone da Nóbrega – Diretor-Geral

CEB Distribuição S.A.

SIA, Área de Serviços Públicos, Lote C

CEP: 71215-902. Brasília (DF).

Edison Antônio Costa Britto – Diretor Geral

CEB Participações S.A.

SIA, Área de Serviços Públicos, Lote C, Bloco N

CEP: 71215-902. Brasília (DF).

Edison Antônio Costa Britto – Diretor Geral

Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec)

Campus Universitário Darcy Ribeiro. Edifício Finatec,

Asa Norte. CEP: 70910-900. Brasília (DF).

Armando de Azevedo Caldeira Pires – Diretor-Presidente

Fundação Universidade de Brasília (UnB)

Campus Universitário Darcy Ribeiro. Prédio da Reitoria

Asa Norte. CEP 70910-900. Brasília (DF)

Márcia Abrahão Moura – Reitora

Capa, projeto gráfico e editoração

Casa 73

Revisão

Ricardo Dayan

Catálogo na Publicação (CIP)

Centro de Documentação – CEDOC / ANEEL

A185

Ações de eficiência energética associadas à geração distribuída: estudo de caso: Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília / Jorge Andrés Cormane Angarita, Loana Nunes Velasco, Anésio de Leles Ferreira Filho (coordenadores); Sergio de Oliveira Frontin (organizador). – Brasília, DF : Casa 73, 2020.

440 p. : il.

Inclui bibliografia e índice.

ISBN: 978-65-990299-3-6

1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Eficiência Energética. 3. Geração Distribuída. I. Título. II. Angarita, Jorge Andrés Cormane. III. Velasco, Loana Nunes. IV. Ferreira Filho, Anésio de Leles. V. Frontin, Sergio de Oliveira.

CDU 620.91

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do Programa de P&D da Aneel, Chamada n.º 001/2016 do Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento – Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Ensino Superior

Este livro reflete a opinião dos autores baseada nos relatórios produzidos pelas entidades executoras do projeto. As conclusões e opiniões apresentadas não necessariamente refletem o posicionamento da Aneel ou de qualquer das empresas e instituições desse projeto de pesquisa.

Os textos contidos nesta publicação podem ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que a fonte seja citada.

Todos os direitos estão reservados pelas empresas indicadas.

AUTORES DO LIVRO

Coordenação



Jorge Andrés Cormane Angarita, graduado (2003) e mestrado (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Industrial de Santander (Colômbia). Doutorado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação (2013) pela Universidade de Brasília – UnB. Atualmente, é docente vinculado ao curso de Engenharia de Energia na Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama - FGA, com atuação em atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de Sistemas de Energia Elétrica. Desenvolve pesquisas na área de Modernização da Rede Elétrica com foco na Integração de Recursos Energéticos Distribuídos à Rede Elétrica, Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica (investigação das técnicas de processamento de sinais para o monitoramento dos distúrbios que deterioram a Qualidade da Energia Elétrica) e Análise de Dados da Rede Elétrica.



Loana Nunes Velasco, possui graduação em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, pela Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT (2005), mestrado no programa de pós-graduação da Universidade Estadual Paulista - Unesp Júlio de Mesquita Filho do Campus de Ilha Solteira, na área de Qualidade de Energia (2006), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU (2013). Atualmente, é docente vinculado ao curso de Engenharia de Energia na Universidade de Brasília – UnB, Faculdade UnB Gama - FGA. Tem atuado em atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de Sistemas Elétricos de Potência, com ênfase em: qualidade da energia, eficiência energética, medição e verificação de performance, geração distribuída.



Anésio de Leles Ferreira Filho, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU (1993), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1997), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB (2008), e pós-doutorado na University of Oxford (2017). Atualmente é professor associado do quadro da Universidade de Brasília e coordenador do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes. Tem atuado em Qualidade da Energia e Redes Elétricas Inteligentes, principalmente nos seguintes temas: desequilíbrio de tensão, harmônicas e inter-harmônicas, e impactos da integração na rede elétrica das gerações fotovoltaica e eólica e, ainda, de veículos elétricos e armazenamento de energia.

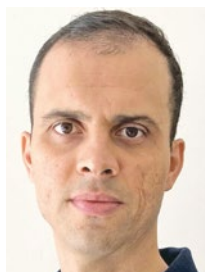
Organizador



Sergio de Oliveira Frontin, engenheiro eletricitista formado pela Escola Nacional de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (1969) e mestre em Sistemas de Potência pelo *Rensselaer Polytechnic Institute* em Troy (New York, Estados Unidos, 1971). Trabalhou em Furnas Centrais Elétricas S.A (1967-1987 e 1992-1997), Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel (1988), Itaipu Binacional (1989-1991) e Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (1998-2008). É ex-professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio (1972-1977), do

Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro (1978) e da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ (1980 a 1986). Atualmente, é pesquisador/colaborador da Universidade de Brasília – UnB e consultor nas áreas de energia, regulação, geração, transmissão, tecnologia da informação e gestão de conhecimento.

Universidade de Brasília

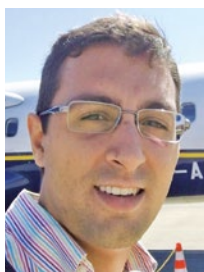


Alex Reis, possui graduação em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU (2010) e doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma instituição (2015). É docente vinculado ao curso de Engenharia de Energia na Universidade de Brasília – UnB, Faculdade UnB Gama – FGA. Tem atuado em atividades de ensino, pesquisa e extensão na área de Sistemas Elétricos de Potência, com ênfase em: qualidade da energia, harmônicos, eficiência energética, integração de sistemas eólicos e fotovoltaicos à rede elétrica.



Cláudia Naves David Amorim, graduada e mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília – UnB, doutora em Tecnologias Energéticas e Ambientais pela *Università degli Studi di Roma*, com tese desenvolvida no *Politecnico di Milano* (Italia) e *Bavarian Centre for Applied Energy Research -ZAE Bayern - Wuerzburg* (Alemanha). Professora Associada da Universidade de Brasília, atual coordenadora do Laboratório de Controle Ambiental – Lacam. Coordenadora da Divisão 3 “Ambientes Internos e Projetos Luminotécnicos” da CIE-Brasil (*Comission Internationale del'Eclairage*)

e pesquisadora junto à *International Energy Agency* - IEA, integrante da Task 61 “Integrated Solutions for Daylighting and Electric Lighting: from component to user centered system efficiency”. Consultora *adHoc* do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, parecerista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, integrante da Secretaria Técnica do Procel/Edifica e do Grupo Técnico de Edificações do Ministério de Minas e Energia – MME.



Fernando Cardoso Melo, graduado em Engenharia Elétrica (2012), recebeu os títulos de mestre (2014) no projeto e análise de desempenho de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (primeiro microgerador da CEMIG-D após a REN-482) e de doutor (2017) no desenvolvimento de nova topologia de microinversor solar de estágio único pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Na mesma instituição, realizou o pós-doutorado (2017-2019) no desenvolvimento de inversor solar para usina de pequeno porte (até 2 kW). Atualmente, é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília – UnB.



Francisco Assis Lima, possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB e graduação em Licenciatura em Ciências e Habilitação em Matemática pelo Centro de Ensino Unificado de Brasília - UniCEUB (1987). Tem experiência em gestão de manutenção de equipamentos, gestão universitária, gestão por processos e por projetos, manutenção elétrica e eletrônica, instrumentação, telecomunicações e pesquisas na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: energia fotovoltaica, eficiência energética, plataformas meteorológicas, energia renovável, sensores e manutenção de sistemas. Atuou como diretor de manutenção de Equipamentos Científicos e realizou diversos trabalhos na área de manutenção de equipamentos científicos e pesquisas.



Lélío Ribeiro Soares Júnior, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB (1992) e mestrado em Engenharia Elétrica pela mesma instituição (1994). Atualmente é professor assistente da Universidade de Brasília. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle de Processos Eletrônicos, Retroalimentação, atuando principalmente nos seguintes temas: robótica e visão computacional. Tem trabalhado nos últimos anos na área de controle de conversores eletrônicos de potência para aplicações envolvendo fontes alternativas de energia.



Rafael Amaral Shayani, graduado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Energia e Automação, pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP (1998). Obteve o grau de mestre (2006) e de doutor (2010), ambos pela Universidade de Brasília – UnB, onde pesquisou sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede elétrica. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, onde pesquisa a integração da energia solar fotovoltaica, tanto na rede elétrica de distribuição (aspectos técnicos) quanto na matriz energética (aspectos de política energética). É membro da Comunidade Bahá'í do Brasil, cuja visão de unidade mundial lhe possibilita analisar o setor energético de forma global, em busca de soluções sustentáveis para o planeta como um todo.



Renato Coral Sampaio, professor de Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília - UnB e um dos coordenadores do Laboratório Avançado de Produção, Pesquisa e Inovação em *Software* – LAPPIS da Faculdade UnB Gama – FGA. Graduado em Engenharia Mecatrônica pela Universidade de Brasília (2004), mestrado em Ciência da Computação (2013) e doutor em Sistemas Mecatrônicos pela Universidade de Brasília (2018). Possui experiência na área de Sistemas Embarcados em Tempo Real, Sistemas em Arquiteturas Reconfiguráveis – FPGA, *Design* de Sistemas em *Chip* (SoCs), Robótica industrial, Controle Preditivo e Algoritmos de otimização Bio-inspirados.

Organizações Parceiras



Alexandre Schinazi, engenheiro ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Master 1 pela École Centrale Marseille e pós-graduado em Gestão Europeia de Energia – EUREM pela Câmara de Comércio Brasil-Alemanha em São Paulo. Membro do Comitê Técnico de Eficiência Energética em Edificações do INMETRO, credenciado LEED (LEED AP BD + C e LEED AP O + M), certificado CMVP (Certified Measurement & Verification Professional), Consultor DGNB (certificação ambiental de edificações alemã). Na Mitsidi, atua como diretor técnico, responsável

pela atuação e liderança da equipe técnica no desenvolvimento dos projetos, especialista em Eficiência Energética e Construção Sustentável.



Bruno Marcos Chaves da Silva, graduado em Engenharia de Energia pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-Minas, possui formação técnica em Química Industrial pela Fundação de Ensino de Contagem – Funec e Elétrica Industrial pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI-MG. É analista em eficiência energética e energias renováveis na Mitsidi Projetos, onde foi responsável por mais de 100 diagnósticos energéticos em diferentes tipos de edificações, trabalhando com mapeamento energético, submissão de projetos ao programa de eficiência

energética - PEE e realização de medição e verificação de performance de acordo com o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Desempenho – IPMVP.



Felipe Tadeu Silva Viana Stemler possui graduação em Engenharia Elétrica (2011), pela Universidade de Brasília (UnB). É sócio-Diretor da Smartly Engenharia Sustentável, sendo responsável pela integração de novas tecnologias, elaboração e supervisão de projetos fotovoltaicos. Tem experiência na elaboração, desenvolvimento e orientação de projetos de engenharia elétrica, sendo responsável pela realização de especificações técnicas, desenhos, métodos, recursos e outros requisitos.



Hamilton Yair Ortiz Cuchivague, mestre em Engenharia Mecânica pela FEM-Unicamp e graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Nacional da Colômbia. Completou um ciclo de treinamento em Sistemas Integrals de Gerenciamento de Energia – SGIE, com certificação como auditor interno NTC ISO 50001 pela Rede Colombiana de Conhecimento em Eficiência Energética – RECIEE e certificado Certified Measurement & Verification Professional – CMVP. Trabalhou em projetos de instalações de superfície e implantação do EnMS na Petrobras Colômbia. Atualmente atua na Mitsidi Projetos como coordenador em Indústria, especialista em Eficiência Energética Industrial e Sistemas Térmicos.



Hudson de Paula Romualdo, graduado em Tecnologia de Processamento de Dados (2003) pela Sociedade Objetivo de Ensino Superior, especialista em Desenvolvimento de *Software* para a Internet (2006) pela Uni-Anhanguera e mestre em Engenharia Elétrica e de Computação (2014) pela Universidade Federal de Goiás – UFG. Trabalhou na LG Informática (2003-2006), Politec TI (2006-2012), foi sócio-proprietário da Pontta Tecnologia (2014-2016). Atualmente é professor EBTT no Instituto Federal Goiano (IF Goiano – Campus Trindade). Tem atuado em desenvolvimento de *software web responsive, standalone e mobile* e, ainda, com pesquisas relacionadas à integração da energia solar fotovoltaica na rede elétrica de distribuição.



Mateus de Sordi, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB e MBA pela Fundação Getúlio Vargas – FGV. Sócio da Smartly Energia Sustentável e MBA em Gestão Empresarial pela FGV. Especialista em Energias Renováveis, e mais especificamente Energia Fotovoltaica. Experiência de milhares de simulações computacionais e estudos de viabilidade de sistemas fotovoltaicos e responsável pela implantação de mais de 180 usinas fotovoltaicas.



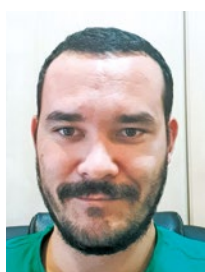
Priscilla Araújo Juá Stecanella, graduada em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Paulista – Unip (2006), especialista em Gerenciamento de Projetos pela Faculdade Alves Faria – Unialfa (2011), mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás – IFG Goiânia (2016) e aluna de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília – UnB, onde pesquisa sobre a integração da energia solar fotovoltaica na rede elétrica de distribuição. Trabalhou na Halex Istar Indústria Farmacêutica (1999-2011), Universidade Paulista (2010-2015) e Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC Goiás (2012-2015). Atualmente é professora no Instituto Federal Goiano (IF Goiano - Campus Trindade), onde atua na área de automação industrial.



Pedro Paulo Fernandes da Silva, engenheiro ambiental graduado pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI com um ano de período sanduíche na Université de Technologie de Compiègne – UTC, França. Fez mestrado em Energia pela Universidade de São Paulo – USP, onde se especializou em calibração de modelos de simulação do termoenergética.



Rodrigo Maia Pereira, bacharel em Desenho Industrial pela Universidade de Brasília – UnB e pós-graduado em Tecnologias Digitais na Prática da Arte e do *Design* pela Universidade Concordia, Montreal/Canada. Estrategista de produtos e *designer* de experiência (UX) atuando há mais de 20 anos na criação de produtos digitais. Atua como pesquisador sênior no Laboratório Avançado de Produção, Pesquisa e Inovação em *Software* – LAPPIS da Faculdade UnB Gama – FGA, além de prestar consultorias no mercado privado.

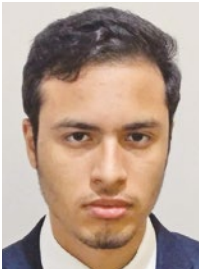


Yuri Tadeu Silva Viana Stemler possui graduação em Engenharia Civil (2011), pela Universidade de Brasília (UnB). Atualmente, atua Smartly Engenharia Sustentável, sendo responsável pela elaboração de projetos, acompanhamento de obras e vistoria das estruturas de suporte dos sistemas fotovoltaico. Tem experiência na elaboração, acompanhamento, desenvolvimento e orientação de projetos de engenharia civil.

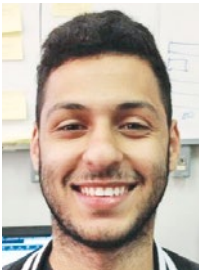
Alunos da Universidade de Brasília



Álax de Carvalho Alves, graduando em Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília – UnB. Experiência nas linguagens Python, Ruby, JavaScript, HTML e CSS e nos frameworks Ruby on Rails, Django, VueJS, QuasarJS. Trabalha com tecnologias de Interação e Deploy Contínuos com Docker, TravisCI, CircleCI, GitlabCI, Heroku e Dokku e bancos de dados Postgres, Redis, MySQL, SQLite. Experiência com gerência de projetos com Scrum, XP e Lean e contribuição com projetos em *Software* Livre.



André de Sousa Costa Filho, graduando em Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília – UnB. Trabalha com desenvolvimento web desde 2017 usando principalmente as tecnologias Ruby on Rails, Vue.js, Django e Node.js. Participou como integrante da equipe de projetos na área de gestão escolar, portal de notícias, análise de dados e monitoramento energético.



Arthur José Benedito de Oliveira Assis, graduando em Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília – UnB. Trabalha com desenvolvimento de *software* desde 2017, trabalhando com a criação de plataformas web, com foco na criação de APIs com tecnologias como Django Rest, Ruby on Rails.



Ayana Dantas de Medeiros, arquiteta e urbanista formada pela Universidade de Fortaleza – Unifor (2015), com Mobilidade Internacional no Departamento de Arquitetura da Universidade de Coimbra - Portugal (2011-2011). Professora substituta no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Roraima – UFRR (2016-2018), especialista em Projetos de Iluminação pelo Instituto de Pós-graduação do Amazonas (2018) e mestre na linha de pesquisa em Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade no Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília - UnB (2020), onde atualmente encontra-se doutoranda. Pesquisadora no Laboratório de Controle Ambiental e Eficiência Energética da Universidade de Brasília, com ênfase em ventilação e iluminação natural.



Ezequiel de Oliveira dos Reis, graduando pela Universidade de Brasília - UnB em Engenharia de *Software*. Trabalha com desenvolvimento de *software* desde 2018, projetos em plataformas mobile e web, utilizando tecnologias como React js, React Native, Django, Vue.js e Ruby on Rails.



Gabriela Barrozo Guedes, graduando pela Universidade de Brasília – UnB em Engenharia de *Software*. Desenvolvedora Full Stack desde 2018, trabalhou em projetos para desenvolvimento web, mobile e para chatbots, utilizando principalmente as tecnologias Vue.js, React JS, Django e Rasa.



Guilherme Augusto Nunes Silva, graduando em Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília – UnB. Trabalha com desenvolvimento de *software* desde 2017 na criação de chatbots com a tecnologia Rasa e serviços RESTful com Django e Flask. Possui experiência em desenvolvimento web com Vue.js e em aplicações integradas com o ambiente Jupyter Notebook.



Gustavo Henrique de Souza Leão, engenheiro eletricitista formado pela Universidade de Brasília – UnB (2019). Estágio no Grupo de Análise da Distribuição da Superintendência de Fiscalização dos Serviços em Eletricidade - SFE da Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (2018-2019). Atualmente concluindo período de estágio na Gerência de Manutenção Brasília na Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A – TAESA.



Jessé Barreto de Barros, doutorando em Sistemas Mecatrônicos (PPMEC/UnB) pela Universidade de Brasília – UnB. Mestre em Sistemas Mecatrônicos (PPMEC/UnB) pela Universidade de Brasília. Bacharel em Engenharia de Controle e Automação pela mesma instituição. Faz parte do Laboratory of Embedded Systems and Integrated Circuits Applications (LEIA) e do Grupo de Automação e Controle da Universidade de Brasília (GRACO/UnB). Foi intercambista pelo programa Ciência Sem Fronteiras na University of New South Wales (UNSW) – Austrália no período 2014/2015. Possui interesse e experiência nas áreas de Robótica, Processamento de Imagens, Sistemas Reconfiguráveis, Sistemas Embarcados, Programação de Microcontroladores, Eletrônica Digital, Desenvolvimento de *Software* nas linguagens C/C++ e Python, Algoritmos Meta-Heurísticos e Algoritmos de *Machine Learning*.



João Pedro Alemonge Honorato, bacharel em Engenharia de Energia pela Universidade de Brasília – UnB. No decorrer da graduação e da experiência profissional, aproximou-se da área de eficiência energética e geração distribuída se especializando neste ramo. Atualmente atua na área e participa como aluno especial do mestrado de Arquitetura onde busca aprender e pesquisar mais a forma como racionalizar o consumo de energia no ambiente construído.



Juliano Vieira Gregório, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília - UnB (2017) com graduação sanduíche pela *University of Queensland* (2015-2016), na Austrália, onde estudou a integração de energias renováveis em redes de distribuição. Atualmente, é pós-graduando em Engenharia de Segurança do Trabalho e atua como supervisor técnico de manutenção e operação dos sistemas elétricos nas edificações do Complexo Arquitetônico do Senado Federal, incluindo os serviços de projeto e execução de ações de Segurança do Trabalho relacionadas aos serviços de manutenção elétrica, fornecimento de materiais e gerenciamento de insumos necessários à execução dos serviços.



Lucas de Araújo Martins, graduando em Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília – UnB, trabalha desde 2016 no desenvolvimento de aplicações web, participando de projetos nas áreas da educação, monitoramento energético, otimização de processo, portal de notícias e uso sustentável de recursos hídricos. Fez parte, de 2016 a 2019, da equipe do Laboratório Avançado de Pesquisa, Produção e Inovação em *Software* – LAPPIS, onde auxiliou na manutenção do Portal da Faculdade UnB Gama – FGA, e integrou o time de desenvolvimento do Sistema Integrado de Gerenciamento Energético – SIGE.



Marcos Diego de Castro e Silva, teve sua formação acadêmica alicerçada pela Universidade de Brasília – UnB, instituição na qual foi professor substituto no período de 2015 a 2016 e realizou a sua graduação (2010), mestrado (2014) e doutorado (2020) em Engenharia Elétrica. Tem experiência em sistemas elétricos de potência, com ênfase em qualidade da energia elétrica e simulações em tempo real para redes elétricas inteligentes.



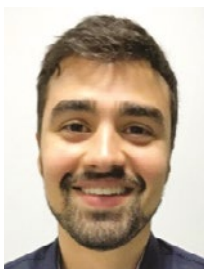
Pedro Augusto Montel de Carvalho, estudante de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília – UnB (agosto de 2015 – atualmente), aluno de intercâmbio em Temple University (Janeiro de 2020 – atualmente). Realizou estágio na Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel na Superintendência de Regulação de Distribuição (2019). Estagiou também na Companhia Energética de Brasília – CEB na Gerência de Mercado e Comercialização de Energia (2018).



Ruan Pedro Araújo Tenório, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília – UnB (2019) e técnico em segurança do trabalho graduado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Distrito Federal – Senai-DF (2019). Iniciou suas pesquisas no grupo de trabalho EREKO trabalhando com os perfis de alimentação para um robô modular apodal (2017). Migrou seus focos de pesquisa para a qualidade de energia e energias renováveis, área em que desenvolveu seu trabalho de conclusão de curso (metodologia para o desenvolvimento de simulações do tipo *Software-in-the-Loop* aplicadas a sistemas elétricos de potência, UnB, 2019). Atualmente atuando no meio privado com o foco para o gerenciamento de obras e projetos.



Thalisson Barreto de Melo Silva, graduando em Engenharia de *Software* pela Universidade de Brasília - UnB. Trabalha com desenvolvimento desde 2016 no Laboratório Avançado de Pesquisa, Produção e Inovação em *Software* – LAPPIS nos projetos do Noosfero (Ruby on Rails) e no Sistema Integrado de Gerenciamento Energético – SIGE. Desenvolveu projetos como Owla (plataforma de comunicação em tempo real entre professores e alunos), o Falko (ferramenta para gestão de projetos ágeis a partir de métricas) e o Klara (um dessalinizador que coleta informações e gera gráficos da qualidade da água no Brasil).



Victor do Prado Brasil, graduado em Engenharia (2017) e mestrado (2019) pela Universidade de Brasília – UnB. Atualmente, é doutorando na UnB e *trainee* no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Dentre os temas de interesse, destacam-se pesquisas relacionadas a redes elétricas inteligentes, geração distribuída e fenômenos da qualidade da energia elétrica

SUMÁRIO

HOMENAGEM	25
PREFÁCIOS	27
RESUMO EXECUTIVO	31

CAPÍTULO 1

Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Chamada n.º 001/2016 da Aneel

OBJETIVO	40
1. INTRODUÇÃO	40
2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO PROJETO	41
3. AÇÕES DO PROJETO	42
4. RESULTADOS ESPERADOS DO PROJETO	43
5. PROPOSTAS APRESENTADAS	44
6. PROPOSTA DE PROJETO ESTRATÉGICO DE P&D – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA INTEGRADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA CEB-DIS	44
6.1 Objetivos	44
6.2 Motivação	45
6.3 Originalidade	45
6.3.1 Uso de dados reais da rede elétrica por meio do <i>software</i> OPENDSS	46
6.3.2 Especificação e implantação de uma infraestrutura laboratorial que emule uma rede de distribuição de baixa tensão (microrrede)	48
6.3.3 Formação do Centro de Monitoramento Energético	49
6.4 Aplicabilidade	50
6.5 Relevância	52
6.6 Razoabilidade dos Custos – Viabilidade Econômica	53
6.7 Etapas dos Trabalhos	53
7. PROPOSTA DE PROJETO PRIORITÁRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PRÉDIOS PÚBLICOS DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	55
7.1 Objetivos	55
7.2 Abrangência da Proposta	56
7.3 Etapas dos Trabalhos	57
8. CRONOLOGIA DOS EVENTOS DA CHAMADA	58
9. REFERÊNCIAS	59

CAPÍTULO 2

Experiências na Execução de Ações de Eficiência Energética na Universidade de Brasília (UnB)

OBJETIVO	62
1. INTRODUÇÃO.....	62
2. SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO	64
2.1 Luz	64
2.2 Grandezas Luminotécnicas.....	65
2.3 O Comportamento Luminoso	66
2.4 Fontes de Luz	67
2.5 Conforto Luminoso.....	70
2.6 Normas Técnicas	72
3. CONDICIONAMENTO DE AR	75
3.1 Funcionamento de Aparelhos de Ar-condicionado.....	77
3.2 Tipos de Equipamentos de Ar-condicionado.....	79
3.3 Carga Térmica.....	81
3.4 Conforto Térmico	83
4. ESTUDO DE CASO.....	84
4.1 Apresentação	84
4.2 Metodologia.....	87
4.2.1 Levantamento de dados	87
4.2.2 Simulação computacional	87
4.2.3 Análise dos dados	89
4.3. Resultados	91
4.3.1 Substituição de equipamentos de iluminação artificial	91
4.3.2 Substituição de equipamentos de ar-condicionado e consumo de energia elétrica	95
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
6. REFERÊNCIAS	99

CAPÍTULO 3

Aspectos da Implantação de Sistema de Geração Solar Fotovoltaico na Universidade de Brasília

OBJETIVO.....	104
1. INTRODUÇÃO.....	104
2. DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	104
2.1 Levantamento de Necessidades e Planejamento do Sistema Fotovoltaico.....	105
2.2 Elaboração do Projeto Executivo de Sistema Fotovoltaico.....	106
2.3 Aquisição, Montagem e Comissionamento de Instalações Fotovoltaicas	107
2.4 Operação e Manutenção das Instalações Fotovoltaicas	109
2.5 <i>Retrofitting</i> de Instalações Fotovoltaicas	109
2.6 Desmonte e Descarte de Equipamentos.....	110
3. ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	110
3.1 Local da Instalação.....	110
3.2 Serviços Prestados – Requisitos Técnicos Mínimos.....	112
3.3 Estrutura Metálica – Requisitos Técnicos Mínimos.....	112
3.4 Módulos Fotovoltaicos – Requisitos Técnicos Mínimos	113
3.5 Inversores Solares – Requisitos Técnicos Mínimos.....	114
3.6 Conector Solar – Requisitos Técnicos Mínimos	115
3.7 Cabo Elétrico, Padrão Solar – Requisitos Técnicos Mínimos	116
3.8 Eletrodutos e Eletrocalhas – Requisitos Técnicos Mínimos	117
3.9 Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) – Requisitos Técnicos Mínimos	118
3.10 Aterramento das Instalações	119
3.11 Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)	120
3.12 Manutenção.....	120
3.13 Peças de Reposição.....	120
3.14 Garantia.....	120
3.14.1 Garantia da instalação.....	120
3.14.2 Garantia de desempenho.....	121
4. PROJETO EXECUTIVO E IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	122
4.1 Estrutura Metálica de Fixação e Suporte	122
4.2 Módulos Fotovoltaicos	125
4.3 Inversores Solar.....	127
4.4 Cabo Elétrico, Padrão Solar	128
4.5 Conector Solar	129
4.6 Eletrodutos.....	129
4.7 Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT)	129
4.8 SPDA e Aterramento das Instalações	130
4.9 Comissionamento do Sistema Fotovoltaico	132
5. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	
DA FACULDADE DE TECNOLOGIA.....	133
5.1 Expectativa de Produção de Energia.....	133
5.2 Avaliação do Sistema – Dados de Medição do Inversor	134
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	136
7. REFERÊNCIAS.....	136

CAPÍTULO 4

Experiências na Execução de Medição e Verificação de Performance de Ações de Eficiência Energética

OBJETIVO	138
1. INTRODUÇÃO	138
2. CONCEITOS BÁSICOS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO	140
2.1 Fronteira de Medição	140
2.2 Período da Linha de Base	141
2.3 Período de Determinação da Economia	142
2.4 Bases para Ajustes	142
2.5 Variáveis Independentes e Fatores Estáticos	143
2.6 Efeitos Interativos	143
2.7 Incerteza	144
2.8 Amostragem	144
3. OPÇÕES DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DO PIMVP	146
3.1 Opção de Medição e Verificação A	146
3.2 Opção de Medição e Verificação B	147
3.3 Opção de Medição e Verificação C	148
3.4 Opção de Medição e Verificação D	149
3.5 Escolha da Opção de Medição e Verificação	149
4. PLANO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO	151
5. ASPECTOS PRÁTICOS DA M&V	152
5.1 Opção A – Aspectos Práticos	152
5.1.1 Estudo de caso 1	153
5.1.2 Estudo de caso 2	155
5.2 Opção B – Aspectos Práticos	158
5.2.1 Estudo de caso 1	159
5.2.2 Estudo de caso 2	161
5.3 Opção C – Aspectos Práticos	167
5.3.1 Estudo de caso 1	168
5.4 Opção D – Aspectos Práticos	171
5.4.1 Simulação termoeenergética	172
5.4.2 Simulação luminotécnica	173
5.5 Correlação Entre o Consumo e Temperatura para M&V de Sistemas de Climatização	174
5.5.1 Caso 1 – Central de Água Gelada (CAG) na região sul do Brasil	175
5.5.2 Caso 2 – Central de Água Gelada (CAG) na região sudeste do Brasil	177
5.5.3 Considerações adicionais	180
6. RELATÓRIOS DE M&V	180
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	182
8. REFERÊNCIAS	183

CAPÍTULO 5

Aspectos da Implantação de Sistema de Gestão Energética (SIGE) da Universidade de Brasília (UnB)

OBJETIVO	186
1. INTRODUÇÃO	186
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	188
2.1 Objetivos da Gestão de Energia	189
2.2 Métodos de Implementação	190
2.3 Contexto da Organização	190
2.4 Planejar	191
2.5 Agir	191
2.6 Checar	192
2.7 Avaliar	192
2.8 Ciclo PDCA	193
2.9 Indicadores	194
2.10 Benefícios	195
2.11 Medidores e Controladores de Consumo	195
2.12 Variáveis de Interesse	196
2.13 Medidores de Energia	196
2.14 Controladores de Consumo	197
2.15 Softwares de Gestão de Energia	197
3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE GESTÃO ENERGÉTICA	198
3.1 Metodologia de Desenvolvimento	198
3.2 Licenciamento e Uso do Sistema (<i>Software</i> Livre)	199
3.3 Levantamento de Requisitos	200
3.4 Arquitetura do Sistema	201
3.5 Integração entre Subsistemas, Tecnologias e Protocolos de Comunicação	202
3.6 Subsistema de Medição	203
3.7 Servidor de Coleta de Dados	206
3.8 Servidor Central	209
3.9 Camada de Visualização (<i>front-end</i>)	213
3.9.1 Interface gráfica <i>web</i>	213
3.9.2 Interface gráfica <i>mobile</i>	221
3.10 Tecnologias Utilizadas no Desenvolvimento do Centro de Monitoramento	223
4. INDICADORES DE DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES	224
5. MÓDULO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE CARGA	226
5.1 Fundamentação Teórica	226
5.1.1 Clusterização	227
5.1.2 k-médias	228
5.1.3 Clusterização hierárquica espacial	228
5.1.4 Mapas auto-organizáveis de Kohonen	229
5.1.5 Maximização de expectativas	229
5.1.6 Aplicabilidade dos algoritmos de clusterização	229
5.1.7 <i>Support Vector Machine</i>	230
5.1.8 Treinamento das SVMs baseado em PSO	234
5.2 Estudo de Caso – Metodologia e Resultados	236
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	240
7. REFERÊNCIAS	241

CAPÍTULO 6

Estado da Arte em Geração Distribuída

OBJETIVO	244
1. INTRODUÇÃO.....	244
2. DEFINIÇÕES	244
2.1 Microgeração Distribuída	244
2.2 Minigeração Distribuída.....	245
2.3 Redes Elétricas Inteligentes	245
2.4 Microrredes.....	245
3. FONTES DE INFORMAÇÕES	245
4. RESULTADOS DA PESQUISA	247
4.1 Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)	247
4.2 Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)	247
4.3 Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)	248
4.4 Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)	248
4.5 Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL, UFRJ)	248
4.6 Universidade de Brasília (UnB).....	249
4.7 Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)	249
4.8 Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Aneel.....	250
4.9 <i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques</i> (CIGRÉ)	250
5. COMENTÁRIOS SOBRE AS PESQUISAS REALIZADAS.....	251
6. RESUMO DOS TRABALHOS CLASSIFICADOS POR TEMAS	254
6.1 Planejamento da Geração Distribuída.....	254
6.2 Marcos Regulatórios Voltados para a Geração Distribuída	259
6.3 Metodologias Aplicadas ao Estudo da Geração Distribuída.....	260
6.4 Modelagem de Componentes, Ferramentas Computacionais e Laboratórios	264
6.5 Impactos Decorrentes da Penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição	266
6.6 Estudos de Casos com Aplicação de Geração Distribuída	270
6.7 Redes Inteligentes no Contexto da Geração Distribuída	273
6.8 Proteção e Controle Aplicados à Geração Distribuída.....	275
6.9 Microrredes no Contexto da Geração Distribuída	280
6.10 Armazenamento de Energia na Geração Distribuída	281
6.11 Fontes de Energia na Geração Distribuída.....	282
6.12 Tarifas	284
6.13 Novos Negócios	286
6.14 Resumo	287
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	288
7.1 Planejamento da Geração Distribuída.....	288
7.2 Marcos Regulatórios Voltados para a Geração Distribuída	288
7.3 Metodologias Aplicadas ao Estudo da Geração Distribuída.....	289
7.4 Modelagem de Componentes, Ferramentas Computacionais e Laboratórios	289
7.5 Impactos Decorrentes da Penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição	290
7.6 Estudos de Casos com Aplicação de Geração Distribuída	290
7.7 Redes Inteligentes no Contexto da Geração Distribuída	291
7.8 Proteção e Controle Aplicados à Geração Distribuída.....	291
7.9 Microrredes no Contexto da Geração Distribuída	292
7.10 Armazenamento de Energia na Geração Distribuída	292
7.11 Fontes de Energia na Geração Distribuída.....	293
7.12 Tarifas	293
7.13 Novos Negócios	294
8. REFERÊNCIAS	294

CAPÍTULO 7

Novos Paradigmas para o Planejamento Energético.

A Importância das Fontes Renováveis e da Eficiência Energética

OBJETIVO	304
1. INTRODUÇÃO	304
2. PERSPECTIVA HISTÓRICA DO CRESCIMENTO DO SISTEMA ENERGÉTICO MUNDIAL	305
2.1 Perfil de Crescimento das Últimas Décadas	305
2.2 Características do Modelo Atual de Crescimento do Setor Energético	306
3. NOVAS DIRETRIZES INTERNACIONAIS PARA MUDAR O RUMO DE CRESCIMENTO DO SETOR ENERGÉTICO	307
3.1 Necessidade de Visão Integrada	307
3.2 Foco no Ser Humano e Abordagem Não Mercadológica	308
3.3 Avanços Tecnológicos que Possibilitam a Mudança no Sistema Elétrico	310
3.4 A Importância do Consumo e Produção Responsáveis	311
4. NOVO PARADIGMA DE CRESCIMENTO DO SETOR ENERGÉTICO	312
4.1 Desenvolvimento de Novas Capacidades nos Estudantes de Engenharia	313
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	315
6. REFERÊNCIAS	315

CAPÍTULO 8

Desenvolvimento de Cenários para o Planejamento da Inserção da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição. Estudo de Caso Distrito Federal

OBJETIVO	318
1. INTRODUÇÃO	318
2. INDICADORES DO DISTRITO FEDERAL	320
2.1 Indicadores Econômicos	320
2.2 Regiões Administrativas e População do DF	322
2.3 Apartamentos, Casas, Escolas, Hospitais e Postos de Saúde do DF	324
2.4 Edifícios da Polícia Militar e dos Bombeiros do DF	329
2.5 Estações do Metrô de Brasília	331
2.6 Edifícios do Governo Federal em Brasília	332
3. CAMPUS UNIVERSITÁRIO DARCY RIBEIRO	332
4. O SISTEMA ELÉTRICO DA COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA	335
4.1 Dados Gerais	335
4.2 Dados de Consumo de Energia Elétrica	335
4.3 Análise do DEC e FEC da Rede de Distribuição da CEB-DIS	336
4.4 Análise das Perdas na Rede de Distribuição da CEB-DIS	336
4.5 Dados de Geração Distribuída no DF	336
5. POTENCIAL SOLAR DE BRASÍLIA	337
6. METODOLOGIA PARA ESTABELECIMENTO DE CENÁRIOS	338
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	339
8. REFERÊNCIAS	340

CAPÍTULO 9

Simulações em Tempo Real Envolvendo Geração Distribuída

OBJETIVO	342
1. INTRODUÇÃO.....	342
2. ESTADO DA ARTE	344
2.1 Aplicações de Simulação em Tempo Real Vinculadas a Sistemas Elétricos de Potência.....	344
2.2 Instituições com Infraestrutura Laboratorial Orientada a Microrredes e Simulação em Tempo Real	345
3. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E MICRORREDES.....	347
3.1 Conceitos e Definições	347
3.2 Metodologia para o Desenvolvimento de Simulações	350
3.3 Infraestrutura do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes.....	352
3.4 Arquitetura do Ambiente de Simulação	357
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	366
5. REFERÊNCIAS	366

CAPÍTULO 10

Métodos de Redução de Circuitos para Simulação de Redes de Distribuição

OBJETIVO	370
1. INTRODUÇÃO.....	370
2. ESTADO DA ARTE	370
2.1 Aplicações de Simulação de Métodos de Redução de Circuitos Vinculadas aos Sistemas de Transmissão	371
2.2 Aplicações de Simulação de Métodos de Redução de Circuitos Vinculadas aos Sistemas de Distribuição	371
3. MÉTODO DE REDUÇÃO DE CIRCUITOS PARA SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL.....	373
3.1 Método de Redução Simplificado	374
3.1.1 Eliminação de uma Barra Não Crítica Final (BNCF)	375
3.1.2 Eliminação de uma Barra Não Crítica Intermediária (BNCI).....	376
3.2 Método de Redução Polifásico	377
3.2.1 Identificação da topologia.....	377
3.2.2 Eliminação fora do ramo principal.....	378
3.2.3 Eliminação dentro do ramo principal.....	380
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	382
5. REFERÊNCIAS	383

CAPÍTULO 11

Quantificação dos Impactos Técnicos da Inserção de Geração Fotovoltaica em Redes Elétricas de Distribuição

OBJETIVO	386
1. INTRODUÇÃO.....	386
2. ESTADO DA ARTE	386
2.1 Considerações Sobre o Estado da Arte	389
3. ESTUDO DE CASO 1: ALIMENTADOR DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.....	390
3.1 Método de Simulação	390
3.1.1 Fatores de influência.....	391
3.1.2 Irradiância solar	391
3.1.3 Demanda das unidades consumidoras	391
3.1.4 Programa utilizado	391
3.1.5 Parâmetros	392
3.1.6 Processamento.....	392
3.2 Hipóteses Adotadas	392
3.3 Sistema Elétrico.....	393
3.3.1 Alimentador de distribuição do campus	393
3.3.2 Critérios de tensão e capacidade de condução de corrente	394
3.3.3 Valores de irradiância solar, temperatura, eficiência e potência gerada pela GDFV	394
3.4 Resultados.....	395
3.4.1 Cenário 1 (caso base) – Sem GDFV.....	396
3.4.2 Cenário 2 – GDFV em diversas unidades consumidoras e maior irradiância solar.....	398
3.5 Conclusões do Alimentador da UnB.....	402
4. ESTUDO DE CASO 2: ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS PERDAS TÉCNICAS EM UM ALIMENTADOR DA CEB-DIS.	403
4.1 Metodologia Utilizada	403
4.2 Condições de Contorno	403
4.3 Algoritmos	404
4.3 Características do Alimentador	405
4.5 Curva de Carga e Irradiância	405
4.6 Resultados das Simulações	407
4.6.1 10% de penetração de GDFV	407
4.6.2 20% de penetração de GDFV	408
4.6.3 30% de penetração de GDFV	409
4.6.4 40% de penetração de GDFV	411
4.6.5 50% de penetração de GDFV	412
4.6.6 Análise conjunta dos níveis de penetração	413
4.7 Conclusões do Alimentador da CEB-DIS	414
5. METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS TÉCNICOS EM ALIMENTADORES REAIS.....	415
5.1 Cálculo da Potência do Sistema Fotovoltaico.....	415
5.2 Níveis de Penetração.....	416
5.3 Determinação dos Impactos Técnicos da GDFV.....	416
5.4 Simulações de Monte Carlo.....	418
5.5 Quantificação dos Impactos Técnicos	419
5.5.1 Tensões.....	419
5.5.2 Perdas	421
5.5.3 Demanda de pico.....	423
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	424
7. REFERÊNCIAS	424

CAPÍTULO 12

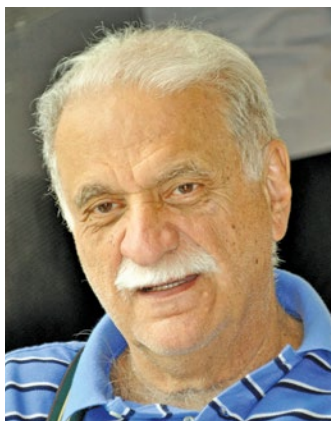
Conclusões e Agenda Estratégica para Futuros Desenvolvimentos da Geração Distribuída no Brasil

OBJETIVO	428
1. INTRODUÇÃO.....	428
2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS.....	429
2.1 Experiências na Execução de Ações de Eficiência Energética na Universidade de Brasília	429
2.2 Aspectos da Implantação de Sistema de Geração Solar Fotovoltaico na Universidade de Brasília.....	429
2.3 Experiências na Execução de Medição e Verificação de Performance de Ações de Eficiência Energética (M&V)	429
2.4 Aspectos da Implantação de Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília.....	430
2.5 Novos Paradigmas para o Planejamento Energético. A importância das Fontes Renováveis e da Eficiência Energética	431
2.6 Desenvolvimento de Cenários para o Planejamento da Inserção da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição.....	431
2.7 Simulações em Tempo Real Envolvendo Geração Distribuída	432
2.8 Métodos de Redução de Circuitos para Simulação de Rede de Distribuição.....	432
2.9 Quantificação dos Impactos Técnicos da Inserção de Fonte de Geração Fotovoltaica em Redes Elétricas de Distribuição. Estudos de Casos.....	433
3. AGENDA ESTRATÉGICA PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	434
3.1 Eficiência Energética	434
3.2 Planejamento da Geração Distribuída.....	434
3.3 Modelagem de Componentes, Ferramentas Computacionais e Laboratórios	434
3.4 Impactos Decorrentes da Penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição	435
3.5 Redes Inteligentes no Contexto da Geração Distribuída	435
3.6 Proteção e Controle Aplicados à Geração Distribuída.....	435
3.7 Microrredes no Contexto da Geração Distribuída	435
3.8 Armazenamento de Energia na Geração Distribuída	435
3.9 Fontes de Energia na Geração Distribuída.....	436
3.10 Novos Negócios.....	436
3.11 Novos Paradigmas para o Planejamento Energético	436

Homenagem

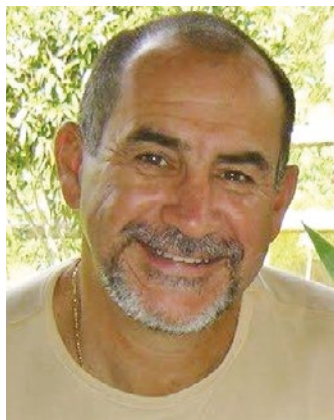
Gostaríamos de dedicar a edição deste livro a dois colegas, professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília – UnB, que nos deixaram recentemente. Eles contribuíram, de forma relevante, para a pesquisa e desenvolvimento do setor de energia elétrica no Brasil.

JOSÉ GALIB TANNURI



O professor José Galib Tannuri, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ (1958-1962) com pós-graduação em *Power System pela General Electric* (1966-1967), trabalhou em Furnas Centrais Elétricas no Rio de Janeiro (1963-1974) e na Themag Engenharia Ltda em Brasília (1974-1995), atuou como consultor e participou de diversos projetos como a interligação do sistema elétrico brasileiro. Foi professor do Instituto Militar de Engenharia no Rio de Janeiro (1967-1974) e da Universidade de Brasília (1978-1995). Além de meu professor, foi meu orientador, meu primeiro chefe e um exemplo para mim e tantos outros engenheiros que atuam no setor de energia elétrica. Com sua inteligência e seu espírito crítico, estava sempre disposto a propor novas soluções para velhos problemas. Na academia, além do brilho das suas aulas, defendia uma universidade engajada e participativa. Este livro, assim como tantos outros projetos, se enquadra na sua visão do mundo acadêmico, onde a ciência trabalha para resolver problemas do mundo real.

MARCO AURÉLIO GONÇALVES DE OLIVEIRA



O professor Marco de Oliveira nasceu no Rio de Janeiro (1959) e se formou em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (1982). Fez mestrado (1989) e doutorado na Universidade Pierre et Marie Curie – Paris VI (1994). Foi, durante toda a sua vida profissional, professor da Universidade de Brasília - UnB. Trabalhava numa enorme variedade de temas como: fontes alternativas e renováveis; energia solar fotovoltaica; conservação e qualidade da energia elétrica. Foi prefeito do Campus da UnB de 2012 a 2016. Foi o primeiro coordenador deste projeto de P&D e participou ativamente das discussões iniciais.

Entramos e nos formamos juntos na UnB. Nos últimos vinte e cinco anos, compartilhamos a mesma sala de trabalho. Desenvolvemos projetos, organizamos cursos, participamos de congressos, redefinimos linhas de pesquisa e orientamos, juntos, dezenas de alunos. Assumimos a responsabilidade de administrar a nossa Universidade. A sua participação era a garantia de trabalho bem feito. Nos deixou, prematuramente, no ano passado. O seu legado acadêmico permanece numa enorme quantidade de trabalhos científicos como, por exemplo, este livro.

Ivan M.T. Camargo

Ex-Reitor da Universidade de Brasília

Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB

Presidente do Conselho de Administração da CEB Holding

PREFÁCIO

Ações de Eficiência Energética Associadas à Geração Distribuída

O desenvolvimento científico e tecnológico do país atualmente é impulsionado em parte pelas instituições públicas de ensino superior, as quais representam uma parcela significativa da produção científica brasileira, formando profissionais nas mais diversas áreas do conhecimento. Assim, de modo a contribuir com a expansão desses ambientes de forma sustentável e reduzindo custos para aplicação com inovações, nós nos deparamos com o obstáculo do consumo de energia elétrica, que representa umas das maiores despesas para as universidades.

Uma fatia significativa do orçamento público é destinada para custear as despesas com energia elétrica dessas instituições. Todavia, uma parcela representativa desses gastos poderia ser evitada por meio de ações de eficiência energética e da implantação de sistemas de geração própria de energia elétrica.

Há, entretanto, uma série de entraves ou obstáculos à implantação de projetos e ações dessa natureza no setor público, notadamente pela inexistência de capital próprio para investimento e pelas dificuldades na realização desses projetos com recursos de terceiros.

Diante deste desafio, foi elaborado o Projeto Eficiência Energética em Prédios Públicos da Universidade de Brasília em atendimento à Chamada n.º 001/2016 da Aneel.

À frente do desenvolvimento desse projeto, encontra-se a UnB, que foi inaugurada em 1962 e conta atualmente com mais de 2.400 professores, 2.600 técnicos-administrativos, 28.500 alunos regulares e 6.300 alunos de pós-graduação, com uma estrutura acadêmica contendo 26 faculdades, 26 centros de pesquisa e quatro campi. Além do bojo de conhecimento técnico disponível pelas diversas áreas de atuação que integram a pesquisa com a necessidade de diferentes setores da economia brasileira, destaca-se um vultuoso ambiente capaz de servir como estudo de caso para serem replicados em outras instituições.

Diante desta rede, se buscou por soluções que consigam trazer novas ferramentas e procedimentos para as instituições públicas, de forma sustentável, mitigando o desafio diário para todos os que estão envolvidos na gestão de energia, bem como aos responsáveis por trazerem inovações que atendam a estes anseios.

O projeto piloto desenvolvido servirá de referência para a formulação e a implementação de ações conjuntas e coordenadas em vários órgãos e instituições públicas do país, fornecendo subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia elétrica em unidades consumidoras da administração pública.

Uma grande aliada é a energia fotovoltaica, que se destaca como uma das principais fontes de energia renovável na matriz energética brasileira, a qual vem aumentando a sua viabilidade econômica, frente a novas tecnologias e inúmeros fornecedores disponíveis.

Logo, há uma grande predisposição do mercado com destaque ao setor público que procura meios de investir em plantas solares de forma eficiente. Nesse contexto, é importante um trabalho que busque alinhamento entre essa tecnologia e a compreensão dos meios necessários para eliminar os impactos no sistema elétrico.

Ao longo desse caminho, buscou-se multiplicar os conhecimentos, por meio de um corpo técnico multidisciplinar que foi essencial para a troca de experiência, capacitando alunos e profissionais da área, com destaque para a cultura que se promoveu com a percepção de consciência ambiental a qual está diretamente ligada, não somente aos técnicos, mas a todos os usuários do campi.

A concretização de um projeto com esta envergadura não se deve apenas aos seus responsáveis, mas, antes, a todos aqueles que de maneira direta ou indireta se envolveram. Foram desafiadores os momentos que compartilharam dúvidas, incertezas, conquistas e aprendizagens. Agradecemos a todos que se dedicaram para viabilizar a conclusão do projeto frente aos desafios e dificuldades superadas durante esta jornada.

Elias Barbosa de Alvarenga

Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética
CEB Distribuição S.A.

PREFÁCIO

Eficiência e Pesquisa Caminham Juntas

A conclusão de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento é uma ótima oportunidade de olhar para trás, contar sua história, e perceber o quanto as parcerias entre instituições e pesquisadores podem contribuir para o desenvolvimento do país. A história de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ressalta o papel fundamental de todos os envolvidos para o sucesso do projeto, desde a instituição financiadora, com suas ações de indução dos temas aplicados, às instituições proponentes e executoras, de ensino e pesquisa, com a realização de estudos e investigação científica gerados no projeto. As empresas privadas envolvidas em um projeto também desempenham seu papel importante nessa cadeia, contribuindo para o desenvolvimento do conhecimento aplicado ao setor privado. Com relação às pessoas, um projeto envolve gestores, técnicos de todos os níveis, pesquisadores, professores e alunos.

Como pesquisadores da área de engenharia, participar de alguns projetos de Pesquisa e Desenvolvimento nos dá grande satisfação por realizarmos nossa vocação científica. Contudo, como diretores das duas faculdades de Engenharia da Universidade de Brasília (UnB), conseguimos ampliar ainda mais as nossas realizações, ao conduzir institucionalmente os processos e consequentemente viabilizar os projetos de pesquisa dos colegas da comunidade acadêmica à qual pertencemos. Portanto, nessa função de diretores, também nos realizamos com a conclusão de cada projeto que se transforma em uma nova história.

Nesse sentido, convido o leitor a tomar conhecimento dessa história de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento sobre Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior, que mostra o nascimento do projeto, com uma chamada da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), as características da proposta da Universidade de Brasília, o desenvolvimento dos trabalhos ao longo do projeto, seus resultados e aplicações com instalação e gestão de um sistema de minigeração distribuída fotovoltaica. O legado a ser deixado em projetos, tais como o apresentado neste livro, não é somente um conjunto de painéis fotovoltaicos com economia na conta de eletricidade, mas principalmente a união de interesses institucionais comuns visando ao desenvolvimento do setor energético nacional, a realização de pesquisas em tecnologia, a formação de alunos de graduação e pós-graduação, a produção de *softwares*, o aperfeiçoamento de sistemas de gestão, e disseminação do conhecimento com trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos.

Augusto César de Mendonça Brasil

Diretor da Faculdade do Gama
Universidade de Brasília

Márcio Muniz de Farias

Diretor da Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília

Resumo Executivo

Os sistemas de energia elétrica têm passado, nas últimas décadas, por uma grande quebra de paradigma e modernização de processos, os quais estão associados aos diversos avanços tecnológicos e crescentes preocupações com as mudanças climáticas, eficiência energética, sustentabilidade, segurança de suprimento, dentre outros aspectos. Nesse contexto, identifica-se uma crescente integração à rede de fontes alternativas e distribuídas de energia elétrica, as quais têm proporcionado uma diversificação das matrizes energéticas em diversos países e incitado alterações em processos de gestão, regulação, planejamento, operação e manutenção. De forma complementar, os avanços na implantação de sistemas de armazenamento de energia, incluindo o aperfeiçoamento de veículos elétricos, na expansão no uso de sistemas de tecnologia da informação e redes de comunicação, bem como o emprego de técnicas de inteligência artificial e *big data* têm sedimentado o caminho para a consolidação das chamadas “redes elétricas inteligentes”. Paralelamente, a eficiência energética se apresenta como uma alternativa com grande potencial para viabilizar o uso racional da energia elétrica em diversos setores da economia, permitindo que se realize um mesmo processo ou serviço, sem alterações em seus resultados, com o uso de uma menor quantidade de energia. Nesse contexto, as Ações de Eficiência Energética englobam um vasto conjunto de medidas, as quais dependem do uso final da energia e podem abranger, por exemplo, *retrofitting* de instalações, uso de equipamentos com menores perdas de energia, sistemas de monitoramento energético, programas de etiquetagem de edificações e campanhas de sensibilização de usuários.

Neste cenário, em outubro de 2016, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) tornou pública a Chamada nº 001/2016 do Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa & Desenvolvimento: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior.

A Aneel teve como objetivo selecionar projetos pilotos e demonstrativos em Instituições Públicas de Educação Superior, os quais poderiam servir de referência para a formulação e a implementação de ações conjuntas e coordenadas em vários órgãos e instituições públicas do país. Esperando-se, igualmente, que a execução desses projetos pudesse fornecer subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia elétrica em unidades consumidoras da administração pública federal, estadual e municipal.

Os projetos realizados no âmbito desta Chamada permitiriam a troca de equipamentos energeticamente ineficientes por outros mais eficientes, incentivando a mudança de hábito de consumo de professores, alunos e funcionários das instituições de educação, a implantação de minigeração de energia elétrica nas Instituições Públicas de Educação Superior, a redução nas contas de energia elétrica dessas instituições, assim como uma nova forma de gestão energética, por meio de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, entre outras ações de capacitação profissional. Destaca-se, ainda, que criar uma cultura de eficiência energética na formação de futuros profissionais é de grande relevância para a sociedade como um todo.

De modo específico, e considerando o exposto acima, a Aneel espera que esses projetos possam:

- contribuir para que as referidas instituições mantenham sua capacidade de pagamento das faturas de energia elétrica;
- facilitar a inserção da Minigeração na matriz energética brasileira e no setor público;
- fomentar o treinamento e a capacitação de técnicos especializados em Eficiência Energética e Geração Distribuída em Instituições Públicas de Educação Superior;
- avaliar a viabilidade econômica da geração própria de energia e seus impactos nos sistemas de distribuição;
- incentivar o desenvolvimento da cadeia produtiva desse segmento industrial e a nacionalização da tecnologia empregada;
- fomentar a capacitação laboratorial em instituições públicas de ensino e pesquisa;
- identificar possibilidades de otimização dos recursos energéticos, considerando o planejamento integrado dos recursos; e
- servir de referência para projetos de Eficiência Energética e Geração Distribuída em instituições públicas e privadas.

Para atendimento a esta Chamada, a CEB Distribuição S.A. (CEB-DIS), como empresa proponente, e a Universidade de Brasília – UnB, por meio da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec), na qualidade de executora, apresentaram em 20 de julho de 2017 as seguintes propostas de projetos:

- Projeto de Eficiência Energética (PEE) intitulado “Eficiência energética em prédios públicos da Universidade de Brasília”;
- Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) intitulado “Geração distribuída na Universidade de Brasília integrada à rede de distribuição da CEB”.

As propostas, com duração de 24 meses, tiveram como objetivo a implantação de projetos pilotos de eficiência energética e geração distribuída na Universidade de Brasília, onde as seguintes ações foram realizadas:

- formação de uma equipe de pesquisadores, agregando conhecimentos das áreas de eficiência energética, fontes renováveis, qualidade da energia e tecnologia da informação;
- inserção de disciplinas voltadas à Geração Distribuída e Eficiência Energética na grade curricular dos cursos de graduação e pós-graduação da UnB. Com isso, incentivar a plena participação da comunidade universitária nas ações do projeto;
- execução de atividades por equipe de professores e pesquisadores, e também de alunos de graduação e pós-graduação, os quais, ao se engajarem no projeto, certamente poderão absorver conhecimentos complementares sobre o tema em pauta para a sua formação;
- implantação de um sistema de gestão e monitoramento do energético, a partir da instalação de medidores de grandezas elétricas nos prédios da UnB e desenvolvimento de *software* supervisor. Os dados coletados e analisados, além de contribuir para a gestão da eficiência energética, também fornecerão informações valiosas sobre como a GD afeta o perfil de tensão, etc, o que permitirá validar os modelos matemáticos de impactos da GD;
- realização da análise de impactos técnicos, por meio de simulações computacionais, relacionadas à inserção de GD no sistema de distribuição da CEB-DIS;
- implantação de uma infraestrutura laboratorial na UnB que emule redes de distribuição de baixa tensão para a análise de impactos da GD;
- reativação da Comissão Interna de Conservação de Energia na UnB, com o objetivo primordial de estabelecer uma metodologia de gestão de energia elétrica nesta instituição pública, a partir do estabelecimento de indicadores e metas de redução dos desperdícios e, subsequentemente, processos para realizar a revisão periódica destas metas;
- realização de diagnóstico energético das instalações da UnB, considerando-se um estudo dos benefícios financeiros, medição e verificação dos resultados, de acordo com a regulamentação vigente;
- realização de estudos de substituição e descarte dos equipamentos ineficientes;
- implantação de um sistema fotovoltaico de 150 kWp. Esse sistema, além de promover a redução na conta de energia elétrica, possibilitará pesquisas de impactos da Geração Distribuída (GD) na rede.

Ao longo do projeto, os conhecimentos gerados pela equipe de professores, alunos e especialistas de outras instituições, foram consolidados neste livro, que se constitui por 12 capítulos, conforme os objetivos apresentados a seguir:

CAPÍTULO 1 – Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Chamada Aneel n.º 001/2016

Apresentar as características básicas do Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Este projeto foi lançado pela Chamada nº 001/2016 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), mediante a Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética (SPE), no âmbito do seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e Programa de Eficiência Energética (EE). Apresenta-se, igualmente, a proposta formulada pela Universidade de Brasília (UnB), junto à empresa distribuidora CEB Distribuição S.A. (CEB-DIS), em atendimento à chamada referenciada.

CAPÍTULO 2 – Experiências na Execução de Ações de Eficiência Energética na Universidade de Brasília

Descrever as experiências associadas à substituição dos equipamentos de iluminação artificial e condicionamento de ar para fins de eficiência energética.

Apresentar mecanismos para elaboração de estudos de eficiência energética em sistema de iluminação e climatização.

CAPÍTULO 3 – Aspectos da Implantação de Sistema de Geração Solar Fotovoltaico na Universidade de Brasília

Apresentar um conjunto de critérios para subsidiar o planejamento, implantação e operação de uma planta fotovoltaica, levando-se em consideração o ciclo de vida da instalação.

Apresentar experiências na implantação de sistema solar fotovoltaico de 150 kWp nos prédios da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, considerando principalmente as premissas utilizadas para o processo de licitação do sistema fotovoltaico, as características do projeto implantado, informações sobre o desempenho da instalação fotovoltaica, sob a ótica do projeto e da operação.

CAPÍTULO 4 – Experiências na Execução de Medição e Verificação de Performance de Ações de Eficiência Energética

Apresentar conceitos relacionados ao Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance de ações de eficiência energética.

Descrever experiências na realização de medição e verificação de performance, por meio de exemplos práticos que abrangem situações reais.

Destaca-se que uma das principais barreiras para a difusão da cultura da eficiência energética é a dificuldade de quantificar os benefícios das ações realizadas e superar as incertezas. Nesse sentido, o processo de Medição e Verificação de performance (M&V) surge como tentativa de suplantar esta barreira e aumentar a confiabilidade de um projeto. Basicamente, a M&V consiste na aplicação de mecanismos metodológicos para determinar, de modo seguro e confiável, a economia real de energia proveniente das ações de eficiência energética.

CAPÍTULO 5 – Aspectos da Implantação de Sistema de Gestão Energética (SIGE) da Universidade de Brasília

Apresentar aspectos do desenvolvimento e implantação do Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília. Este sistema é caracterizado pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e desenvolvimento de *software* supervisor, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações da Universidade. Apresentam-se requisitos para escolhas de equipamentos, metodologias de projeto e informações.

CAPÍTULO 6 – Estado da Arte da Geração Distribuída

Apresentar o resultado da pesquisa bibliográfica realizada com o objetivo de determinar o estado da arte voltada para o tema Geração Distribuída (GD), que contou com a base de dados das seguintes fontes de informação: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – SEPOPE, Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS, Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL, UFRJ, Universidade de Brasília – UnB, Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITE-NEL, Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Aneel – ANEEL e Conseil International des Grands Réseaux Electriques – CIGRÉ.

Os artigos de revistas científicas nacionais e internacionais selecionados e analisados durante a execução do projeto foram referenciados em cada um dos capítulos, de acordo com os assuntos tratados.

CAPÍTULO 7 – Novos Paradigmas para o Planejamento Energético. A Importância das Fontes Renováveis e da Eficiência Energética

Apresentar, com base em uma perspectiva histórica, o crescimento passado e o rumo atual do sistema energético mundial. Reflexões são pontuadas e aprendizagens obtidas, então novos rumos são indicados, com base nas recentes diretrizes internacionais promulgadas, culminando para a necessidade de modernização dos cursos de engenharia para poder enfrentar a questão energética.

CAPÍTULO 8 – Desenvolvimento de Cenários para o Planejamento da Inserção da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição. Estudo de Caso Distrito Federal

Apresentar alguns indicadores relacionados ao Distrito Federal (DF), que se prestarão como subsídios para a seleção dos possíveis cenários de penetração de geração distribuída solar fotovoltaica (GDFV) na rede de distribuição da CEB Distribuição S.A. (CEB-DIS).

Selecionar, com base nestes indicadores, os alimentadores para a realização dos estudos de casos da avaliação de impactos decorrentes da integração de GDFV na rede elétrica. Cabe destacar que, em função da integração de 150 kWp de geração fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia (FT) da UnB, parte das análises que foram efetuadas contemplam o Campus Universitário Darcy Ribeiro.

CAPÍTULO 9 – Simulações em Tempo Real Envolvendo Geração Distribuída

Apresentar as principais características do ambiente para simulação em tempo real de redes de distribuição e microrredes. Este ambiente de simulação torna-se uma excelente solução para a integração de tecnologias emergentes à infraestrutura do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da Universidade de Brasília, em razão do seu poder computacional e a flexibilidade de integração. Dentre as suas diversas aplicações, encontra-se a avaliação dos impactos da integração de recursos distribuídos à rede elétrica, e mais especificamente da integração de geração distribuída fotovoltaica. Além de possibilitar a análise dos citados impactos, a tecnologia de simulação de tempo real tem o propósito de potencializar a execução de novas pesquisas de relevância para o setor elétrico brasileiro, em áreas em que poucas instituições nacionais têm atuado.

CAPÍTULO 10 – Métodos de Redução de Circuitos para Simulação de Rede de Distribuição

Apresentar os principais conceitos relacionados aos métodos de redução de circuitos aplicáveis à avaliação de impactos da integração de sistemas fotovoltaicos em redes de distribuição. Para tanto, inicialmente, são expostos alguns aspectos introdutórios relacionados aos cenários de aplicação dos métodos. Em seguida, têm-se o estado da arte de métodos de redução de sistemas elétricos de potência e a exibição detalhada dos métodos selecionados para reprodução neste projeto.

CAPÍTULO 11 – Quantificação dos Impactos Técnicos da Inserção de Fonte de Geração Fotovoltaica em Redes Elétricas de Distribuição. Estudos de Casos

Apresentar o estado da arte da quantificação dos impactos da GDFV em redes de distribuição.

Realizar estudo de caso para o alimentador de média tensão do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Por ser um alimentador pequeno, com dezenas de barras, é possível identificar possíveis locais e potências para instalação da geração distribuída (GDFV), e a tensão em todas as barras pode ser analisada individualmente. Outro estudo de caso foi realizado considerando um alimentador da CEB DIS, em que foi analisado o efeito das perdas técnicas em função do aumento da penetração da GDFV. Por possuir milhares de unidades consumidoras, um método probabilístico é utilizado para alocar a geração ao longo do alimentador. Ambos os estudos de caso consideram uma situação específica, conservadora, de irradiação solar.

Definir um método robusto, que permite simular alimentadores reais, com milhares de barras, e apresentar os resultados de forma consolidada, com indicadores que indicam a variação de tensão das barras, a redução de demanda e as perdas, considerando, probabilisticamente, o local de alocação da GD e também uma amostra maior de irradiação solar, a fim de obter resultados mais representativos.

CAPÍTULO 12 - Conclusões e Agenda Estratégica para Futuros Desenvolvimentos da Geração Distribuída no Brasil

Apresentar as principais conclusões relacionadas aos temas que foram abordados nos capítulos anteriores.

Apresentar uma agenda estratégica de temas julgados promissores com vistas à pesquisa e desenvolvimento de futuros projetos que tenham como objetivo aprimorar as tecnologias que integram a implantação da geração distribuída no setor elétrico brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Pela oportunidade relativa à participação neste projeto, os autores agradecem:

- à CEB Distribuição S.A, como empresa proponente, enfatizando o apoio do sempre presente do Gerente do Projeto Elias Barbosa de Alvarenga e os engenheiros Caio Cesar Rocha Barroso e Junio Agostinho de Matos;
- à Magnífica Reitora da Universidade de Brasília, Professora Márcia Abrahão Moura, pelo apoio institucional e incentivos para a execução das atividades atreladas ao projeto. De forma especial, agradecimentos pelas contribuições advindas da Secretaria de Infraestrutura (Infra), Centro de Planejamento Oscar Niemeyer (CEPLAN) e Diretoria de Obras (DOB), aqui representados por: Arquiteta Helena Zanella, Arquiteto Bruno Moraes Guimarães, Arquiteto Júlio Cesar Lavrador Andréo e o Engenheiro Augusto César Oliveira Dias;
- à Finatec, principalmente ao seu ex-diretor presidente Edson Paulo da Silva que contribuiu de forma relevante para a viabilização do projeto; ao atual diretor presidente Armando de Azevedo Caldeira Pires; à gerente da Área de Acompanhamento e Gerência de Projetos Luiza Lavocat Galvão de Almeida Coelho; e às analistas de projeto Andreia da Silva Ribeiro e Claudia Maria de Carvalho;
- à Agência Nacional de Energia Elétrica, ressaltando os nomes dos engenheiros Ailson de Souza Barbosa, Aurélio Calheiros de Melo Junior e Fabio Stacker Silva;
- e, pelas contribuições recebidas ao longo do projeto, os autores agradecem também aos professores da Universidade de Brasília Ivan Marques de Toledo Camargo e Antonio Cesar Pinho Brasil Junior.

E sempre lembrando do nosso coordenador Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, que estabeleceu as primeiras linhas mestras do projeto e que nos guiou de forma sempre competente e ativa, até o limite de suas forças.

Certamente, ele como mentor primeiro deste projeto, deve ter visualizado o uso deste livro, que teve a participação dinâmica de tantos especialistas altamente motivados e imbuídos do espírito de poder compartilhar os seus conhecimentos e experiências e que possa ser amplamente utilizado pelos alunos, pelos professores e pelos profissionais, e que dele possam usufruir dos conhecimentos que foram reportados com muita dedicação e alegria, objetivando, assim, transferir para o setor de energia elétrica mais um instrumento para o fomento da excelência da academia e engenharia nacional.

Registra-se que este livro foi elaborado durante a pandemia mundial de COVID-19, a qual acarretou diversos impactos sociais e econômicos. Neste ambiente de diversidades e incertezas, os autores expressam seus sentimentos àqueles que perderam entes queridos. Acredita-se que a publicação deste livro possa transmitir a experiência dos autores a futuras gerações de profissionais e que tenha superado as expectativas.

Vale, portanto, neste momento de plena realização, lembrar do seguinte ditado:

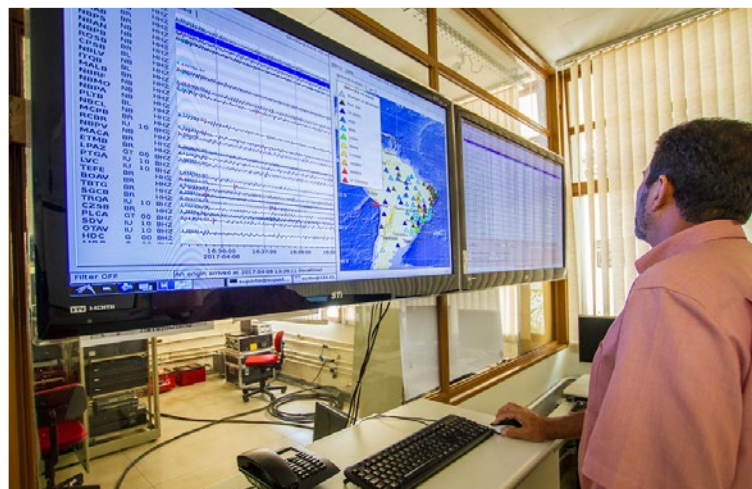
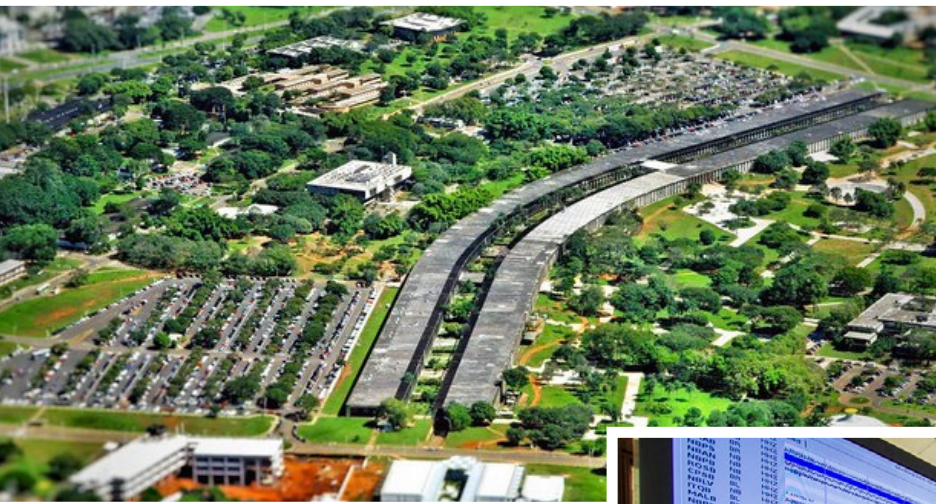
*“Não espere para ver o que acontece,
lance-se a luta e faça acontecer, e assim, comece o dia como o sol,
que sempre ultrapassa a noite e volta a brilhar de novo.”*

Autor desconhecido

CAPÍTULO 1

Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Chamada n.º 001/2016 da Aneel

Sergio de Oliveira Frontin



OBJETIVO

Apresentar as características básicas do Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Este projeto foi lançado pela Chamada n.º 001/2016 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), mediante a Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética (SPE), no âmbito do seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e Programa de Eficiência Energética (EE) .

Será igualmente apresentada a proposta formulada pela Universidade de Brasília (UnB) junto à empresa distribuidora CEB Distribuição S.A. (CEB-DIS), em atendimento à Chamada acima referenciada.

1. INTRODUÇÃO

Em outubro de 2016, a Aneel tornou pública a Chamada n.º 001/2016 do Projeto Prioritário de EE e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior.

Nesta Chamada, a Aneel reúne os dois programas (Prioritário de EE e Estratégico de P&D), tendo em vista os seguintes fatos motivadores, a seguir transcritos:

Entre as Instituições Públicas de Educação Superior, encontram-se, atualmente, 63 universidades federais. Essas instituições desempenham um importante papel no desenvolvimento científico e tecnológico do país, respondendo por uma parcela significativa da produção científica brasileira e pela formação de profissionais nas mais diversas áreas do conhecimento. Constatou-se que, em grande parte dessas instituições públicas, a conta de energia elétrica é uma de suas maiores despesas, quando elencados todos os seus itens de pagamento mensal.

De acordo com a Secretaria de Ensino Superior (SESu) do Ministério da Educação, o valor total pago em 2015 apenas pelas universidades federais foi de cerca de R\$ 430.000.000,00 (quatrocentos e trinta milhões de reais). Segundo essa mesma fonte, as despesas com energia elétrica dessas instituições despontam como o 3º maior grupo, representando cerca de 9% dos gastos apurados em 2015.

Sabe-se, porém, que uma parte considerável desses gastos deve-se ao uso de equipamentos ineficientes e a práticas inadequadas de instalação, uso e manutenção dos aparelhos, entre outros inconvenientes da falta de uma cultura de uso eficiente e racional de energia no país.

Apesar dos esforços de vários órgãos e instituições públicas, há, ainda, vários entraves à melhoria da eficiência energética no uso final de energia elétrica no setor público. A despeito das dificuldades financeiras e/ou orçamentárias para pagar a fatura de energia elétrica e outras despesas correntes, não há nenhuma dificuldade do ponto de vista administrativo, contábil ou jurídico.

Por outro lado, quando se trata do pagamento de ações de eficiência energética, principalmente quando envolve a compra e a substituição de equipamentos, vários obstáculos são verificados. Entre os principais entraves, destacam-se a falta de capital próprio para investimento e as dificuldades para obtenção de financiamento ou obtenção de recursos em outra(s) fonte(s).

Além da redução do valor da fatura de energia dessas instituições por meio da melhoria da eficiência no uso final de energia, há, também, a possibilidade de redução dos gastos com energia elétrica por intermédio da geração própria de energia (micro e minigeração).

No dia 24 de novembro de 2015, foram aprovados pela Aneel aprimoramentos na Resolução Normativa n.º 482/2012, a qual criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, permitindo que o consumidor instale pequenos geradores (tais como painéis solares fotovoltaicos e microturbinas eólicas, entre outros) em sua unidade consumidora e troque energia com a distribuidora local com objetivo de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica. Quando a quantidade de energia gerada por um desses consumidores em determinado mês for superior à energia consumida por ele naquele período, este consumidor ficará com os créditos que poderão ser utilizados para diminuir sua fatura no mês seguinte. De acordo com as novas regras, caso o mesmo titular da conta tenha outra unidade consumidora, ele poderá utilizar esse crédito por um período de até 60 meses, desde que estas outras unidades estejam na área de atendimento da mesma distribuidora.

Diante do exposto, entende-se necessária e oportuna a publicação de uma Chamada de Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento, buscando selecionar projetos pilotos e demonstrativos em Instituições Públicas de Educação Superior, os quais servirão de referência para a formulação e a implementação de ações conjuntas e coordenadas em vários órgãos e instituições públicas do país. Espera-se que a execução desses projetos forneça subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia elétrica em unidades consumidoras da administração pública federal, estadual e municipal.

Os projetos realizados no âmbito desta Chamada possibilitarão a troca de equipamentos energeticamente ineficientes por outros mais eficientes, incentivarão a mudança de hábito de consumo de professores, alunos e funcionários das instituições de educação, a implantação de minigeração de energia elétrica nas Instituições Públicas de Educação Superior, a redução nas contas de energia elétrica dessas instituições, assim como uma nova forma de gestão energética, por meio de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, entre outras ações de capacitação profissional. Destaca-se, ainda, que criar uma cultura de eficiência energética na formação de futuros profissionais é de grande relevância para a sociedade como um todo.

2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO PROJETO

Como exemplificado no item anterior, as despesas com energia elétrica são um dos principais itens de custeio em várias instituições públicas, de modo que uma quantia vultosa de recursos públicos é destinada ao pagamento da fatura de energia elétrica dessas instituições. Parte considerável desses gastos poderia ser evitada por meio de ações de eficiência energética e da implantação de sistemas de geração própria de energia (micro ou minigeração).

Há, entretanto, uma série de entraves ou obstáculos à implantação de projetos e ações dessa natureza no setor público, notadamente pela inexistência de capital próprio para investimento e pelas dificuldades na realização desses projetos com recursos de terceiros.

Excluindo-se as restrições orçamentárias, não há nenhuma dificuldade contábil, jurídica ou administrativa para pagar a fatura de eletricidade. Por outro lado, quando se trata do pagamento de um serviço ou da aquisição de equipamentos destinados à melhoria da eficiência energética ou à geração própria de energia, uma série de obstáculos aparece no meio do caminho.

Sabe-se, porém, que é possível e desejável encontrar soluções plausíveis para a superação ou redução desses entraves. É esse, portanto, o principal objetivo desta Chamada de Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento, que busca fomentar o desenvolvimento de projetos pilotos em Instituições Públicas de Educação Superior. Espera-se, com isso, obter subsídios para a implantação de projetos e ações dessa natureza em todo o setor público.

O direcionamento do escopo dessa Chamada para as instituições de educação superior deve-se à existência de corpo técnico qualificado nessas instituições para a elaboração e o acompanhamento da execução dos projetos, bem como à avaliação dos resultados obtidos e proposição de soluções para os entraves apontados anteriormente.

De modo específico, e considerando o exposto acima, espera-se que esses projetos possam:

- contribuir para que as referidas instituições mantenham sua capacidade de pagamento das faturas de energia elétrica;
- facilitar a inserção da Minigeração na matriz energética brasileira e no setor público;
- fomentar o treinamento e a capacitação de técnicos especializados em Eficiência Energética e Geração Distribuída em Instituições Públicas de Educação Superior;
- avaliar a viabilidade econômica da geração própria de energia e seus impactos nos sistemas de distribuição;
- incentivar o desenvolvimento da cadeia produtiva desse segmento industrial e a nacionalização da tecnologia empregada;
- fomentar a capacitação laboratorial em instituições públicas de ensino e pesquisa;
- identificar possibilidades de otimização dos recursos energéticos, considerando o planejamento integrado dos recursos; e
- servir de referência para projetos de Eficiência Energética e Geração Distribuída em instituições públicas e privadas.

3. AÇÕES DO PROJETO

Entre as ações dos projetos, a Aneel solicitou os seguintes itens:

- criação e instalação de um Grupo de Gestão Energética (GGE) ou Comissão Interna de Conservação de Energia (CICE) em cada instituição beneficiada;
- diagnóstico energético;
- Estudo de Viabilidade Econômica de acordo com a metodologia especificada na regulamentação vigente, considerando as ações que foram custeadas com recursos do Programa de Eficiência Energética;
- medição e verificação de resultados conforme regulamentação vigente;
- descarte dos equipamentos ineficientes retirados;
- instalação de um Sistema de Medição das Grandezas Elétricas monitoradas em cada instituição, observando-se não apenas a entrada geral de energia, mas também os centros de cargas que serão objeto das ações de efficientização energética;

- estabelecimento de metodologia de gestão energética, podendo ser tomado como referência a norma ABNT 50001/2011, com metas de redução dos desperdícios com energia para cada instituição;
- estruturação de um processo de Etiquetagem das Edificações das instituições, de acordo com o Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro);
- revisão periódica das metas de redução dos desperdícios com energia elétrica para cada instituição;
- inserção de matérias voltadas à Eficiência Energética e Geração Distribuída na grade curricular de cursos afins, tais como Engenharia Elétrica, Engenharia Civil e Arquitetura; e
- levantamento dos impactos da Geração Distribuída (GD) na rede da distribuidora, podendo incluir o impacto de outras unidades consumidoras além do sistema de GD a ser instalado neste projeto:
 - ▷ perfil de tensão no(s) alimentador(es);
 - ▷ carregamento do(s) transformador(es) (medir e simular);
 - ▷ injeção de harmônicos;
 - ▷ perdas (aumento ou redução);
 - ▷ ilhamento;
 - ▷ correção de fator de potência e serviços ancilares, incluindo modelos de remuneração para o consumidor;
 - ▷ limite e sustentabilidade da inserção de GD na rede local; e
 - ▷ eficiência técnica e econômica da(s) tecnologia(s) escolhida(s).

4. RESULTADOS ESPERADOS DO PROJETO

A Aneel indica, ainda, que são esperados como resultados principais do projeto os seguintes itens:

- redução da conta de energia elétrica nas unidades consumidoras beneficiadas;
- disseminação de conhecimentos e práticas de Eficiência Energética e Geração Distribuída na grade curricular das referidas instituições públicas;
- documento que detalhe a experiência promovida pelo projeto, visando replicar ações voltadas à Eficiência Energética e Geração Distribuída em outros prédios públicos;
- capacitação laboratorial de estudantes, servidores e do corpo docente das instituições, visando dar perenidade às ações do projeto e promover a replicabilidade destas ações em outras instituições e unidades consumidoras;
- redução de barreiras técnicas, financeiras, jurídicas, administrativas e tecnológicas para implantação de minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior e demais instituições públicas; e
- publicações técnico-científicas, incluindo livros, guias, manuais e demais publicações que contribuam com a replicabilidade das ações de Eficiência Energética e da Geração Distribuída realizadas no projeto.

5. PROPOSTAS APRESENTADAS

Para atendimento desta Chamada, a CEB-DIS, como empresa proponente, e a Universidade de Brasília, por meio da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec), na qualidade de executora, apresentaram em 20 de julho de 2017 as seguintes propostas:

- Projeto Estratégico de P&D-Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília, Integrada à Rede de Distribuição da CEB-DIS; e
- Projeto Prioritário de Eficiência Energética em Prédios Públicos da Universidade de Brasília.

A seguir será detalhada cada uma destas propostas.

6. PROPOSTA DE PROJETO ESTRATÉGICO DE P&D – GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO CAMPUS DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA INTEGRADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA CEB-DIS

6.1 Objetivos

A proposta tem como objetivo a implantação de projetos pilotos de minigeração distribuída no Campus da Universidade de Brasília (UnB), integrada à rede de distribuição da CEB-DIS. Para tanto, as seguintes ações inerentes à Pesquisa e Desenvolvimento serão realizadas:

- formar uma equipe de pesquisadores multidisciplinar que agregue conhecimentos das áreas de fontes renováveis, qualidade da energia e tecnologia da informação;
- efetuar a inserção de disciplinas voltadas à Geração Distribuída na grade curricular dos cursos de graduação e pós-graduação da UnB. Com isso, incentivar a plena participação da comunidade universitária nas ações do projeto. As atividades serão realizadas por equipe de professores e pesquisadores, e também de alunos de graduação e pós-graduação, os quais, ao se engajarem no projeto, certamente poderão absorver conhecimentos complementares sobre o tema em pauta para a sua formação. Além disso, os alunos poderão dar palestras e minicursos, como atividades de extensão universitária, objetivando capacitação profissional, tanto da comunidade acadêmica quanto da população em geral;
- formar um centro de monitoramento do consumo de energia elétrica, a partir da instalação de medidores eletrônicos nos prédios do Campus da UnB. Os dados coletados e analisados, além de contribuir para a gestão da eficiência energética, também fornecerão informações valiosas sobre como a GD afeta o perfil de tensão, etc, o que permitirá validar os modelos matemáticos de impactos da GD;
- realizar análise de impactos técnicos, por meio de simulações computacionais, relacionadas à inserção de GD no sistema de distribuição da CEB-DIS;
- especificar e implantar uma infraestrutura laboratorial na UnB que emule redes de distribuição de baixa tensão para a análise de impactos da GD;

- realizar seminário, visando à divulgação do projeto e obtenção de subsídios por parte de outros especialistas no assunto;
- publicar artigos técnicos-científicos em congressos e periódicos da área; e
- elaborar relatório final que detalhe a experiência promovida pelo projeto, visando replicar ações voltadas à geração distribuída em outros prédios públicos.

Assim, espera-se que a execução deste projeto forneça subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia elétrica e intensificação do uso de fontes renováveis em unidades consumidoras da administração pública federal, estadual e municipal.

6.2 Motivação

A Universidade de Brasília (UnB) desempenha um importante papel no desenvolvimento científico e tecnológico do Distrito Federal e do país, respondendo por uma parcela da produção científica e pela formação de profissionais nas mais diversas áreas do conhecimento. As despesas com energia elétrica nesta instituição constituem um dos seus principais itens de custeio, conforme se constata também em outras universidades federais.

Parte considerável desses desembolsos poderia ser evitada por meio de ações de eficiência energética e pela implantação de sistemas de geração própria de energia (micro ou minigeração). Isso pode ser explicado pela utilização de equipamentos ineficientes e emprego de práticas inadequadas de instalação, operação e manutenção dos aparelhos, entre outros inconvenientes decorrentes da falta de uma cultura de uso eficiente e racional de energia no país.

Apesar dos esforços de vários órgãos e instituições públicas, há, ainda, muitos entraves à melhoria da eficiência energética no uso final de energia elétrica no setor público, dentre os quais se destacam a falta de capital próprio para investimento e as dificuldades para obtenção de financiamento ou obtenção de recursos em outra(s) fonte(s). Considerando-se os aspectos ora mencionados, entende-se que a Chamada de Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento caracteriza-se como uma importante oportunidade para se desenvolverem ações que possibilitarão a troca de equipamentos energeticamente ineficientes por outros mais eficientes, incentivarão a mudança de hábito de consumo de professores, alunos e funcionários das instituições de educação, e permitirão a implantação de minigeração de energia elétrica e de uma nova política de gestão energética.

6.3 Originalidade

Os principais aspectos deste projeto que garantem a sua originalidade, no que concerne à análise de impactos da inserção de fontes renováveis na rede, concentram-se na possibilidade de uso de dados reais da rede elétrica por meio do *software OpenDSS* e, ainda, na especificação e implantação de uma infraestrutura laboratorial que emule uma rede de distribuição de baixa tensão (microrrede).

Computacionalmente, pode-se simular o impacto que a instalação da GD causaria se fosse implantada em diversos telhados dos prédios do Campus da UnB, permitindo, assim, avaliar os limites de inserção da GD na rede elétrica interna da UnB, considerando alguns dos possíveis impactos decorrentes desta ação; sendo igualmente possível incluir o impacto de outras unidades consumidoras, além do sistema fotovoltaico a ser instalado neste projeto.

Por outro lado, por meio de um conjunto integrado de equipamentos elétricos (painéis fotovoltaicos, uma fonte eólica, uma fonte controlada capaz de reproduzir sinais medidos no sistema elétrico e outros componentes), serão analisados e avaliados os possíveis impactos da inserção de cada fonte (fotovoltaica e eólica) na rede elétrica. Será então possível analisar e comparar os resultados dos estudos realizados mediante estas duas ferramentas, determinando os requisitos técnicos, as situações de aplicabilidade etc.

Outro aspecto da originalidade do projeto refere-se à formação do Centro de Monitoramento do consumo de energia elétrica, para receber, analisar, diagnosticar e disponibilizar as informações provenientes de vários medidores eletrônicos a serem instalados nos prédios do Campus da UnB. Estas informações consolidadas, além de contribuir para a gestão da eficiência energética, também fornecerão informações valiosas sobre como a GD afeta o perfil de tensão etc, o que vai permitir validar os modelos matemáticos de impactos da GD, estudos nas ferramentas computacionais e laboratoriais apresentadas acima.

Em resumo, a originalidade do projeto baseia-se em três vertentes: i) uso de dados reais da rede elétrica por meio do *software OpenDSS*; ii) especificação e implantação de uma infraestrutura laboratorial que emule uma rede de distribuição de baixa tensão (microrrede); e iii) formação do Centro de Monitoramento do consumo de energia elétrica. Esses aspectos serão detalhados a seguir.

6.3.1 Uso de dados reais da rede elétrica por meio do *software OpenDSS*

O emprego de fontes renováveis tem como um dos seus principais objetivos reduzir os gases de efeito estufa que vem aumentando de forma marcante em âmbito global. Em decorrência disso, têm surgido novos cenários no setor elétrico, constituídos cada vez mais por GD. Especialistas da área vêm ressaltando a necessidade de se otimizar o sistema elétrico tornando-o cada vez mais inteligente e robusto, com vistas à ampliação do uso de fontes renováveis e ao desenvolvimento e à aplicação de dispositivos de armazenamento de energia.

Este novo cenário vem impondo a necessidade de se revisitar os conceitos de planejamento, operação, controle, manutenção e gestão, tanto em relação à transmissão como em relação à distribuição. Logo, mostra-se importante a capacitação dos funcionários das empresas e o acompanhamento das inovações tecnológicas, de forma a atender à legislação vigente e garantir a implantação de novas tecnologias no sistema interligado brasileiro com segurança e confiabilidade, buscando sempre a modicidade tarifária e a redução do impacto ambiental.

Nesse contexto, um dos objetivos da proposta é elaborar uma metodologia que será desenvolvida durante o projeto para análise técnica dos impactos decorrentes da inserção de geração distribuída (GD) à rede de distribuição da CEB-DIS (tensão, perdas, capacidade máxima necessária para atendimento à demanda do circuito etc). O desenvolvimento dessa metodologia está calcado no uso de dados reais do sistema elétrico da CEB-DIS via *OpenDSS*

(*software* empregado pela Aneel para cálculo de perdas) e em alguns ensaios laboratoriais. Deve-se enfatizar que, embora esta ferramenta seja existente no mercado, o seu emprego neste projeto terá caráter inovador, tendo em vista a representação dos dados reais da distribuidora. Assim, será empregado um banco de dados no formato de arquivos do *software OpenDSS*. Cabe destacar que este aplicativo apresenta um enorme potencial para o desenvolvimento da pesquisa aqui proposta, pois ele permite simulações para longos períodos de tempo, e com isso possibilita a avaliação dinâmica (temporal) dos estados do sistema, considerando os dados reais de grandezas elétricas, meteorológicas e ambientais.

Desse modo, dispondo de dados reais de todo o sistema CEB-DIS, e para o período de simulação igual a um ano completo, serão identificados os efeitos da inserção de painéis fotovoltaicos na UnB, considerando-se nas simulações as variações dos valores da irradiância solar e da temperatura (dados reais medidos em três diferentes pontos da distribuidora durante um ano), e nos valores do consumo das cargas e das curvas de carga (informações fornecidas pela distribuidora). Para este período de um ano, os valores da irradiância, da temperatura, do consumo e da curva de carga são atualizados a cada 2 horas, entre 6 e 20 horas. Isso torna os resultados da simulação mais confiáveis, dado que são empregadas informações reais do sistema CEB-DIS. Até o momento, não há na literatura trabalhos que fazem uso de tal quantidade de informações reais.

Por meio de trabalhos recentemente publicados em relevantes revistas de abrangência mundial, é possível observar que a inserção de painéis fotovoltaicos no sistema elétrico pode provocar variados efeitos nas perdas, na demanda máxima, em parâmetros da qualidade da energia como nas magnitudes das tensões, no fluxo reverso, na proteção. Dentre outros, podem-se citar: Adefarati e Bansal (2016); Cohen e Callaway (2016); Cheng *et al.* (2016); Ebad e Grady (2016); Cohen e Callaway (2016); Nguyen *et al.* (2016); Hung *et al.* (2014); Katiraei e Agüero (2011).

Conforme indicado em Cohen e Callaway (2016), a magnitude destes efeitos pode variar enormemente dependendo sobretudo da topologia do alimentador, do clima, e do nível de penetração da energia solar. Apesar disso, poucos estudos disponíveis na literatura: i) abordam mais do que cinco alimentadores ou ii) mais do que um ponto de medição da irradiância solar nas simulações computacionais (Cheng *et al.*, 2016; Ebad e Grady, 2016; Cohen e Callaway, 2016; Nguyen *et al.*, 2016; Hung *et al.*, 2014; Quezada *et al.*, 2006; Shugar, 1990; Woyte *et al.*, 2006; Thomson e Infield, 2007; Navarro *et al.*, 2013; Widé'n *et al.*, 2010; Aukai *et al.*, 2012; Bucher *et al.*, 2013a; Paatero e Lund, 2007; Hoke *et al.*, 2013).

Dado que, em geral, o sistema de uma distribuidora é altamente heterogêneo em termos de topologia, clima e cargas, caracteriza-se como inapropriada a generalização das conclusões destes estudos (Cohen e Callaway, 2016). Por essa razão, pretende-se trabalhar com dados reais da distribuidora.

Ademais, conforme destacam alguns trabalhos (Cheng *et al.*, 2016; Ebad e Grady, 2016; Paatero e Lund, 2007; Hoke *et al.*, 2013), uma análise detalhada, considerando-se a variação no tempo de alguns parâmetros, além de complexa, envolve uma larga quantidade de dados e consequentemente um grande esforço computacional. Por esta razão, nas simulações executadas nesse estudo, optou-se pela escolha de intervalos de 2 horas. Isso reduz consideravelmente o esforço computacional e o armazenamento de dados e torna possível o estudo dos mencionados impactos, contemplando simultaneamente todos os alimentadores de uma distribuidora (aspecto que também justifica a originalidade deste projeto). Estes trabalhos demonstram que a proposta apresentada refere-se a investigações em âmbito mundial em andamento e ainda não conclusivas.

Em síntese, o uso de dados reais da rede elétrica da CEB-DIS para realização de diversas simulações via aplicativo *OpenDSS* conduz à necessidade de uma criteriosa análise e pesquisa de como utilizar uma grande quantidade de dados, para que eles possam fornecer subsídios sobre os possíveis impactos da GD. Dessa forma, torna-se possível utilizar efetivamente os resultados de simulações para a tomada de decisões técnicas e operativas adequadas.

6.3.2 Especificação e implantação de uma infraestrutura laboratorial que emule uma rede de distribuição de baixa tensão (microrrede)

Esta vertente está de acordo com o que a Aneel espera deste projeto, conforme mencionado no item da Chamada, onde se indica: *"Fomentar a capacitação laboratorial em instituições públicas de ensino e pesquisa"*.

Nesse sentido, foi prevista a aquisição de motores, instrumentos de medição, aplicativos etc, objetivando a expansão do Laboratório de Qualidade da Energia, de modo a incorporar uma rede de distribuição de baixa tensão capaz de representar um cenário real.

Os equipamentos serão instalados no Laboratório de Qualidade da Energia (LQEE) da UnB, formando uma microrrede constituída por um conjunto integrado de painéis fotovoltaicos, uma fonte eólica (equipamento que a UnB já possui) e uma fonte controlada capaz de reproduzir sinais medidos no sistema elétrico.

Esta microrrede será modelada no *OpenDSS*, fazendo-se uso dos modelos hoje existentes nesta ferramenta. Ressaltando mais uma vez que, embora a ferramenta e os modelos estejam sendo utilizados pelas empresas, o emprego proposto a partir dos dados reais da distribuidora e posterior análise dos resultados para decisões no contexto da inserção da GD é inovador. Os resultados das simulações serão comparados àqueles encontrados em testes executados no LQEE. Para tanto, será efetuado o acompanhamento do comportamento das tensões e correntes (via medições) em alguns pontos do arranjo que será montado no laboratório e também via *software*. Os resultados encontrados permitirão avaliar os possíveis impactos da inserção de painéis fotovoltaicos na rede elétrica e, ainda, serão úteis para se validar a metodologia proposta. Ressalta-se que a escolha dos estudos de casos voltados para a estrutura da rede da CEB-DIS, que serão avaliados, é parte das atividades do projeto.

Nesse contexto, serão entregues à CEB-DIS produtos customizados (relatórios contendo os principais aspectos observados na simulação quando da inserção dos painéis fotovoltaicos na UnB), conjuntamente com a capacitação na metodologia que faz uso de dados reais da rede elétrica da distribuidora. Assim sendo, torna-se possível, com base nos resultados previstos, avaliar a necessidade de desenvolvimento de um aplicativo computacional amigável que viabilize a aplicação da referida metodologia em novos cenários de interesse da CEB-DIS. Estes cenários referem-se às diversas alternativas possíveis para a inserção de GD na rede atual da CEB-DIS, considerando a diversidade de tipos de alimentadores e perfil de consumo residencial, comercial, industrial, público etc.

Em resumo, a implantação deste laboratório e o seu uso abrirão uma frente de pesquisa bem interessante e complementar para a quantificação e entendimento dos efeitos decorrentes da inserção de uma GD numa rede de distribuição.

6.3.3 Formação do Centro de Monitoramento Energético

O principal objetivo desta ação foi estabelecer um ponto de convergência entre o projeto prioritário de Eficiência Energética (EE) e projeto estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), de forma que os resultados obtidos no âmbito do projeto de EE pudessem subsidiar ações de P&D e vice-versa. Nesse contexto, vale ressaltar que a proposta de projeto de eficiência energética possui duração de dois anos e contempla, além da tradicional troca de equipamentos e instalação de minigeração fotovoltaica, atividades para garantir a sustentabilidade das ações de racionalização de consumo, no médio e longo prazos, na UnB.

Além destas alternativas, outra frente de trabalho prevista nas propostas contempla o monitoramento energético dos campi da UnB, que ocupam uma extensa área do Distrito Federal. A título de exemplificação, o Campus Darcy Ribeiro da UnB, localizado na Asa Norte, possui uma área total de 400 hectares, nos quais se distribuem cerca de 500 mil metros quadrados de área construída. Assim, de forma a atender a tal objetivo, prevê-se a implantação de cerca de diversos multimedidores nos prédios da UnB. Tais medidores serão instalados nos quadros gerais de baixa tensão de cada prédio e têm por objetivo garantir o monitoramento contínuo e em tempo real do consumo energético e demanda, dentre outras variáveis elétricas (tensão, corrente, potência reativa, fator de potência etc). Isto garantiria, portanto, a observabilidade da rede elétrica interna da instituição, uma vez que, atualmente, não se tem qualquer informação sobre os perfis de consumo da Universidade de Brasília.

A instalação destes medidores nos diversos prédios da UnB é particularmente importante, tendo em vista que atualmente o campus da UnB somente possui um medidor de consumo de energia, e portanto impede qualquer avaliação localizada relativa aos diversos perfis de consumo de energia.

Nesse contexto, se insere a proposta e implantação do Centro de Monitoramento Energético: este sistema se caracteriza pelo desenvolvimento de *software* supervisor, que tem por objetivo centralizar e gerir os dados advindos de tais medidores. O sistema de Gestão Energético levará em consideração premissas estabelecidas nas normas ISO 50001. Esta premissa é essencial para o estabelecimento de políticas duradouras de eficiência energética, uma vez que é viabilizado o conhecimento das características de consumo da instalação e o desenvolvimento de ações pontuais para cada prédio do campus.

Outros desdobramentos advindos da implantação de um Centro de Monitoramento Energético são: caracterização de perfis de consumo de cada edifício; aplicação de metodologia de gestão de consumo individualizada podendo ser validada em outros campi da UnB; melhorias na continuidade do fornecimento de energia na rede interna da UnB, tendo em vista a observabilidade implantada nos campi; definição de metas de redução de consumo e demanda na ponta, por unidade acadêmica.

Esta ação se reveste de originalidade e inovação, uma vez que as redes elétricas internas de instituições públicas de ensino do Brasil, bem como prédios administrativos do Governo Federal, usualmente não contemplam tal tipo de monitoramento. Atualmente, encontram-se disponível no mercado algumas soluções de monitoramento energético voltadas para ambientes industriais, os quais, todavia, possuem características bem diferentes daquelas encontradas em prédios públicos.

Ressalta-se, por fim, que o Centro de Monitoramento Energético abrange a UnB, não se restringindo apenas ao monitoramento do sistema de minigeração implantado no âmbito deste projeto.

Em resumo, a implantação do Centro de Monitoramento é igualmente original em todos os aspectos, não existindo sistemas similares em instituições federais do país. Além do mais, surge a oportunidade para a realização de uma série de pesquisas a partir da oferta de um grande volume de dados que precisará ser coletado, transmitido, tratado, analisado e disponibilizado tanto para a comunidade acadêmica como para o público em geral.

Este Centro assim constituído, além de contribuir para a capacitação técnica acadêmica das áreas em pauta, contribuirá igualmente para vencer os desafios relacionados à implantação da geração distribuída em redes de distribuição. Dentre estes desafios, pode-se citar: levantamento dos impactos (perfil de tensão, carregamento dos transformadores, perdas, ilhamento, correção do fator de potência); desenvolvimento de modelos computacionais para análise integrada da geração distribuída com outras áreas correlatadas como armazenamento de energia, qualidade de energia, redes elétricas inteligentes etc.

6.4 Aplicabilidade

Os resultados do presente projeto terão elevada aplicabilidade, inclusive para as outras 62 instituições públicas de ensino superior brasileiras. Apesar de estas instituições desempenharem importante papel no desenvolvimento científico e tecnológico do país, elas têm recursos limitados para realizar estudos para a identificação e implantação das ações necessárias para a melhoria e eficiência de suas instalações de energia elétrica. Nesse contexto, os resultados deste trabalho se prestarão como referência para a formulação e a implantação de atividades conjuntas e coordenadas em vários órgãos e instituições públicas do Brasil.

Ademais, a utilização da energia de fontes renováveis, em especial na configuração de GD, tem apresentado significativas taxas de crescimento a cada ano, em vários países e no Brasil. Tal configuração difere da operação centralizada do sistema elétrico, a qual historicamente possui um agente operador nacional, que mantém contato com as usinas de geração de energia operadas por pessoal técnico qualificado. Logo, a instalação de minigeração em prédios da UnB também se caracteriza como uma oportunidade de disseminação de conhecimentos e capacitação laboratorial de estudantes de graduação e pós-graduação e servidores.

Posto isso, espera-se que a execução deste projeto forneça subsídios importantes para a intensificação do uso de fontes renováveis em unidades consumidoras da administração pública federal, estadual e municipal.

Ainda é relevante indicar que atualmente (2018) a UnB tem 2.445 professores, 2.630 técnicos administrativos, 28.570 alunos regulares e 6.304 alunos em pós-graduação. Nesse sentido, em uma comunidade acadêmica dessa grandeza, é esperado que os resultados do projeto sejam disseminados por meio das seguintes atividades:

- atividades de ensino: os resultados do projeto podem ser aplicados nas disciplinas de Qualidade da Energia Elétrica, Transmissão e Distribuição, Análise de Sistemas de Energia Elétrica, Sistemas de Energia Solar e Eólica, dentre outras. Tais disciplinas abrangem os cursos de graduação em Engenharia Elétrica, Engenharia de Energia e Engenharia Eletrônica. Ademais, devem-se ressaltar as possibilidades de desenvolvimento de atividades de iniciação científica e trabalhos de conclusão de curso em temas correlatos ao deste projeto;
- atividades de pesquisa e pós-graduação: de forma semelhante, os resultados do projeto têm forte relação com as atividades de pesquisa e desenvolvimento do grupo proponente; e
- publicações em congressos nacionais e internacionais e periódicos: espera-se a publicação de artigos em congressos nacionais e internacionais, a exemplo de: CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica; SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos; SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica; CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, dentre outros.

Os conhecimentos adquiridos no âmbito deste projeto serão assim aplicados pelos professores na formação de futuros engenheiros com capacitação adequada na área de Geração Distribuída, atuando junto às empresas do setor de energia elétrica e em especial na CEB-DIS, na implantação segura e confiável desta modalidade de geração. Esta é uma aplicação relevante, tendo em vista a carência, já identificada, de mão de obra especializada neste segmento. Atualmente (2018) as disciplinas de Qualidade da Energia Elétrica, Transmissão e Distribuição, Análise de Sistemas de Energia Elétrica, Sistemas de Energia Solar e Eólica, as quais possuem carga horária média de 60 horas, e totalizam cerca de 250 alunos por semestre, abordam assuntos relacionados à Geração Distribuída em suas ementas. Os resultados deste projeto, além de permitirem a consolidação das disciplinas já existentes, podem também viabilizar a implantação de novas disciplinas na UnB, tais como: Redes Elétricas Inteligentes (carga de 60 horas), Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica (carga de 60 horas), Eletrônica de Potência em Sistemas Fotovoltaicos (carga de 60 horas), em nível de graduação e pós-graduação.

No que tange ao Centro de Monitoramento Energético: o sistema supervisor a ser desenvolvido no âmbito deste projeto, em consonância com os medidores instalados nos edifícios da UnB, possui potencial para ser amplamente replicado nas redes elétricas internas de outras instituições públicas de ensino do Brasil, bem como ser estendido aos prédios da administração federal. Para tanto, prevê-se a divulgação dos resultados do projeto por meio de brochuras técnicas, descrevendo as experiências da UnB na gestão energética. Tais ações estão em consonância com a Portaria n.º 23/2015, do Ministério do Planejamento, a qual estabelece medidas para monitorar e racionalizar gastos com energia elétrica e água em prédios públicos da administração federal.

6.5 Relevância

As tendências de redução dos custos das fontes renováveis de energia e de regulamentação pela Aneel da GD reforçam os argumentos de que este tema deve sofrer uma forte disseminação nos próximos anos. Isso se concretizará por meio da inserção de mini e microrredes (executada por consumidores), e também pela inserção diretamente nas redes de distribuição de pequenas centrais hidroelétricas, fontes térmicas de biomassa, parques eólicos e solares (efetuada por empreendedores). Nesse sentido, as distribuidoras devem se preparar para analisar os possíveis impactos operacionais na sua rede, principalmente aqueles relacionados aos aspectos de qualidade, proteção, segurança, sobrecargas etc.

Cabe também apontar que este projeto contribuirá, de maneira significativa, para a capacitação das equipes da distribuidora para análise dos pedidos de conexão de GD, e para a expansão de laboratórios da UnB.

Num cenário de implantação de minigeração, um dos fatores de análise dos impactos decorrentes da inserção de GD são as perdas elétricas. Com a implantação de fontes descentralizadas de energia elétrica (geração distribuída), por meio da inserção de módulos fotovoltaicos em residências e edifícios públicos, alguns estudos (Guedes, 2013), (Santos, 2015) indicam a diminuição de perdas técnicas. Um estudo de 2010 (Farashbashi-Astaneh e Dastfan) verificou, via simulação com inserção de GD com tamanho e localização otimizados de um alimentador real (utilizando algoritmos genéticos), uma redução nas perdas da ordem de 63%. Atualmente, este é um tema de P&D em que algumas universidades e empresas distribuidoras vêm investindo.

A relevância científica e tecnológica do projeto está indicada igualmente na formação da infraestrutura laboratorial complementar àquela já existente no Laboratório de Qualidade da Energia, capaz de emular uma rede de distribuição e fontes renováveis de energia, de modo que se possa avaliar os limites da inserção da GD, quantificando os possíveis impactos na operação e na qualidade da energia.

Como anteriormente indicado, neste laboratório será possível montar uma microrrede constituída por um conjunto integrado de painéis fotovoltaicos, uma fonte eólica e uma fonte controlada capaz de reproduzir sinais medidos no sistema elétrico. Esta microrrede será inicialmente modelada para as configurações típicas da rede de distribuição da CEB-DIS, devendo-se entretanto indicar que outros tipos de rede poderão ser igualmente modelados.

De forma inovadora, será possível fazer as devidas comparações entre as duas formas de análise, efetuando o acompanhamento do comportamento das tensões e correntes em alguns pontos do arranjo que será montado no laboratório e também via aplicativo computacional. Os resultados encontrados, além de permitirem indicar os possíveis problemas e identificar as devidas medidas mitigadoras, decorrentes da inserção de painéis fotovoltaicos na rede elétrica, serão igualmente úteis para se examinarem as ferramentas de análise e validarem os modelos e metodologia propostos.

Adicionalmente, com a execução deste projeto a UnB se capacitará com uma infraestrutura laboratorial e computacional, que poderá ser utilizada futuramente para outros projetos similares em parcerias com outras universidades e empresas do setor de energia no Brasil. Permitirá ainda a absorção de conhecimentos, com maior efetividade, dos professores e alunos da UnB a partir de intercâmbio com outras universidades internacionais que já possuem laboratórios equivalentes.

6.6 Razoabilidade dos Custos – Viabilidade Econômica

As implantações dos sistemas de GD devem ser precedidas de uma avaliação técnica e econômica por parte dos consumidores, comparando os custos de instalação e manutenção ao longo da vida útil das instalações/usina, contra as vantagens auferidas na fatura, considerando o sistema tarifário atual e, quando for o caso, algumas políticas de incentivo, a saber: i) *Feed-in tariff* e ii) *Net metering* (Sistema de Compensação de Energia Elétrica – Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012). Por outro lado, as empresas distribuidoras devem analisar os pedidos de conexão e as condições de suportabilidade da rede local. Contudo, se esta conexão não for adequadamente avaliada pela distribuidora, ela pode provocar atuação errônea da proteção, aumento de perdas, sobrecarga, dificuldades de controle de tensão nos alimentadores, e também problemas que afetam a operação desde o ponto de vista da qualidade do produto (distorções harmônicas) até o fornecimento de energia. Estes fatos podem levar à perda de faturamento e pagamento de penalidades decorrentes de interrupção de energia provocada por desligamentos e interrupção de energia.

A valoração destas perdas configura-se como um resultado que pode ser obtido futuramente por meio da adaptação da metodologia proposta neste projeto. Apesar da ausência das quantias vinculadas às perdas de faturamento e dos pagamentos de penalidades, pode-se concluir que o valor a ser investido neste projeto reverte-se em um benefício de economia e de imagem para empresa.

Pode-se igualmente indicar que outros benefícios serão potencialmente auferidos pela distribuidora, futuramente, com o uso desta metodologia, como por exemplo:

- o adequado planejamento da integração da GD na rede de distribuição pode reduzir as perdas técnicas. Estudos mostram que a inserção de 5% de GD leva a uma redução de perdas no alimentador que varia entre 10% e 20%, o que significaria uma grande economia para a distribuidora; e
- além desses ganhos, há aqueles relativos à postergação de investimentos e à melhoria da qualidade (diminuição dos gastos da distribuidora com compensação, devido a baixos níveis de tensão, melhoria do DEC/FEC, caso houvesse um centro de despacho da GD que permitisse utilizar a geração descentralizada para atendimento a certas unidades consumidoras em momentos de blecaute etc).

6.7 Etapas dos Trabalhos

São as seguintes as etapas programadas para a realização do projeto:

Etapa 1 – Estado da Arte

Investigar o referencial bibliográfico atual (teses, dissertações, artigos científicos, livros), no tocante às questões relacionadas à inserção da geração distribuída fotovoltaica (GDFV) em sistemas de distribuição de energia elétrica. Nesta etapa, deverá ser feito levantamento dos impactos da GDFV na rede da distribuidora, considerando dentre outros aspectos: perfil de tensão nos alimentadores, correntes, perdas etc.

Etapa 2 – Base de conhecimento

Com base no Estado da Arte, será formada a árvore do conhecimento com os temas pertinentes ao projeto para a formação de base estruturada.

Etapa 3 – Marcos regulatórios

Analisar os marcos legais e regulatórios e as regras de conexão em âmbito nacional e internacional que versam sobre o assunto. Analisar a documentação vigente, indicando possíveis propostas de melhoria.

Etapa 4 – Estabelecimento dos cenários

Estabelecer cenários envolvendo o ambiente em estudo para a execução da análise dos impactos da inserção de GDFV na rede da CEB-DIS e na rede interna da UnB.

Etapa 5 – Análise de impactos técnicos

Realizar análise de impactos técnicos relacionados à inserção de GDFV no sistema de distribuição da CEB-DIS para os cenários selecionados. Isso será efetuado por meio de simulações e, se necessário, medições no campo. A partir da instalação de geração fotovoltaica num prédio da UnB, serão realizadas simulações simplificadas na rede interna da UnB, considerando possíveis ampliações.

Etapa 6 – Implantação de estrutura laboratorial

Especificar e implantar uma infraestrutura laboratorial na UnB que emule uma rede de distribuição de baixa tensão (microrrede) para a análise de possibilidades de interligação e gerenciamento da geração distribuída. Trata-se da montagem de um ambiente de simulação de redes de distribuição, considerando equipamentos reais como painéis fotovoltaicos, uma bancada eólica etc.

Etapa 7 – Implantação do Centro de Monitoramento

O Centro de Monitoramento receberá informações de diversos medidores eletrônicos de energia a serem instalados em prédios selecionados do Campus da UnB. Estes medidores devem ser especificados, de maneira a fornecer dados que permitam o monitoramento do impacto da GD na rede elétrica. Estas informações serão coletadas, tratadas, analisadas e disponibilizadas a partir de um aplicativo de gestão.

Etapa 8 – Preparação e realização de seminário

Realizar um seminário, visando à divulgação do projeto e à obtenção de subsídios por parte de outros especialistas no assunto.

Etapa 9 – Relatório final

Produzir material bibliográfico para divulgação dos resultados, tais como artigos técnicos para publicação em congressos e periódicos da área. Consolidar os relatórios das etapas anteriores no relatório final que será elaborado em formato de brochura objetivando uma maior divulgação do projeto.

7. PROPOSTA DE PROJETO PRIORITÁRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PRÉDIOS PÚBLICOS DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

7.1 Objetivos

A proposta tem como objetivo principal a implantação de projeto piloto de eficiência energética na Universidade de Brasília. Em consonância com tal meta, os trabalhos contemplados por esta proposta objetivam:

- formar uma equipe de pesquisadores multidisciplinar, agregando conhecimentos das áreas de eficiência energética, fontes renováveis, qualidade da energia e tecnologia da informação;
- criar e instalar uma Comissão Interna de Conservação de Energia (CICE) na UnB, com o objetivo primordial de estabelecer uma metodologia de gestão de energia elétrica nesta instituição pública, a partir do estabelecimento de indicadores e metas de redução dos desperdícios e, subsequentemente, processos para realizar a revisão periódica destas metas;
- realizar diagnóstico energético das instalações da UnB, considerando-se um estudo dos benefícios financeiros, medição e verificação dos resultados, de acordo com a regulamentação vigente;
- realizar estudos de substituição e descarte dos equipamentos ineficientes;
- instalar medidores eletrônicos de energia em prédios da UnB. Tal medida permitirá implementar a estratégia mais básica de gestão energética: medir, tratar estatisticamente e divulgar o consumo das unidades acadêmicas (por aluno e por curso). Os resultados advindos desta ação subsidiarão, em um primeiro momento, a realização de campanhas de sensibilização e mudanças de hábitos, no que tange à redução do consumo de energia. Além do mais, estes dados também permitirão uma análise comparativa da eficácia das ações de eficiência energética (troca de equipamentos e instalação de minigeração) em prédios da UnB; levantar as curvas de carga de cada local monitorado, tendo em vista a obtenção de comportamentos de consumo típicos. Tais dados serão base para a Comissão Interna de Conservação de Energia reconhecer comportamentos diferentes do esperado e apontar correlações entre diferentes variáveis, tais como: i) consumo e temperatura ambiente, ii) o consumo e aulas etc. Além disso, serão obtidos *Benchmark* para cursos de exatas, humanas e biológicas, o que pode viabilizar comparações dos resultados aqui alcançados com os de outras instituições de ensino superior do país;
- efetuar a inserção de disciplinas voltadas à eficiência energética na grade curricular dos cursos de graduação e pós-graduação da UnB, incentivando a plena participação da comunidade universitária nas ações do projeto. As atividades serão realizadas por professores e pesquisadores, e também por alunos de graduação e pós-graduação, os quais poderão absorver a cultura do uso eficiente de energia em sua formação. As atividades contemplarão a realização de diagnósticos energéticos e análise de dados dos medidores de energia, por meio de acesso aos centros de monitoramento. Com isso, eles poderão, na prática, identificar os consumos dos diversos prédios e fazer visitas *in loco* para identificar possíveis oportunidades de eficiência. Como parte das ativida-

des acadêmicas, os alunos poderão propor campanhas de sensibilização e mudança de hábitos, quantificar o percentual real de eficiência, validar as ações de eficiência, proferir palestras e minicursos para a comunidade acadêmica e população em geral;

- especificar e implantar 150 kWp de minigeração fotovoltaica de energia elétrica. Esse sistema, além de promover a redução na conta de energia elétrica, possibilitará pesquisas de impactos da Geração Distribuída (GD) na rede;
- realizar um seminário, visando à divulgação do projeto e à obtenção de subsídios por parte de outros especialistas no assunto;
- publicar artigos técnicos-científicos em congressos e periódicos da área; e
- elaborar um documento que detalhe a experiência promovida pelo projeto, visando replicar ações voltadas à eficiência energética em outros prédios públicos.

Posto isso, espera-se que a execução deste projeto forneça subsídios importantes para a formulação de políticas públicas de combate ao desperdício de energia em prédios da administração pública federal, estadual e municipal.

7.2 Abrangência da Proposta

As ações de eficiência energética prevista na proposta abrangem as instalações da Universidade de Brasília. As atividades que compõem o escopo se dividem nas seguintes frentes de trabalho:

- troca de equipamentos: tendo em vista a implantação do projeto piloto, a presente proposta prevê a troca de equipamentos de iluminação e aparelhos de climatização de baixa eficiência energética, existentes nas instalações da Faculdade de Tecnologia (FT) da UnB e no laboratório SG-11. As ações de trocas de equipamentos serão destinadas apenas a estas edificações de prédios, devido ao bom estado de suas instalações elétricas e limitação dos recursos;
- instalação de minigeração: de maneira semelhante, a presente proposta prevê a instalação de um sistema de geração solar fotovoltaica de 150 kWp nos prédios da Faculdade de Tecnologia da UnB e laboratório SG-11;
- monitoramento energético: as ações associadas a esta frente de trabalho serão executadas no âmbito de toda a Universidade. Para tanto, conforme informado anteriormente, esta proposta contempla a aquisição de medidores de energia, os quais viabilizam o monitoramento, em tempo real, de demanda e consumo de diversos prédios da Universidade;
- gestão energética, ações de *marketing* e campanhas de sensibilização: baseado nas informações advindas do sistema de monitoramento, as ações de gestão energética e redução de desperdício serão planejadas pela Comissão Interna de Conservação de Energia e terão, como público-alvo, toda a comunidade acadêmica; realização de trabalhos de Medição & Verificação, conforme os requisitos estabelecidos nos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética da Aneel e no Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance (PIMVP). Estes trabalhos serão realizados pela própria equipe proponente;

- descarte e manufatura reversa dos equipamentos que foram substituídos por empresas devidamente autorizadas pelas autoridades ambientais competentes. A equipe proponente apenas acompanhará o andamento destas atividades; e
- avaliação do prédio, ao final dos trabalhos de efficientização, quanto ao programa de etiquetagem Procel.

7.3 Etapas dos Trabalhos

São as seguintes as etapas programadas para a realização do projeto:

Etapas 1

Diagnóstico energético dos prédios FT e SG-11.

Etapas 2

Criação e instalação da Comissão Interna de Conservação de Energia (CICE).

Etapas 3

Especificação, compra e instalação de medidores de energia nos prédios da UnB.

Etapas 4

Especificação, compra e instalação de equipamentos de iluminação e climatização para os prédios da FT e SG-11.

Etapas 5

Descarte de equipamentos de baixa eficiência.

Etapas 6

Especificação, compra e instalação de sistema de geração solar fotovoltaica de 150 kWp.

Etapas 7

Medição e verificação de performance, segundo PIMVP.

Etapas 8

Realização de campanha de sensibilização e mudanças de hábitos da comunidade acadêmica.

Etapas 9

Implementação e testes de sistema de gestão e monitoramento energético.

Etapas 10

Avaliação dos prédios FT e SG-11 no EnergyPlus.

Etapa 11

Construção de curvas de consumo dos prédios monitorados.

Etapa 12

Avaliação dos prédios da FT e SG-11 quanto ao programa de etiquetagem PROCEL.

Etapa 13

Estruturação de disciplinas voltadas à Eficiência Energética em cursos de graduação da UnB.

Etapa 14

Realização de seminário e divulgação dos resultados do projeto.

Etapa 15

Relatório final.

8. CRONOLOGIA DOS EVENTOS DA CHAMADA

Apresenta-se a seguir a cronologia dos eventos decorrentes da Chamada da Aneel em pauta.

- Em outubro de 2016, a Aneel tornou pública a Chamada n.º 001/2016 do Projeto Prioritário de EE e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior.
- Em 20 de abril de 2017, para atendimento a essa Chamada, a CEB-DIS, como empresa proponente, e a Universidade de Brasília (UnB), mediante a Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec), como executora, apresentaram as seguintes propostas: Projeto Estratégico de P&D-Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília, Integrada à Rede de Distribuição da CEB-DIS, e Projeto Prioritário de Eficiência Energética em Prédios Públicos da Universidade de Brasília.
- Em 20 de junho de 2017, a Aneel, pelo Despacho n.º 1.758, decide aprovar sem restrições 11 propostas, aprovar com recomendações 11 outras propostas e reprovar 5 propostas. Dentre as propostas reprovadas, encontrava-se a apresentada pela CEB-DIS e Universidade de Brasília.
- Em 27 de junho de 2017, a CEB-DIS encaminhou à Aneel pedido de reconsideração sobre a reprovação da proposta com a apresentação das devidas justificativas.
- Em 12 de dezembro de 2017, a Aneel, pelo Despacho n.º 4.194, dá provimento ao pedido no sentido de aprovar a proposta.
- Em 02 de julho de 2018, A Universidade de Brasília assina os Termos de Cooperação Técnica n.º 501/2018 e n.º 502/2018 e dá início ao projeto.

Os capítulos a seguir relatam o desenvolvimento das atividades do projeto de Eficiência Energética (EE) e de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

9. REFERÊNCIAS

- [1] ADEFARATI, T.; BANSAL, R. C. *Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. IET Renewable Power Generation*, 10 (7), pp. 873-884, 2016.
- [2] AUKAI, T.; BARKER, C.; DAVIS, R.; HEILSCHER, G.; NAKAFUJI, D.; STEWART, E. *Variability of the solar resource and grid operation impacts. In: Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 4598-4603, 2012.
- [3] BUCHER, C.; ANDERSSON, G.; KUNG, L. 2013a. *Increasing the PV hosting capacity of distribution power grids - a comparison of seven methods. In: 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC)*, Paris, pp. 4231-4235, 2013.
- [4] BUCHER, C.; BETCKE, J.; ANDERSSON, G. *Effects of variation of temporal resolution on domestic power and solar irradiance measurements. PowerTech (POWERTECH)*, 2013 IEEE Grenoble. IEEE, pp. 1-6, 2013b.
- [5] CHENG, D.; MATHER, B.A. *Photovoltaic (PV) impact assessment for very high penetration levels. IEEE Journal of Photovoltaics* 6 (1), pp. 295-300, 2016.
- [6] COHEN, M.A.; CALLAWAY, D.S. *Modeling the effect of geographically diverse PV generation on California's distribution system. 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. IEEE, pp. 702-707, 2013.
- [7] COHEN, M.A.; CALLAWAY, D.S. *Effects of distributed PV generation on California's distribution system, Part 1: Engineering simulations. Sol. Energy* 128, pp. 126-138, 2016.
- [8] COHEN, M.A.; KAUZMANN, P.A.; CALLAWAY, D.S. *Effects of distributed PV generation on California's distribution system, Part 2: Economic analysis. Sol. Energy* 128, pp. 139-152, 2016.
- [9] EBAD, M.; GRADY, W.M. *An approach for assessing high-penetration PV impact on distribution feeders. Electric Power Syst. Res.* 133, pp. 347-354, 2016.
- [10] HOKE, A.; BUTLER, R.; HAMBRICK, J.; KROPOSKI, B. *Steady-state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders. IEEE Trans. Sust. Energy* 4 (2), pp. 350-357, 2013.
- [11] HUNG, D.Q.; MITHULANANTHAN, N.; LEE, K.Y. *Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models. IEEE Trans. Power Syst.* 29 (6), pp. 3048-3057, 2014.
- [12] KATIRAEI, F.; AGUERO, J.R. *Solar PV integration challenges. Power Energy Mag., IEEE* 9 (3), pp. 62-71. 2011.
- [13] NAVARRO, A.; OCHOA, L.F.; RANGLES, D. *Monte carlo-based assessment of PV impacts on real UK low voltage networks. Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE. IEEE*, pp. 1-5, 2013.
- [14] NGUYEN, D.; VALEY, M.; SCHOENE, J.; ZHEGLOV, V.; KURTZ, B.; MURRAY, K.; TORRE, B.; KLEISSL, J. *High PV penetration impacts on five local distribution networks using high resolution solar resource assessment with sky imager and quasi-steady state distribution system simulation. Sol. Energy* 132, pp. 221-235, 2016.
- [15] PAATERO, J.V.; LUND, P.D. *Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. Renew. Energy* 32 (2), pp. 216-234, 2007.
- [16] QUEZADA, V.M.; ABBAD, J.R.; ROMAN, T.G.S. *Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation. IEEE Trans. Power Syst.* 21 (2), pp. 533-540, 2006.
- [17] SHUGAR, D.S. *Photovoltaics in the utility distribution system: the evaluation of system and distributed benefits. Photovoltaic Specialists Conference, 1990, Conference Record of the Twenty First IEEE. IEEE*, pp. 836-843, 1990.
- [18] THOMSON, M.; INFIELD, D. *Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems. Renew. Power Gener, IET* 1 (1), pp. 33-40, 2007.
- [19] WIDÉN, J.; WACKELGARD, E.; PAATERO, J.; LUND, P. *Impacts of distributed photovoltaics on network voltages: stochastic simulations of three swedish low-voltage distribution grids. Electric Power Syst. Res.* 80 (12), pp. 1562-1571, 2010.
- [20] WOYTE, A.; VAN THONG, V.; BELMANS, R.; NIJS, J. *Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems. IEEE Trans. Energy Convers.* 21 (1), pp. 202-209, 2006.

CAPÍTULO 2

Experiências na Execução de Ações de Eficiência Energética na Universidade de Brasília (UnB)

Loana Nunes Velasco

Alex Reis

Cláudia Naves David Amorim

Francisco Assis Lima

Ayana Dantas de Medeiros

João Pedro Alemonge Honorato



OBJETIVO

Descrever as experiências associadas à substituição dos equipamentos de iluminação artificial e condicionamento de ar para fins de eficiência energética.

Apresentar mecanismos para elaboração de estudos de eficiência energética em sistema de iluminação e climatização.

1. INTRODUÇÃO

No decorrer da história, a humanidade vem utilizando os recursos energéticos naturais para aumentar sua produtividade, qualidade de vida e desenvolver suas civilizações. Dentre estes recursos, a eletricidade assumiu grande importância nos últimos séculos, culminando em um consumo de cerca de 25,5 mil TWh de energia em 2017, o que representa um aumento de 2,8% em relação ao ano anterior e ficando acima da média dos últimos dez anos (British Petroleum, 2018). O crescente aumento na demanda de energia elétrica traz a necessidade de investimentos na geração de energia e no desenvolvimento de novas fontes energéticas. Contudo, esta não é a única solução para atender ao crescimento da demanda. Estudos realizados pela Associação Brasileira de Empresas de Serviço de Conservação de Energia (ABESCO) apontam que é cerca de quatro vezes mais barato economizar 1 MWh do que gerar 1 MWh (ABESCO, 2017).

Nesse contexto, a eficiência energética se apresenta como uma alternativa com grande potencial para reduzir a demanda de energia. Ela é definida como a capacidade de realizar um mesmo processo ou serviço, sem alterações em seus resultados finais, com o uso de uma menor quantidade de energia. As Ações de Eficiência Energética (AEE) englobam um vasto conjunto de medidas, as quais dependem do uso final da energia e podem abranger, por exemplo, *retrofitting* de instalações, uso de equipamentos com menores perdas de energia, sistemas de monitoramento energético, programas de etiquetagem de edificações e campanhas de sensibilização de usuários (US National Policy Development Group, 2001).

Nesse cenário, encontra-se o Projeto Prioritário de Eficiência Energética (PEE) inserido na Chamada Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) n.º 001/2016 – Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Dentre os diversos objetivos existentes nesta Chamada, destaca-se:

“Os projetos realizados no âmbito desta Chamada possibilitarão a troca de equipamentos energeticamente ineficientes por outros mais eficientes, incentivarão a mudança de hábito de consumo de professores, alunos e funcionários das instituições de educação, a implantação de minigeração de energia elétrica nas Instituições Públicas de Educação Superior, a redução nas contas de energia elétrica dessas instituições, assim como uma nova forma de gestão energética, por meio de ações de pesquisa, desenvolvimento e inovação, entre outras ações de capacitação profissional. Destaca-se ainda que criar uma cultura de Eficiência Energética na formação de futuros profissionais é de grande relevância para a sociedade como um todo.”

Tendo em vista tais objetivos, as AEEs contempladas no PEE estão no âmbito dos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE), publicados pela Aneel, e consistem em:

- *retrofitting* do sistema de iluminação;
- *retrofitting* do sistema de condicionamento de ar; e
- instalação de um sistema de geração de energia a partir de fontes incentivadas.

Embora as AEEs anteriores sejam comuns em diversos projetos de engenharia, as experiências obtidas na execução do PEE na UnB indicam a necessidade de realização de um planejamento de atividades. Nesse contexto, o primeiro passo para implementação de qualquer projeto de eficiência energética consiste no entendimento do sistema com o qual se está trabalhando, permitindo a identificação das ações que otimizem sua operação e reduzam o gasto de energia. A falta de estudos prévios acerca das AEEs pode implicar resultados finais que não atendam às expectativas dos *stakeholders*, ou seja, não se obtêm as reduções de consumo de energia previstas no projeto ou tem uma alta relação custo-benefício (ANEEL, 2018) ou, ainda, tem-se uma alteração nas características de processo ou qualidade de vida do usuário.

Tal situação pode ser agravada em prédios públicos, tendo em vista os longos ciclos de vida destas edificações e, em alguns casos, uma falta de planejamento coordenado das ações de projeto, operação e manutenção.

A Universidade de Brasília é uma instituição que conta com uma história de 58 anos, em que suas edificações passam por constantes mudanças, as quais envolvem sistemas de iluminação, climatização, dentre outras. Em função das características de suas atividades de ensino, pesquisa e extensão, a falta de estudos coordenados de AEE, as quais podem se caracterizar pela simples troca do sistema de iluminação, considerando apenas características básicas como a tecnologia e potência das lâmpadas, mas sem a realização de estudos luminotécnicos adequados, poderia causar um desconforto aos seus usuários. Uma análise semelhante pode ser realizada para sistema de climatização: a simples troca de aparelhos antigos por outros mais eficientes, sem levar em consideração a carga térmica do ambiente, tipo de atividades desenvolvidas no local, envoltória do edifício, dentre outras características, poderia contribuir para um resultado insatisfatório, tanto em relação ao conforto térmico como ao consumo energético.

À luz dos fatos anteriores, este capítulo tem o intuito de apresentar as experiências na execução de AEE associadas à substituição dos equipamentos de iluminação artificial e condicionamento de ar na Universidade de Brasília, no âmbito do Projeto Prioritário de Eficiência Energética. Apresentam-se conceitos e estudos que devem ser aplicados nesse tipo de projeto, de forma a se obterem os desempenhos definidos em etapas de planejamento. Este documento é composto das seguintes seções:

- as seções 2 e 3 apresentam a fundamentação teórica referente aos sistemas de iluminação e condicionamento ambiental;
- a seção 4 apresenta a metodologia e resultados de ações de eficiência energética em instalações da Universidade de Brasília; e
- a seção 5 apresenta as considerações finais sobre os assuntos abordados no capítulo.

2. SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais e tecnologias tem possibilitado a obtenção de sistemas de iluminação com maior nível de eficiência, de forma a se fornecer um mesmo fluxo luminoso com um menor consumo energético. Esta seção apresenta conceitos gerais relacionados a sistemas de iluminação e estudos luminotécnicos.

2.1 Luz

Fisicamente, “luz” se caracteriza como uma quantidade de energia disposta em ondas eletromagnéticas e/ou partículas e, dentre diversas possibilidades, tem a capacidade de excitar o sistema humano olho-cérebro e produzir uma sensação visual. Ao se avaliar luz sob a ótica de ondas eletromagnéticas, a Figura 1 mostra os diversos comprimentos de onda do espectro.

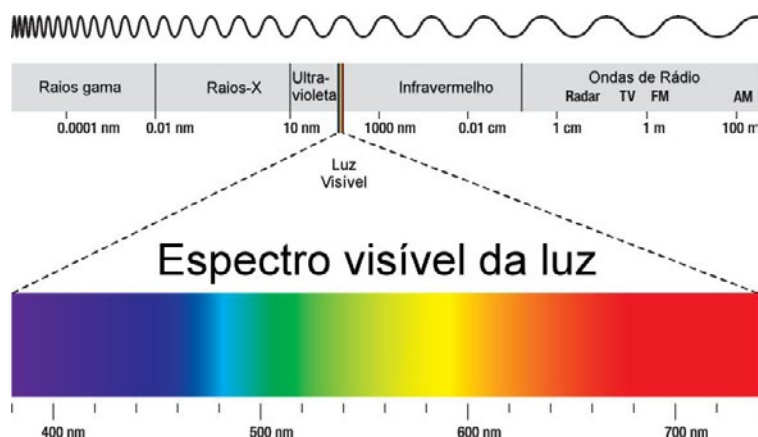


Figura 1. Espectro eletromagnético. Fonte: Tregenza e Loe (2015)

A porção do espectro cuja radiação pode ser captada pela visão humana pode ser chamada de “luz visível”. A radiação visível situa-se no espectro entre 380 nm a 780 nm. O sistema olho-cérebro não só percebe a radiação dentro desta faixa, mas também é capaz de discriminar diferentes comprimentos de onda para produzir a sensação de cor. Para cada frequência da luz visível é associada uma cor.

A sensibilidade visual do ser humano varia tanto de acordo com o comprimento de onda da radiação, quanto da obtenção e sensação de luminosidade. A curva de sensibilidade do olho humano demonstra que radiações de menor comprimento de onda (violeta e azul) geram maior intensidade de sensação luminosa quando há pouca luz (como por exemplo a luz do crepúsculo e da noite), enquanto as radiações de maior comprimento de onda (laranja e vermelho) se comportam ao contrário.

2.2 Grandezas Luminotécnicas

A energia luminosa e o efeito que ela é capaz de produzir englobam uma série de propriedades físicas que nos permitem caracterizá-la. Essas grandezas mensuráveis nos orientam na introdução de estudos luminotécnicos e alguns textos fundamentais sobre luminotécnica, como Tregenza e Loe (2015), nos auxiliam em seu entendimento. São elas:

- **Fluxo Luminoso** – radiação total emitida, em todas as direções, por uma fonte luminosa e que produz um estímulo visual. A radiação eletromagnética possui comprimento de onda compreendido entre 380 a 780 nm e sua unidade é o lúmen (lm);
- **Intensidade Luminosa** – concentração de luz irradiada por segundo em uma dada direção específica. Sua unidade é medida em candela (cd);
- **Iluminância (E)** – quantidade de luz incidente em uma quantidade de área de superfície, medida em lux. Pode ser medida por meio de um aparelho chamado luxímetro ou por meio de métodos de simulação computacional;
- **Luminância (L)** – sensação de luminosidade decorrente da reflexão dos raios por uma superfície, medida em candelas por metro quadrado (cd/m^2). Pode ser medida por um aparelho denominado fotômetro;
- **Eficiência Luminosa** – razão entre o fluxo luminoso e a energia consumida pela fonte luminosa. É a grandeza que permite entender o quanto uma fonte de luz é mais eficiente e econômica que outra;
- **Uniformidade** – relação entre a luminância mínima e média obtida em um ambiente. A uniformidade é importante para o conforto visual e a manutenção da salubridade nos espaços, sendo que uma falta de uniformidade pode causar fadiga visual. As variáveis a ser consideradas nesta análise são: o tipo e adaptação da luminária, a geometria do sistema e a iluminação de superfícies próximas;
- **Temperatura de Cor** – aparência de cor da luz emitida pela fonte de luz. Quanto maior a temperatura de cor, mais branca/clara é sua tonalidade. Fontes luminosas com tonalidade de cor mais suaves (cores quentes, amareladas) geram maior sensação aconchegante e de relaxamento; luzes mais claras (tons brancos e azulados) tendem a produzir sensações de estímulos. A temperatura de cor é medida em Kelvin (K); e
- **Índice de Reprodução de Cor (IRC)** – escala utilizada para medir a fidelidade com que uma fonte luminosa reproduz a luz emitida pelo sol. Para tanto, define-se uma escala de 0 a 100, sendo que o índice 100 indica uma fonte de luz com maior fidelidade àquela emitida pelo sol. Em termos práticos, quanto mais próximo desse índice, melhor é a condição de iluminação de uma fonte de luz no que se trata de reproduzir a cor real.

Sobre as grandezas luminotécnicas, a Figura 2 apresenta um resumo gráfico.

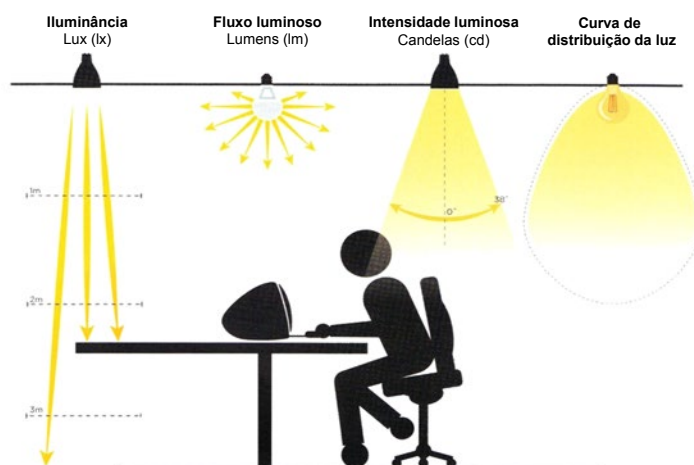


Figura 2. Grandezas luminotécnicas: lux, lumens, candelas e curva de distribuição. Fonte: Osram

2.3 O Comportamento Luminoso

Ao se considerar um projeto luminotécnico, é importante compreender alguns aspectos relacionados ao comportamento da fonte luminosa em um ambiente. Tregenza e Loe (2015) também auxiliam nesse entendimento, ao definir que:

- **Contraste** – é a diferença de brilho entre a iluminância que incide sobre um objeto (ou superfície) e a iluminância do entorno. Quanto maior o contraste, maior o destaque. A escala padrão para garantir uma iluminação pontual é de 5:1, isto é, a iluminância de um ponto é cinco vezes maior que a luminância de seu entorno direto. Contudo, é preciso estar atento para não exceder essa escala e produzir ofuscamento;
- **Ofuscamento** – prejuízo na função visual causado pela presença de uma fonte luminosa de alta emissão localizada no campo de visão. Ele pode ser um ofuscamento direto (visualização direta da fonte luminosa) ou um ofuscamento indireto (refletido através de superfícies refletoras ou brilhantes);
- **Reflexão** – fração da luz que é refletida quando incide sobre uma superfície. A reflexão pode ser especular e gerar a reprodução praticamente perfeita de uma imagem (como em um espelho) ou cruzada, quando a luz é uma série infinita de reflexos entre as superfícies e há geração de uma iluminação de forma difusa;
- **Refração** – desvio de feixe de luz com penetração do raio luminoso para o outro lado da superfície refratada. Ao passar de um meio para o outro, a direção dos raios luminosos refletidos sofre modificações;
- **Absorção** – fenômeno que se dá quando uma parte considerável do raio luminoso que incide sobre uma superfície é absorvido, em maior ou menor grau, dependendo das características do material de incidência; e
- **Transmissão** – fração da luz incidente em uma superfície que é transmitida através de um material. Característica dos corpos transparentes ou translúcidos que permitem que a luz atravesse de um meio para o outro.

As características de reflexão, absorção e transmissão são inerentes aos materiais. Sua composição, cor e textura é o que garantem um padrão de comportamento já verificado e catalogado por pesquisas consolidadas. A Tabela 1 exemplifica esta situação.

Tabela 1. Refletâncias obtidas para amostras de cores. Fonte: Castro *et al.* (2003)

Látex	Cor	Refletância (%)			
		Ultravioleta	Visível	Infravermelho	Total
Acrílico	Alecrim	6	36	35	34
	Areia	8	59	57	55
	Branco	8	88	76	75
	Gelo	8	69	59	59
	Mel	7	51	68	63
	Marfim	8	71	76	73
	Palha	8	70	66	64
	Pêssego	8	63	67	64
	Vanilla	8	68	74	71
	Flamingo	7	51	65	60
	Telha	6	25	45	40
	Azul Bali	6	41	75	66
PVA	Preto	4	4	4	4
	Vermelho Cardinal	5	30	68	59
	Azul Profundo	6	19	41	36

O comportamento luminoso pode ser, ainda, representado por meio de ferramentas gráficas, as quais permitem a caracterização da sua disposição em um determinado ambiente. Por meio de curvas de distribuição espacial, é possível verificar o modo como operam no espaço. Esses desenhos podem ser:

- **Curvas Isolux** – projeção, em plano horizontal, dos pontos de igual iluminamento em relação à posição da fonte luminosa. A curva isolux é capaz de simular a distribuição da iluminância em um ambiente; e
- **Curva Fotométrica** – representação, em um plano vertical, da distribuição de luz emitida por uma fonte. Permite o estudo e a comparação entre lâmpadas, assim como o resultado obtido com o emprego de diversos tipos de refletores.

2.4 Fontes de Luz

A. Fontes de luz natural

Principal fonte de luz natural na Terra, o sol é emissor de luz e calor. Para se ter uma ideia da potência de sua geração luminosa, em um dia de sol pleno uma superfície horizontal ao ar livre (não encoberta) é capaz de receber mais de 100.000 lux de iluminância. Em um dia nublado, esse nível pode cair para 5.000 a 10.000 lux.

O aproveitamento da luz natural é essencial para garantir projetos adequados, com relação à salubridade, redução de consumo energético e bem-estar das pessoas. Galasius e Reinhart (2008) afirmam que a iluminação natural é um atributo de projeto desejado em praticamente toda a arquitetura. Dado que a interação entre luz natural e forma é uma contribuição chave para a experiência arquitetônica de um espaço, é improvável, explicitamente, desconsiderá-la, desde que seja uma intenção projetual.

Vale destacar que, apesar de ser o principal emissor de luz diurna, o sol não é o único transmissor luminoso. A abóbada celeste também é responsável pela distribuição da luminosidade solar. Isso ocorre devido aos fenômenos de reflexão e refração supracitados, no contato da luz solar com a matéria orgânica presente na atmosfera (os mares, os rios e o solo na superfície terrestre e as nuvens e vapor d'água presente no espaço não terrestre).

Por fim, provocado por circunstâncias naturais, o fogo permitiu ao homem autonomia e controle sob a iluminação de espaços na antiguidade, sendo esse fato decisivo para introduzir a prática da iluminação artificial na vida humana. Trata-se de uma fonte luminosa oriunda de circunstâncias naturais, mas que, com o passar do tempo, foi amplamente utilizada na história das civilizações por meio de artifícios produzidos pelo homem. Talvez a melhor forma de compreendê-lo seja como uma fonte de luz natural munida de equipamento artificial para conservação da energia luminosa. Alguns exemplos desses artifícios são velas, lâmpadas à base de matéria orgânica, castiçais, candelabros e lamparinas.

B. Fontes de luz artificial

A lâmpada incandescente é o resultado do aquecimento de um filamento até sua incandescência, que ocorre devido ao efeito de passagem de uma corrente elétrica por ele. Ao longo dos anos, o filamento evoluiu do carbono, passando para filamento metálico de ósmio, chegando ao tungstênio. O filamento é sustentado por dois arames que o conectam à eletricidade. As principais características desse tipo de lâmpada são: baixo custo inicial; curta vida útil (máximo 2.000 horas); baixa eficiência luminosa; boa/ótima reprodução de cor; temperaturas de cor variantes entre 2.700K - 3.000K (luz geralmente amarelada); equipamentos sem necessidade de controle elétrico. Em 2014 o governo brasileiro instaurou políticas públicas que visam à retirada desse tipo de lâmpada de circulação, com o fim da fabricação e importação desse modelo. A regra vale para importação e comercialização das lâmpadas incandescentes de uso geral em território brasileiro e pretende elevar o comércio de modelos mais eficientes. O que ainda está remanescente no mercado são, basicamente, alguns modelos com fins decorativos.

Já em relação às lâmpadas halógenas, de quartzo e halógenas de tungstênio, esse é um tipo de lâmpada incandescente mais avançada. Possui um filamento semelhante ao incandescente padrão, contendo um gás halogênio interno. Tem um tamanho compacto e uma saída elevada de lúmen. São comumente conhecidas pelos tipos de: dicróica, PAR e AR. São ideais para destacar objetos e provocar efeitos decorativos. Quanto mais fechado for o ângulo de incidência, maior o grau de destaque ao objeto.

Lâmpadas de descarga, por sua vez, são equipamentos tubulares que contêm algum tipo de gás, tal como mercúrio. Nas extremidades do tubo existem eletrodos e, em alguns modelos, eles são aquecidos. Com a aplicação de uma alta voltagem entre esses eletrodos, ocorre a descarga, que ioniza o gás e reduz sua resistência. A corrente aumenta e há ainda mais ionização e maior corrente elétrica. As principais características das lâmpadas de descarga são: durabilidade

de moderada; boa eficiência luminosa; reprodução de cor de razoável a boa; temperatura de cor variável; equipamentos com controle elétrico necessário. Esse tipo de lâmpada é comumente utilizado em modelos tradicionais de iluminação pública, iluminação de grandes vãos, áreas externas e espaços que necessitam de um alto grau de iluminamento, como estádios.

Amplamente utilizadas, lâmpadas fluorescentes são modelos de descarga que utilizam o princípio da descarga elétrica através de um gás para produzir luz. Consiste basicamente de um bulbo cilíndrico de vidro contendo em seu interior vapor de mercúrio ou argônio à baixa pressão. A iluminação das lâmpadas fluorescentes apresenta, entre outras coisas, um consumo energético menor que as incandescentes, controle de ofuscamento por não gerar brilho em excesso na superfície incidente e emissão de menos calor. Geralmente, essas lâmpadas precisam de dois equipamentos para seu funcionamento: *starter* e reator. Isso gera um excedente de gasto energético quando comparado aos LEDs e provoca serviços de manutenção mais dispendiosos, apesar de desenvolver uma performance consideravelmente melhor que os equipamentos incandescentes. No mercado, é possível encontrar modelos compactos ou tubulares. A relevância do formato está diretamente relacionada com a proposta de equipamentos de iluminação do qual você vai dispor para realizar seu projeto (tipo de instalação, luminária e equipamentos auxiliares, por exemplo).

Já os LEDs (*Light Emitting Diode*) são emissores de luz que utilizam um diodo para produzir a energia luminosa e, ao contrário do tipo padrão de lâmpadas até então produzidas, não se utilizam de um filamento para geração luminosa. Amplamente difundido no início do século XXI, o LED é objeto de pesquisa constante e intensa na competitiva indústria da iluminação. Tecnologia criada com o intuito de monitorar o acionamento de dispositivos eletrônicos (como televisores), não foi inicialmente pensado para iluminação de ambientes, mas é hoje, sem sombra de dúvida, um líder no mercado de fontes de luz. Seu custo, sua eficiência luminosa e durabilidade estão em constante aprimoramento e suas características de funcionamento sempre melhorando, de modo que os catálogos dos fabricantes devem ser consultados com frequência.

Algumas das principais características dos LEDs são: custo inicial mais alto que lâmpadas convencionais; boa eficiência luminosa; altíssima durabilidade; IRC moderado; variedade de temperatura de cor; rápido acendimento. O LED precisa ser motivo de monitoramento constante do projetista de iluminação. Com frequência, novos modelos são lançados e é comum que o mercado vá se adaptando à tecnologia.

Para facilitar sua introdução e utilização nos sistemas já existentes, muitas lâmpadas LED possuem a mesma estrutura de sustentação semelhante às antes instaladas. Por exemplo, os modelos LED de lâmpadas que visam substituir as fluorescentes compactas e tubulares possuem, geralmente, o mesmo mecanismo de encaixe (bocal), sendo que, nas luminárias que antes recebiam o modelo fluorescente, hoje se aplica à lâmpada LED aproveitando a estrutura, mas retirando o aparelho reator.

Originado dos LEDs, os OLEDs consomem ainda menos energia, são mais leves, finos, oferecem ângulos de visão maiores com melhor brilho e contraste, além de reproduzirem cores mais naturais. Seu princípio de funcionamento é baseado, entre outros, em materiais feitos de carbono que, ao serem estimulados por um campo eletromagnético, emitem as luzes azul, verde e vermelho (fundamentos da tecnologia LED). A fita OLED tem como principal característica a aptidão para o *design*. Superfina, resistente e coberta por uma superfície de plástico, é bastante flexível. Essa flexibilidade oferece muitas oportunidades criativas, tanto para utilização em luminárias como também para outras aplicações.

2.5 Conforto Luminoso

A iluminação é atributo importante dos espaços internos e um dos aspectos essenciais ligados ao conforto do usuário, que se reflete em questões de saúde e produtividade em espaços de trabalho e aprendizagem. Muitos são os fatores que influenciam na qualidade da iluminação, com os quais se deve lidar ao elaborar um projeto luminotécnico, tendo como objetivo também a eficiência energética.

No entendimento da *Illuminating Engineering Society* (IESNA), a qualidade da iluminação define-se na confluência de três dimensões: atendimento das necessidades humanas, aspectos econômicos e elementos de arquitetura. Nesse sentido, a visibilidade é uma parte essencial da iluminação, contudo não é o único propósito do ambiente luminoso. A Figura 3 apresenta este conceito de qualidade da iluminação.

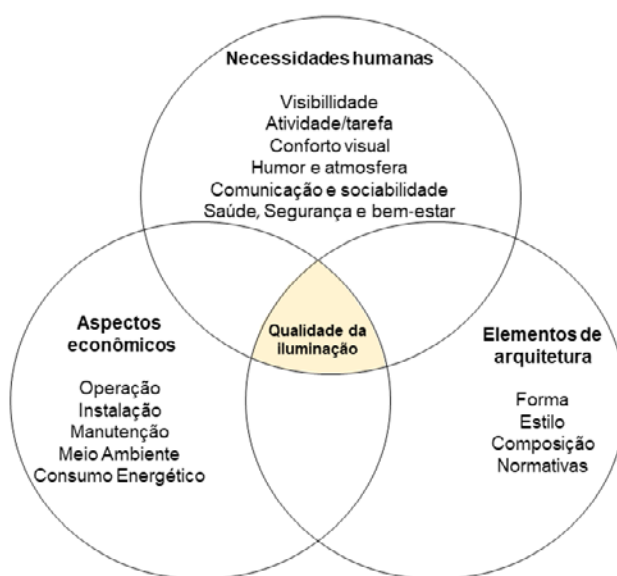


Figura 3. Modelo de parâmetros de qualidade de iluminação. Fonte: Veitch (2006)

Fernandes, Amorim e Sousa (2013) afirmam que a qualidade da iluminação afeta os aspectos visuais (para cumprir a tarefa visual), emocionais (para criar atmosferas), biológicos (para apoiar e estimular as pessoas) e de orientação (para sentir-se seguro). Ao realizar uma revisão de literatura, os autores apontam aspectos básicos para a avaliação da qualidade de iluminação, sendo eles:

- aspectos de projeto: iluminância e uniformidade, ofuscamento psicológico, ofuscamento fisiológico, reprodução das cores, temperatura de cor, contraste, sombreamento, modelagem e iluminação natural;
- aspectos individuais: aceitação, satisfação, bem-estar, ativação, ritmo circadiano, hierarquia de percepção, flexibilidade, individualidade, conceitos mentais (expectativas); e
- aspectos criativos: elementos da arquitetura, zoneamento, posicionamento, caráter, qualidade visual e estética da luminária e contrastes.

Existe certo consenso sobre alguns importantes fatores para a obtenção de qualidade em um sistema de iluminação. Para proporcionar uma boa condição luminosa, alguns aspectos devem ser considerados tais como a quantidade, qualidade e distribuição da luz (TREGENZA; MARDALJEVIC, 2018). Dentre os elementos para análise de iluminação, iluminância, luminância, distribuição de luminâncias, uniformidade, contraste e ofuscamento são aspectos essenciais. O equilíbrio entre iluminação direta e indireta e o uso da luz natural também são elementos que contribuem para a qualidade luminosa dos espaços (VEITCH; NEWSHAM; 1996).

Assim, o equilíbrio da relação homem e espaço é uma experiência individual e complexa, onde, Schmid (2005) discorre sobre quão abrangente pode ser o conceito de conforto, necessitando de uma visão holística sobre diversos aspectos tocantes ao tema, uma vez que se trata não somente de questões ambientais, como também sensoriais.

Para Serra (2004), conforto é um somatório de fatores provenientes de diferentes escalas, divididos em: parâmetros ambientais (relacionados com a caracterização do clima de um determinado lugar), parâmetros específicos (propriedades inerentes de um espaço, como aspectos térmicos, acústicos e lumínicos) e parâmetros genéricos (questões sazonais, do tempo, de cultura e de gênero).

Nesse sentido, Lamberts, Dutra e Pereira (2014) discutem quanto à necessidade de considerar conforto como um conjunto de condições ambientais que permitem ao ser humano sentir bem-estar térmico, visual, acústico e antropométrico, além de garantir a qualidade do ar e conforto olfativo. A isto tudo se dá o nome de conforto ambiental. Os referidos autores certificam que, ainda assim, o ser humano é biologicamente adaptável, capaz de se utilizar de mecanismos como vestimenta, arquitetura e tecnologia, para atingir condições ideais de permanência.

Quando se fala em iluminação, é importante manter em mente que a percepção visual é um item que pode ou não garantir a sensação de bem-estar aos usuários em um determinado lugar. Para Schmid (2005), conforto lumínico são os ajustes dos níveis absolutos e relativos de brilho das superfícies às tarefas visuais em um ambiente. Geralmente, as fontes luminosas não servem para ser vistas, mas para iluminar objetos, procurando ver sem ferir os olhos e sem sofrer estresse visual. Já Lamberts, Dutra e Pereira (2014) entendem conforto visual como a existência de um conjunto de condições, em um determinado ambiente, no qual o ser humano pode desenvolver suas tarefas visuais com o máximo de acuidade e precisão visual, com o menor esforço e menor risco de prejuízos à vista e risco de acidentes.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), as condições para alcançar esse estado de conforto são: iluminância suficiente; boa distribuição de iluminâncias; ausência de ofuscamento; contrastes adequados (proporção de luminâncias); bom padrão e direção de sombras.

A Figura 4 estabelece uma escala que une o nível de iluminamento necessário para a realização de uma atividade (iluminância) e a temperatura de cor ideal, oriunda da fonte luminosa. Quanto maior a iluminância, mais tolerante a temperaturas frias torna-se o observador. Ao cruzar esses dados, é possível encontrar o estágio de conforto, em termos de conforto luminoso.

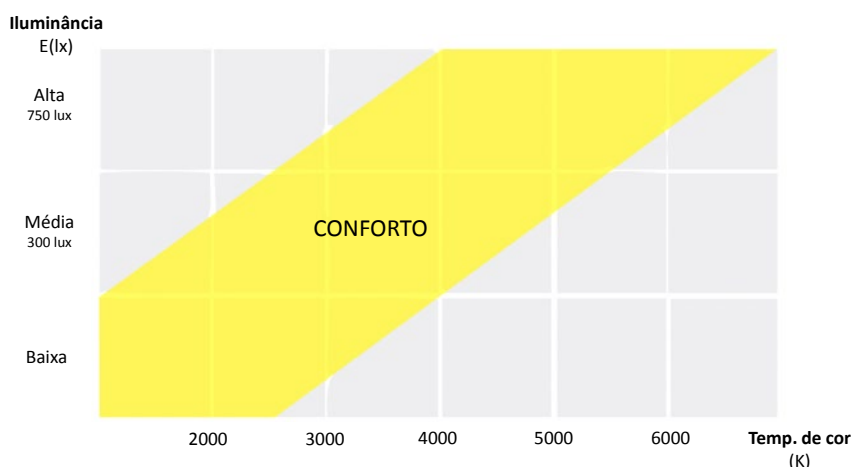


Figura 4. Relação de conforto ambiental entre nível de iluminância e tonalidade de cor da lâmpada. Fonte: Osram

2.6 Normas Técnicas

Em termos de regulamentação, alguns documentos nacionais balizam discussões sobre questões de iluminação, sendo os principais deles: ABNT NBR 15.215; ABNT NBR ISO/CIE 8995; ABNT NBR 15.575; e PBE EDIFICA. No que tange aos padrões internacionais, é possível citar a recente norma europeia EN 17037:2018, que trata das condições de iluminação natural em edificações e estabelece método de avaliação e parâmetros para quantificação da qualidade da iluminação natural em ambientes internos. Neste documento, os critérios para avaliação da luz do dia em edifícios são: provisão de luz natural; avaliação da vista exterior; exposição à luz solar; e proteção contra o ofuscamento.

Na sequência, apresenta-se uma visão geral dos documentos nacionais supracitados.

A. ABNT NBR 15.215

A ABNT NBR 15.215:2005 trata das condições de iluminação natural, apresentando conceitos básicos, compatibilização entre sistemas naturais e artificiais de iluminamento, caracterização de tipos de céu, fator de luz diurna e métodos de simulação computacional. Essa normativa é dividida em quatro partes: a Parte 1 trata dos conceitos básicos e definições; a Parte 2 discorre sobre procedimentos de cálculos para estimativa da disponibilidade de luz natural; a Parte 3 trata dos procedimentos de cálculo para determinação da iluminação natural em ambientes internos; e a Parte 4 apresenta uma verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações.

B. ABNT NBR ISO/CIE 8995

Datada de 2013, essa norma é oriunda de uma regulamentação internacional que determina as condições de iluminação adequadas em ambientes internos de trabalho. Em seu conteúdo, há uma listagem com diversos tipos de ambiente e o nível de iluminância ideal em cada um deles. Além disso, apresenta requisitos como uniformidade, índice de reprodução de cor e

ofuscamento. Este documento conceitua, ainda, elementos importantes para o projeto luminotécnico, como: tarefa visual, área da tarefa e entorno imediato. De maneira geral, a Tabela 2 sintetiza as recomendações básicas para condição de iluminação de ambientes internos.

Tabela 2. Nível de iluminância necessária em ambientes. Fonte: ABNT NBR ISO CIE 8995

Classificação	Nível de iluminação	Tarefa visual
Baixa	100 a 200 lux	Circulação
		Reconhecimento facial
		Leitura casual
		Armazenamento
		Refeição
		Terminais de vídeo
Média	300 a 500 lux	Leitura/escrita de documentos com alto contraste
		Participação de conferências
Alta	500 a 1.000 lux	Leitura/escrita de documentos com pequenas fontes e baixo contraste
		Desenho técnico

C. ABNT NBR 15.575

A ABNT NBR 15.575:2013 discorre sobre o desempenho de edificações habitacionais. Seu conteúdo versa basicamente sobre três grandes eixos: segurança, habitabilidade e sustentabilidade. A norma exige dos projetos um determinado desempenho lumínico e discorre sobre o método como garantir a comprovação de atendimento aos padrões expostos, por meio de medição e/ou simulação computacional.

Nesse contexto, o desempenho lumínico é, basicamente, caracterizado por duas vertentes: a viabilidade e boa condição de uso, ao longo do dia, da iluminação natural, oriunda diretamente do exterior ou indiretamente, através de recintos adjacentes; a condição satisfatória que o sistema de iluminação artificial deve proporcionar para ocupação dos recintos e circulação nos ambientes com conforto e segurança, durante o período noturno.

Por se tratar de um documento prescritivo, a NBR 15.575 muitas vezes se reporta às normas já existentes e aqui supracitadas (ABNT NBR 15.215 e NBR ISO/CIE 8995) como documentos base. A norma encontra-se atualmente em revisão.

D. PBE Edifica

Desde os anos 90, o governo brasileiro começou a investir em uma série de processos que visam promover a eficiência energética. Um deles foi o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) que, dentre outros processos, estabelece métodos que verificam a eficiência energética de equipamentos e projetos que entram no mercado nacional, por meio de uma escala de "A" a "E", em que a categoria "A" indica maior eficiência do sistema e "E" corresponde aos menos eficientes.

No programa PROCEL, se origina o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edifícios (PBE Edifica). Existente desde 2010 para novas construções comerciais (RTQ-C) e residenciais (RTQ-R), o programa engloba critérios para avaliação da eficiência energética de edificações, en-

volvendo a fachada e envoltória, iluminação natural e artificial e condicionamento de ar. Além destes aspectos, a metodologia de avaliação considera a existência de outros atributos da edificação para melhor condição de performance energética do edifício.

Desde 2014, a Instrução Normativa n.º 02 da Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação determina que todos os novos projetos construídos pelo governo federal e também aqueles que recebam *retrofit* devem obter etiqueta nível “A” de eficiência energética. Apesar da voluntariedade ainda garantida pelo programa, a etiquetagem tem uma perspectiva promissora. Países europeus já investem em mecanismos semelhantes sendo, inclusive, um nicho de mercado para profissionais da área da Engenharia e Arquitetura trabalharem com a consultoria técnica.

O Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C) estabelece, ainda, critérios de eficiência energética para o sistema de iluminação tais como a divisão dos circuitos, a contribuição de luz natural e a acionamento automatizado do sistema.

Quanto à divisão dos circuitos, o documento determina que cada ambiente fechado por paredes ou divisórias até o teto deve possuir pelo menos um dispositivo de controle manual, o qual permite o acionamento independente da iluminação interna do ambiente. Cada controle manual deve ser facilmente acessível e localizado de forma que seja possível ver todo o sistema de iluminação que está sendo controlado. Caso não seja possível visualizar todo o ambiente iluminado, é necessário informar ao usuário, por meio de uma representação gráfica da sala, a área abrangida pelo controle manual. O documento sugere ainda uma sequência operacional dos interruptores para ambientes com áreas superiores a 250 m²: em locais com até 1.000 m²; cada dispositivo de controle deve controlar uma área de até 250 m², ou seja, utilizam-se no mínimo quatro interruptores; para ambientes com área superior a 1.000 m², cada interruptor deve controlar áreas de até 1.000 m².

Em relação à contribuição de luz natural, o RTQ-C indica critérios de acionamento para ambientes com abertura(s) voltada(s) para o ambiente externo, para átrio não coberto ou de cobertura translúcida, e que contenham mais de uma fileira de luminárias paralelas a estas aberturas. Nestes ambientes, devem existir dispositivos para acionamento individualizado de cada fileira de luminárias. Tais dispositivos podem ser manuais ou automatizados e proporcionam o aproveitamento da luz natural disponível.

No que se refere ao acionamento automatizado, o regulamento prevê que o sistema de iluminação interna de ambientes maiores que 250 m² deverá possuir um dispositivo de controle automático para desligamento da iluminação. Este dispositivo de controle automático deve funcionar de acordo com uma das seguintes opções: sistema automático com desligamento da iluminação em um horário predeterminado; sensor de presença que desligue a iluminação 30 minutos após a saída de todos ocupantes; sinal de outro controle ou sistema de alarme que indique que a área está desocupada. Estão excluídos dessas prerrogativas ambientes que devem propositadamente funcionar durante 24 horas, ambientes onde existe tratamento ou repouso de pacientes, espaços onde o desligamento automático da iluminação pode comprovadamente oferecer algum tipo de riscos à integridade física dos usuários.

3. CONDICIONAMENTO DE AR

As medidas de eficiência energética em sistemas de condicionamento ambiental visam reduzir a carga térmica que deve ser removida ou adicionada ao ambiente. Tais projetos podem ocorrer mitigando a carga térmica gerada no ambiente ou alterando o padrão de troca de calor entre o meio interno e o externo.

Em relação à envoltória do edifício, trata-se de um aspecto de difícil alteração no momento pós-obra, o que justifica a necessidade de um projeto elaborado com critérios técnicos. As normativas brasileiras definem parâmetros mínimos exigidos para o desempenho térmico das edificações em cada zona bioclimática do país, de acordo com a ABNT NBR 15.220 (2013).

Segundo Akutso (1998) e Lamberts e Naranjo (2007), um dos fatores que mais influenciam no aumento ou redução da carga térmica é a orientação do edifício, que determina a exposição das fachadas à radiação solar. No Brasil, as faces voltadas para leste e norte recebem maior quantidade de radiação solar direta, devido ao movimento natural do sol ao longo do ano. Nesse sentido, é importante elaborar estratégias para proteger essas fachadas ou reduzir a porcentagem de taxa de abertura (janelas e vidros). As demais faces, mesmo não recebendo tanta radiação solar direta, ainda irão contribuir intensamente para o cálculo de carga térmica, já que estão recebendo calor do ambiente externo e transferindo-o para o ambiente interno. Este fator deve ser considerado durante a fase de concepção arquitetônica.

Os materiais construtivos da edificação são de grande impacto em termos de envoltória, pois ditam o comportamento da transferência de calor entre o meio interno e externo, ao armazenar calor na própria estrutura. O armazenamento térmico consiste na dissipação gradual da energia absorvida pela envoltória durante o período em que recebe radiação solar e promove o aumento da carga térmica interna, mesmo depois que não houver mais sol.

O revestimento externo da edificação também pode ser usado para mitigar os efeitos do ganho de calor por radiação. Materiais de revestimento com baixa capacidade e transmitância térmica potencializam a dissipação de energia térmica e, conseqüentemente, reduzem a carga que penetra na edificação. Tais alterações podem acontecer com o edifício já em operação, porém seus ganhos são difíceis de estipular, já que influenciam interativamente o sistema de condicionamento de ar. A simulação computacional termoenergética pode auxiliar nesse processo.

Vale ressaltar um ponto de especial atenção em edifícios horizontalizados: o contato com o solo. O solo em si é um grande absorvedor de carga térmica, já que representa uma grande massa e está constantemente retirando calor da edificação. Mesmo nos dias quentes, ele apresenta baixa temperatura a alguns centímetros de profundidade. Desse modo, é possível utilizá-lo como elemento para dissipação de carga térmica, escolhendo materiais que permitam a transferência de calor entre o ambiente e o solo.

Além dos materiais construtivos, devem-se avaliar as esquadrias. O tipo de janela e vidro que é empregado em uma arquitetura influencia, diretamente, na transferência de calor. Quando pertinente, o controle ou sombreamento das janelas pode auxiliar na redução da radiação direta e pode acontecer por meio de elementos da própria envoltória, como beirais e platibandas, ou por dispositivos internos e/ou externos, como brises, toldos e persianas. As esquadrias auxiliam, ainda, na potencialização da ventilação natural, aumentando a taxa de dissipação de calor das paredes para o ambiente e/ou aumentando a taxa de renovação de ar, caso seja interessante.

Outro fator determinante para a redução de carga térmica é o funcionamento ou manuseio dos sistemas de acionamento de equipamentos, e isso está diretamente relacionado com a questão do usuário. Além de gerar calor, os usuários estão conectados com a redução da carga térmica por meio do manuseio dos sistemas, conectando-os diretamente à eficiência de operação. Recomenda-se integrar ao projeto de eficiência as pessoas que utilizam o ambiente, de forma a promover uma mudança efetiva nos resultados de redução de consumo. Isso pode dar-se com instrução e, ainda, campanhas de sensibilização. É importante que as pessoas tenham conhecimento de seu papel no processo de consumo energético do edifício.

Não é possível alterar diretamente a carga térmica produzida por uma pessoa, contudo é possível criar ações de eficiência energética voltadas diretamente para a alteração do usuário. Tais ações podem ocorrer de vários modos, tais como: conscientização, mudança de hábitos, incentivos e retirada do controle dos usuários. Questões que tratam dos usuários costumam envolver subjetividade e devem ser analisadas caso a caso, para refletir sobre a realidade local.

Em termos da redução de carga térmica para fins de eficiência energética, a seleção dos equipamentos de consumo possui grandes impactos. Desde 1984, o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), contribui com o controle e racionalização do uso de energia no Brasil, informando os consumidores sobre as características de equipamentos e auxiliando na escolha por opções mais eficientes. Os equipamentos são classificados conforme um coeficiente de eficiência energética, mediante a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Desde 2001, a Lei n.º 10.295/2011, conhecida como Lei de Eficiência Energética, determina parâmetros mínimos que classificam os equipamentos em termos de consumo de energia, obtendo-se o selo PROCEL.

A partir de 2007, o uso do parâmetro mínimo de eficiência energética foi aplicado, estabelecendo o Coeficiente de Eficiência Energética (CEE), em inglês denominado *Coefficient of Performance* (COP) ou *Energy Efficiency Ratio* (EER), que representa a razão entre a energia térmica na saída do sistema e a respectiva energia elétrica na entrada. No caso dos equipamentos de condicionamento ambiental, o CEE é definido como a capacidade de refrigeração dividido pela potência elétrica demandada pelo aparelho.

$$CEE = \frac{\text{Capacidade de condicionamento ambiental (kW)}}{\text{Potência elétrica (kW)}}$$

Este índice determina a classificação do ar-condicionado na escala determinada pelo Inmetro sendo uma ferramenta importante para avaliar e comparar a eficiência de equipamentos diferentes de mesmo modelo e auxiliar na escolha do mais eficiente.

Assim, têm-se duas oportunidades de ação de eficiência energética envolvendo equipamentos no interior do ambiente: a primeira consiste no *retrofit* direto do sistema de condicionamento ambiental trocando os equipamentos antigos por equipamentos de alto CEE e reduzindo a potência necessária para gerar a mesma capacidade de resfriamento; e a segunda, trocando outros equipamentos e, desse modo, reduzindo a quantidade de calor emitido no ambiente, diminuindo a carga térmica do ambiente. No caso do *retrofit* do sistema de ar-condicionado, deve-se avaliar qual ação apresenta o melhor custo-benefício e quais as tecnologias disponíveis. Em seguida, consideram-se, além da economia de energia, as obras civis necessárias para instalação do equipamento, e qual a possibilidade de execução.

Um conceito interessante na substituição de equipamentos em projetos de eficiência energética se chama efeito interativo. Este consiste na redução do consumo de energia de um sistema através da alteração em outro. A título de exemplificação, tem-se o caso anterior no qual a substituição da iluminação gerou uma economia no sistema de ar-condicionado por meio da redução da carga térmica. Pode-se observar que, com exceção da substituição direta dos aparelhos de ar-condicionado, todas as demais ações consistem na mudança de outros sistemas ou componentes visando reduzir a carga térmica e, assim, poderiam em termos gerais serem chamadas de efeitos interativos.

As medidas de eficiência energética a partir da renovação de ar consistem na utilização da ventilação seletiva, ou seja, utiliza-se ventilação sempre que a temperatura externa for menor que a interna, de modo a expelir o ar mais quente e absorver o ar mais fresco e, assim, reduzir a necessidade de resfriamento. Em locais onde a temperatura noturna é amena, pode-se utilizar ventilação noturna para minimizar os efeitos do armazenamento térmico da envoltória e fazer com que esse calor seja dissipado mais rapidamente, reduzindo, assim, a necessidade de utilização do ar-condicionado.

A movimentação do ar provocada pela ventilação aumenta seu coeficiente de transferência de calor por convecção, ou seja, ocorre maior transferência de calor entre o ar e as demais superfícies. Este fato pode ser usado para aquecer o ar, removendo calor de equipamentos, envoltória e dos usuários e o jogando para fora do ambiente. Outro fato interessante é que a ventilação aumenta a taxa de evaporação do suor na pele, o que aumenta a sensação de perda de calor e consequentemente pode melhorar o conforto térmico para o usuário.

Estratégias de automação e controle também podem ser usadas para reduzir o consumo de energia, como, por exemplo, a utilização de inversores de frequência para motores elétricos que movem os ventiladores e demais máquinas. Este equipamento permite controlar a velocidade de rotação do eixo do motor, ou seja, controlar a velocidade do ventilador, o que resulta no controle da vazão de acordo com a real necessidade do ambiente.

Ainda falando sobre condições de ar, mas agora sobre infiltrações, visa-se sempre reduzir ao máximo sua influência, já que não é possível controlá-la. Assim, as estratégias de eficiência utilizadas consistem em três métodos principais sendo: a vedação de frestas e aberturas; a criação de barreiras virtuais em frestas que não podem ser vedadas; e a alteração da pressão interna do edifício.

3.1 Funcionamento de Aparelhos de Ar-condicionado

Sistemas de condicionamento de ar são equipamentos utilizados para artificialmente manter um ambiente em situação de conforto térmico, incluindo o controle de temperatura, umidade e qualidade do ar. Aqui, haverá especial atenção aos equipamentos de controle de temperatura, os mais utilizados em prédios públicos e comerciais. Esses aparelhos apresentam grande variedade e seguem uma estrutura padrão composta por um módulo que retira o calor interno, outro que conduz o calor até o ambiente externo, e um módulo responsável por dissipar tal calor. Diferenciam-se, basicamente, por suas funções, modo de operação e captação e dissipação do calor, interno e externamente.

Os aparelhos de ar-condicionado apresentam quatro componentes básicos, a saber: evaporadora, condensadora, compressor e válvula de expansão. A Figura 5 representa essa estrutura:

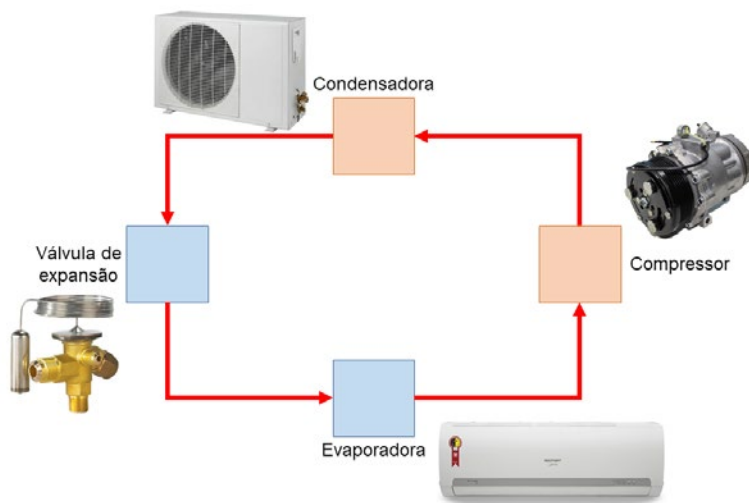


Figura 5. Componentes básicos de um ar-condicionado. Fonte: Honorato (2020)

Internamente, a evaporadora é o módulo que capta o calor do ambiente. Ela é composta de uma serpentina, caracterizado por um duto delgado com grande área superficial e feito de material condutor térmico. No interior da serpentina, um fluido circula e absorve o calor externo. Esse fluido pode variar de acordo com o tipo de equipamento. A serpentina direciona o calor do ambiente à condensadora, módulo que dissipa esse calor, promovendo a troca de calor entre o fluido e o ambiente. Além disso, aparelhos de ar-condicionado contam com um sensor de temperatura em sua saída, que monitora a temperatura ambiente. Caso o limite de temperatura (*setpoint*) seja atingido, o equipamento desliga ou reduz a rotação de seu compressor, mantendo, portanto, a temperatura ambiente relativamente constante.

O processo foi exemplificado para um sistema de ar-condicionado individual, porém segue o mesmo princípio para o sistema central, sendo a condensadora substituída por uma torre de resfriamento ou equipamento trocador de calor de grande porte. Os evaporadores se mantêm alimentados por dutos vindos da condensadora central. Por fim, o bombeamento do fluido é feito por bombas responsáveis pela circulação.

Os aparelhos de ar-condicionado funcionam seguindo dois ciclos de funcionamento: frio e quente. No ciclo frio, o fluido presente na serpentina da evaporadora troca calor com o ambiente interno e, como possui temperatura mais baixa que este ambiente, retira o calor e resfria o ar local. Após aquecido, é comprimido no compressor do aparelho elevando sua pressão e temperatura e sendo forçado em direção com condensador. Neste ponto, o fluido passa a perder calor para o ambiente externo através da serpentina, já que sua temperatura é mais alta do que a da vizinhança. Por fim, o fluido sofre uma rápida expansão na válvula de expansão, o que provoca uma intensa queda de temperatura e faz com que a temperatura de entrada na evaporadora seja baixa. O processo se repete durante o funcionamento do aparelho, fazendo com que o calor flua do ambiente interno para o externo e crie artificialmente uma temperatura mais baixa. A Figura 6 indica as fases do ciclo frio:

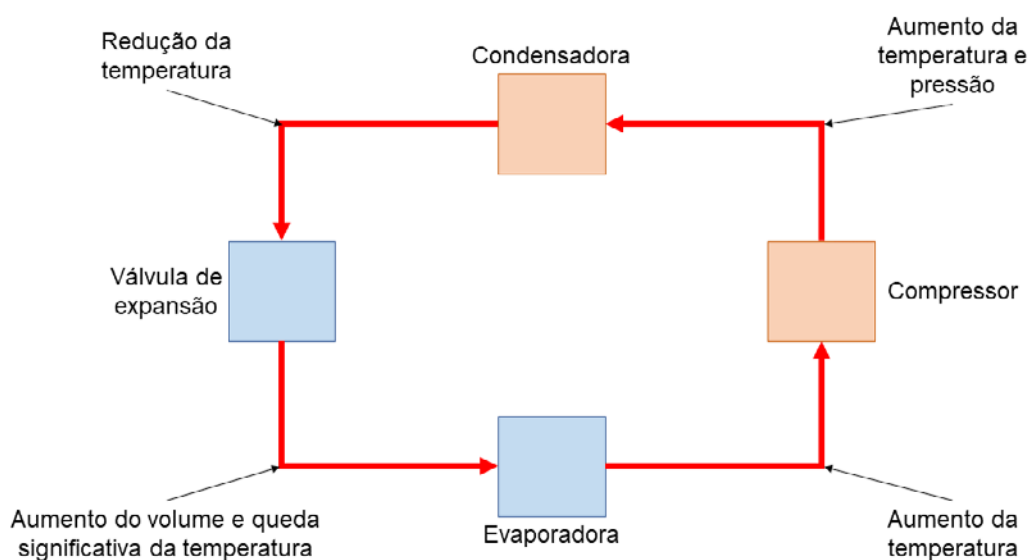


Figura 6. Esquemático do ciclo frio. Fonte: Honorato (2020)

O ciclo quente, por sua vez, é semelhante ao frio, diferenciando-se apenas pela ordem dos equipamentos, ou seja, liberando calor no ambiente ao invés de captá-lo. É importante comentar que esse ciclo é utilizado apenas em equipamentos com dupla função, ou seja, aquecimento e resfriamento. No caso de equipamentos puramente de aquecimento, o sistema é mais simples, sendo formado apenas por uma fonte de calor e um elemento dissipador, que transfere a energia gerada para o ambiente.

3.2 Tipos de Equipamentos de Ar-condicionado

Esta seção visa apresentar as principais tecnologias disponíveis para sistemas de condicionamento ambiental. Com vistas a entender mais profundamente as principais tecnologias disponíveis, serão apresentados os modelos de ar-condicionado mais usados no mercado e suas características.

A. Janela

Os ares-condicionados de janela são compostos por uma única unidade, instalada em uma abertura na parede da edificação. Esses aparelhos são instalados com o escape de ar quente voltado para fora e o sistema de retorno de ar refrigerado para dentro, podendo climatizar ambientes pequenos e médios. Por juntar a etapa de captação e dissipação de calor, são modelos simples e de rápida instalação. Sua capacidade de medida é BTU.

B. Split

Todo aparelho de ar-condicionado individual que é dividido em duas unidades (evaporadora e condensadora) recebe este nome. As duas unidades são interligadas por meio de tubulações frigoríficas, nas quais circula um fluido refrigerante que absorve o calor interno e o direciona à condensadora para sua dissipação.

Os ares-condicionados *split* apresentam a maior eficiência energética dentre os modelos individuais e, por serem construídos com diversos formatos de evaporadora, possuem grande versatilidade de utilização. Apresentam, essencialmente, apenas a opção de realizar ciclos frios, podendo se adaptar à necessidade do usuário de acordo com a configuração do *setpoint*. Podem ser subdivididos conforme o modo de instalação da evaporadora. Os principais modelos são *high wall*, piso/teto e cassete e, em todos os casos, sua capacidade de resfriamento é medida em BTU.

Os modelos *high wall* possuem sua evaporadora instalada no alto de uma das paredes do ambiente, de forma a permitir uma melhor distribuição do ar refrigerado, o que aumenta sua eficiência. São utilizados para climatizar ambientes pequenos e médios, como salas de aula e escritório.

Já os modelos de piso/teto possuem sua evaporadora instalada no teto ou no piso do ambiente e apresentam vazões de ar maiores que os modelos *high wall*, de modo que sua capacidade de refrigeração é superior. São utilizados para climatizar ambientes grandes como auditórios e bibliotecas.

O cassete é aquele no qual sua evaporadora pode ser embutida no teto. Além disso, sua ventilação é feita por quatro saídas, o que melhora a distribuição da refrigeração no ambiente, climatizando-o de forma mais uniforme. Apresentam uma bomba de dreno integrada, o que facilita a gestão da água produzida pelo equipamento. São utilizados para climatizar grandes ambientes como escritórios grandes do tipo *open office* e saguões de entrada.

C. Fan-Coil

Os equipamentos de sistema *fan-coil* são indicados para climatização de grandes ambientes ou locais com contato exterior, e a carga térmica a ser dissipada é grande, a exemplo de *shopping centers*, hospitais e prédios comerciais.

O sistema de funcionamento é semelhante aos do tipo splits, divididos em duas unidades (evaporadora e condensadora). Contudo, o sistema apresenta diversas evaporadoras instaladas nos ambientes climatizados, onde apenas uma condensadora geral (chamada *chiller*) interliga todas as evaporadoras do sistema. A conexão entre estes elementos é realizada por meio de dutos que transportam o fluido refrigerado da condensadora até os pontos de entrega. As evaporadoras do sistema são chamadas de *fan-coil* e possuem serpentinas de cobre ou alumínio por onde circula água gelada. O ar é direcionado para a serpentina através de um ventilador. Ao passar por ela, ocorre a transferência de calor do ar para a água e, assim, ele retorna ao ambiente resfriado. Em seguida, a água aquecida volta para a condensadora central onde ocorre a dissipação de calor e seu resfriamento para retornar às serpentinas das evaporadoras. Todo esse processo é realizado através de bombas que impulsionam o fluido de trabalho por meio do sistema.

O uso de sistemas de condensação de água como os do tipo *fan-coil* é vantajoso para locais de grande área, devido à possível eficiência energética gerada. Esse sistema é do tipo ar-condicionado central e sua capacidade de resfriamento é medida em TR (toneladas de Refrigeração), e cada TR equivale a 12.000 BTU/h.

D. VRF

A climatização VRF (Fluxo de Gás Refrigerante Variável) é um sistema de ar-condicionado central *multisplit*. Tal qual o modelo *fan-coil*, uma condensadora está conectada a diversas unidades evaporadoras, de forma a atender a espaços de grande área. O processo de transferência de calor entre o fluido refrigerado e o ar ambiente também ocorre de forma semelhante, com a diferença de que sua evaporadora apresenta maiores mecanismos de controle.

O controle do fluxo de gás refrigerante é feito por uma válvula de expansão dedicada em cada evaporadora, que monitora a demanda de refrigeração e ajusta o fluxo, coisa que não ocorre no sistema a *Fan Coil*. Esse sistema possibilita uma automação sofisticada ao dividir o funcionamento de cada evaporadora para atender à demanda de carga térmica de cada ambiente, operando de modo eficiente, o que reduz o consumo de energia.

E. Tecnologia *inverter*

Equipamentos de ar-condicionado com tecnologia *inverter* possuem compressores com rotação variável. Nos sistemas convencionais, um termostato monitora a temperatura ambiente de maneira a acionar o compressor quando a temperatura estiver acima do *setpoint* e desligá-lo quando a temperatura desejada for atingida. O processo de ligar e desligar o equipamento implica picos de corrente, além de manter o compressor funcionando sempre em uma velocidade fixa nominal. Já nos sistemas *inverters*, o equipamento monitora a temperatura ambiente e ajusta a velocidade do compressor, de modo a manter o local na temperatura de conforto requerida. Portanto, o equipamento nunca desliga totalmente, suavizando os picos de corrente no acionamento, além de reduzir o consumo de energia, pois ele não precisará funcionar sempre com a velocidade fixa nominal do compressor, o que implica economia de energia considerável.

Essa tecnologia costuma limitar-se a aparelhos de ar-condicionado dos modelos *split* e VRF. Apresenta a vantagem de reduzir o consumo de energia, melhorar a estabilidade térmica do ambiente (com pouca variação de temperatura) e ser mais silencioso. Contudo, o investimento inicial é mais alto do que em modelos convencionais e, devido à utilização de vários componentes eletrônicos, sua manutenção precisa de regularidade. Assim, sua aplicação deve ser ponderada, pois, em ambientes pequenos e com pouca circulação de pessoas, o benefício de economia de energia pode não compensar os custos mais elevados.

3.3 Carga Térmica

A carga térmica é definida como a quantidade de calor que deve ser fornecida ou retirada de um ambiente, de forma a manter o conforto térmico de seus usuários. Desse modo, ela é a base de todo projeto de condicionamento ambiental e determinará o dimensionamento de todos os componentes do sistema.

Ferreira e Marques (2018) afirmam que a carga térmica de um ambiente é composta por duas parcelas, sendo uma delas interna (gerada dentro do próprio ambiente) e outra externa (resultante das trocas do ambiente interno com o meio externo). Os principais fatores que devem ser determinados para o cálculo da carga térmica total de um ambiente são os ganhos de calor por meio da envoltória, pessoas, equipamentos, renovação de ar e infiltrações.

A. Envoltória

A envoltória da edificação consiste em sua estrutura física, ou seja, nos materiais, aberturas, geometrias e demais fatores físicos edificantes. Este fator influencia diretamente a transferência de calor entre o ambiente externo e interno, barrando ou facilitando seu fluxo, e está diretamente relacionado com a ventilação natural e a infiltração de ar no ambiente.

Comparada aos demais fatores, este é o mais perene, já que dificilmente altera-se de forma significativa a estrutura física de um edifício ao longo de sua vida útil. Em termos de eficiência energética, o ideal é que essa questão seja avaliada na fase de projeto, pelas dificuldades de intervenção depois de já executado. Para simulações termoenergéticas, é um importante elemento para determinação do consumo de energia do sistema de condicionamento ambiental.

B. Pessoas

O número (ou fluxo) de pessoas em cada ambiente deve ser estipulado e considerado nos cálculos de carga térmica, já que cada indivíduo funciona como uma fonte de calor no interior do ambiente. A quantidade de calor gerado depende da atividade realizada pelos usuários do ambiente, e a potência térmica média gerada em cada atividade encontra-se no livro da ASHRAE *"Handbook of Fundamentals: Thermal Comfort"*, de 2013.

C. Equipamentos

Todo equipamento em funcionamento dissipa calor, representando uma fonte térmica no ambiente. Essa dissipação deve ser contabilizada nos cálculos de carga térmica através do levantamento dos equipamentos presentes no recinto e de suas características técnicas. Após considerar todos os ganhos de energia, deve-se considerar a influência dos equipamentos de condicionamento ambiental, seu funcionamento e sua eficiência de operação.

D. Renovação de ar

A renovação consiste na troca de ar entre o ambiente interno e o meio externo, podendo ocorrer naturalmente ou de forma artificial. Essa troca de ar promove um fluxo de calor entre os ambientes, relevante para o cálculo de carga térmica. De forma geral, calcula-se a taxa de renovação do ambiente em renovações por hora (ACH) e, a partir disso, implementam-se os cálculos de carga térmica por renovação.

Diversas normas técnicas, como ASHRAE 62.1 (2019) e NBR 16401 (2008), além de códigos sanitários e de construção civil, determinam a quantidade de renovação de ar para cada aplicação e devem ser utilizadas como premissas de projeto.

E. Infiltração

A infiltração é o fluxo de ar externo que penetra na edificação por meio de frestas e outras aberturas não intencionais. Além disso, abertura de portas e escotilhas permitem a infiltração de ar, devendo ser contabilizadas.

Pode haver dois tipos de trocas de ar dependendo da pressão interna da edificação: caso a pressão interna seja maior que a externa, o ar vai fluir do interior da edificação para o exterior, de modo que todo o trabalho realizado para condicionar este ar é desperdiçado, reduzindo a eficiência do sistema; por outro lado, se a pressão interna do prédio for menor que a pressão externa, o ar entrará para o ambiente sem ser previamente condicionado, o que altera

as características internas e pode reduzir o conforto térmico. Há métodos de condicionamento ambiental que alteram a pressão interna do edifício visando controlar esse fluxo.

A infiltração é difícil de ser calculada. Contudo, no capítulo de ventilação e infiltração do livro *"Handbook of Fundamentals"* (2013), a ASRAHE apresenta uma estimativa de taxas de infiltração para diversos tipos de ambiente.

3.4 Conforto Térmico

Em termos de questões térmicas, o primeiro fator a ser levado em consideração em qualquer projeto de condicionamento é o conforto dos usuários. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) apontam que o conforto térmico é um conceito subjetivo, pois diversos fatores e variáveis influenciam no bem-estar térmico de uma pessoa, em que a própria percepção de conforto térmico varia de pessoa a pessoa. Os mencionados autores complementam que os seres humanos são homeotérmicos, ou seja, a temperatura interna do corpo tende a se manter constante independentemente das condições externas, devido a seus mecanismos de regulação de temperatura. Entretanto, sempre existem trocas de calor entre o corpo e o ambiente gerando a sensação de calor ou frio.

Segundo a *American Society of Heating, Refrigerator and AC Engineers* - ASHRAE (2005), o conforto térmico é atingido quando o balanço de todas as trocas de calor a que o indivíduo está submetido é nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro dos limites adequados. Ainda conforme a ASHRAE, as variáveis que influenciam o conforto térmico ao homem podem ser divididas em dois grupos, sendo variáveis humanas e ambientais. As variáveis humanas correspondem à vestimenta e ao metabolismo do usuário e as ambientais correspondem à temperatura do ambiente, radiação térmica, velocidade do ar e umidade.

Para a definição de parâmetros objetivos que pudessem ser empregados por projetistas, de forma a garantir o conforto térmico de ambientes, pode-se comentar sobre o Voto Médio Preditado e as pesquisas de Humphreys como alguns dos principais métodos de análise do conforto térmico.

O Voto Médio Preditado (conhecido como PMV - do inglês *Predicted Mean Vote*) foi desenvolvido nos anos 70 pelo pesquisador dinamarquês Ole Fanger e publicado em seu estudo *"Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering"*, derivado de equações que consideram variáveis humanas e ambientais. O experimento avaliou pessoas de diferentes locais, idades e sexos, de modo a traduzir numericamente o conceito de conforto térmico e propondo um parâmetro concreto a ser avaliado por projetistas. Estes estudos auxiliaram na implementação do conceito de porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD - do inglês *Predicted Percentage of Dissatisfied*), adotado pela norma ISO 7730 (2005) *Moderate Thermal Environments* e admite que em toda condição haverá um percentual de até 10% de insatisfeitos com a condição térmica. As equações para o cálculo do PMV e do PPD envolvem fatores complexos, adotados por diversos softwares de simulação computacional atuais.

Já o método proposto pelas pesquisas de Humphreys, também desenvolvidas na década de 70 em trabalho intitulado *"Field Studies of Thermal Comfort Compared and Applied"*, desenvolve o conceito de temperatura neutra, que correlaciona a temperatura de conforto ao indivíduo com a temperatura média do ambiente. Este método envolve cálculos menos complexos que os de Fanger, e o método adaptativo, semelhante ao conceito desenvolvido por Humphreys, é utilizado pela ASHRAE 55 (2017) para determinação das condições de conforto térmico.

4. ESTUDO DE CASO

Em vista da necessidade de redução do consumo de energia elétrica dos prédios públicos e a importância de tornar as edificações mais sustentáveis e eficientes, esta seção apresenta as características de estudos para subsidiar as ações de eficiência energética em dois prédios da Universidade de Brasília. Conforme indicado anteriormente, as AEEs contemplam o *retrofitting* de instalações por meio da troca de equipamentos existentes, de baixa eficiência, por outros de maior eficiência, conforme previsto no Acordo de Cooperação n.º 501/2018 celebrado entre a Fundação Universidade de Brasília (FUB), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec) e CEB Distribuição S.A. (CEB-DIS)

Nesse contexto, destaca-se que o projeto promoveu:

- a substituição de 208 aparelhos de condicionamento de ar por equipamentos novos, com etiqueta PROCEL nível “A”;
- a substituição de 1.200 lâmpadas fluorescentes T8, em sua maioria com potência nominal de 32 W, por modelos LED T8 de 18 W; e
- a troca de 350 unidades de lâmpadas fluorescentes T5, com potência nominal de 18 W, por modelos LED de 9 W.

4.1 Apresentação

Os estudos de caso apresentados referem-se a duas edificações contempladas pelo projeto prioritário de Eficiência Energética, sendo eles: o bloco SG-11 (Figura 7a) e os prédios que compõem a Faculdade de Tecnologia (Figura 7c). Ambos fazem parte da estrutura da Universidade de Brasília, no Campus Darcy Ribeiro (Figura 7b).



Figura 7. a) Fachada do edifício SG11; b) mapa do Campus Darcy Ribeiro; c) fachada do edifício FT.

Fonte: Google Street View e Portal da Universidade de Brasília

O SG 11 (Figura 7a) faz parte do conjunto dos pavilhões de Serviços Gerais (SGs), com dois pavimentos. Foi projetado em 1962, por João da Gama Filgueiras Lima (Lelé). Até meados de 1970, o edifício abrigou os Institutos de Biociências, Física e Química e, atualmente, é utilizado por laboratórios vinculados à Faculdade de Tecnologia (FT). As Figuras 8 e 9 apresentam as plantas baixas do edifício SG11 com as respectivas indicações dos ambientes.

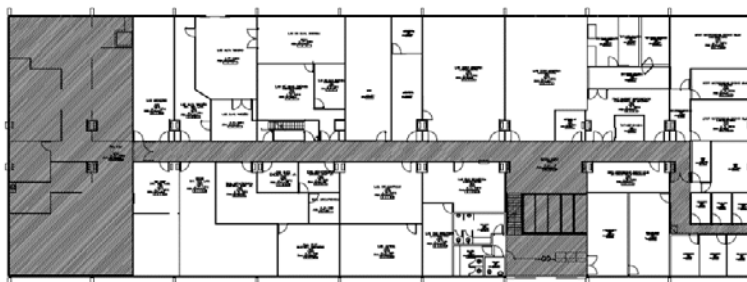


Figura 8. Planta baixa do edifício SG11 Térreo. Fonte: CEPLAN UnB

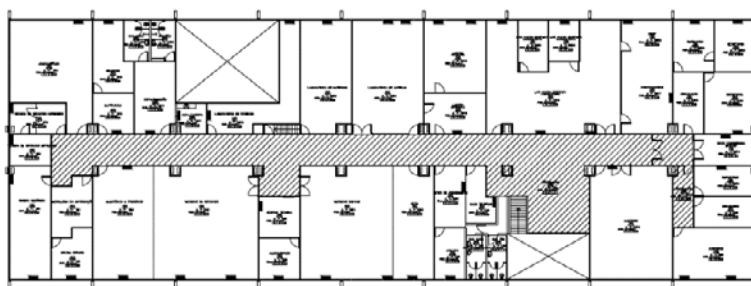


Figura 9. Planta baixa do edifício SG11 1PAV. Fonte: CEPLAN UnB

Já o edifício que abriga a Faculdade de Tecnologia - FT (Figura 7c) foi projetado por Érico Paulo Siegmar Weidle e Adilson Costa Macedo, construído entre 1974 e 1977, sendo a inauguração em 1978. O conjunto da Faculdade é composto por um prédio principal, formado por blocos intercalados por jardins, e três blocos independentes: o Laboratório de Termociência e Metrologia Dinâmica, o Laboratório de Hidráulica e Estruturas. Estruturalmente, o edifício da FT passou por menos modificações internas que o edifício SG11. É ocupado pelas secretarias dos cursos da área de Engenharias e Tecnologias, laboratórios, salas de aula, salas de professores e auditórios. As Figuras 10 e 11 apresentam as plantas baixas do edifício FT.

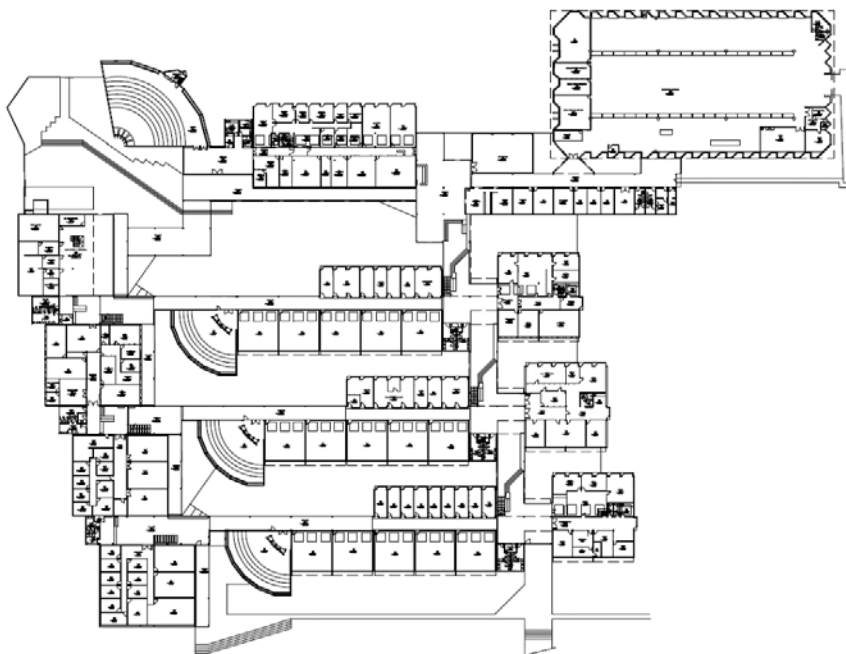


Figura 10. Planta baixa do edifício FT Térreo. Fonte: CEPLAN UnB

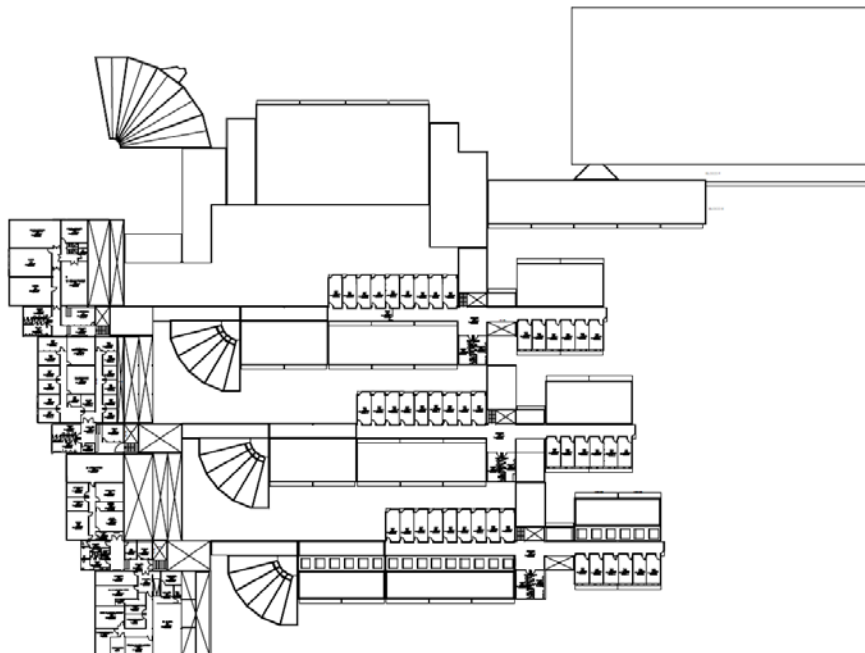


Figura 11. Planta baixa do edifício FT 1PAV. Fonte: CEPLAN UnB

4.2 Metodologia

4.2.1 Levantamento de dados

O levantamento de dados para o estudo da substituição das lâmpadas e equipamentos de condicionamento de ar dos estudos de caso aconteceu por meio de dois momentos distintos e subsequentes: a consulta ao acervo documental da Universidade de Brasília e a verificação *in loco*.

O levantamento documental baseia-se na documentação direta e/ou indireta de uma ou várias fontes. Segundo Oliveira (2016), pode ser confundida com a bibliográfica, mas, em linhas gerais, se diferencia por ser uma análise de vertente única, enquanto a bibliográfica parte da contribuição de vários autores sobre um determinado assunto. Caracteriza-se pela busca de informações em documentos que não receberam o tratamento científico necessário para a análise pretendida. Nesse sentido, a consulta do acervo documental deu-se por meio do Centro de Planejamento Oscar Niemeyer (CEPLAN UnB) e da Secretaria de Infraestrutura (INFRA UnB), ambos vinculados à administração da Universidade.

Já a verificação *in loco* tratou de visitas técnicas aos edifícios para apreciação das informações repassadas no levantamento documental, bem como observadas as condições reais de uso dos ambientes, no intuito de alinhar possíveis divergências. Para além da verificação e compatibilização de informações e medidas, foi levantada principalmente a distribuição espacial e o quantitativo dos equipamentos de iluminação que significam um importante elemento para a etapa de estudo seguinte, de simulação computacional de iluminação. *In loco*, coletaram-se ainda as informações de refletância das superfícies, e foram realizados registros fotográficos que auxiliam na análise dos ambientes e compreensão dos estudos de caso.

4.2.2 Simulação computacional

Segundo Ghiaus e Allard (2006), simulações computacionais são ferramentas úteis, capazes de analisar e verificar o desempenho de uma edificação, avaliar o impacto ambiental dela e, assim, auxiliar na tomada de decisão. Os referidos autores apontam que a construção de um modelo para simulação computacional deve ser baseada em princípios predeterminados e exigem como insumos a geometria do edifício, os critérios de conforto, os dados de entrada do clima local e a especificação de pormenores que causarão variações nos resultados.

Por meio de *softwares* disponíveis, a simulação computacional pode gerar resultados dinâmicos ou estáticos. Simulações dinâmicas são capazes de desenvolver um modelo matemático que verifica variáveis envolvidas ao longo de um intervalo de tempo. Esses modelos estão presentes em projetos luminotécnicos e termonergéticos em seus diversos sentidos. Já simulações estáticas são capazes de captar um momento, uma circunstância, e simular o desempenho das condições edificantes em um determinado recorte (dia e hora).

Para atingir os objetivos desejados nesta pesquisa, a grande parte das simulações computacionais de iluminação envolveu resultados estáticos; enquanto para questões térmicas, simulações dinâmicas.

4.2.2.1 Substituição de equipamentos de iluminação artificial

Diversos programas se propõem a auxiliar o projetista na hora de pensar as condições de iluminamento e nos efeitos desejados nos mais diversos tipos de ambientes. Alguns detêm maior foco em iluminação natural; outros, artificial, ou até mesmo atingindo dados referentes à compatibilização desses dois sistemas. Uma pesquisa realizada pela *International Energy Agency* (IEA), organização de estudo continuado sobre temas que circundam o cenário energético, provocou mais de 200 escritórios de arquitetura em todo o mundo, com o intuito de levantar os *softwares* mais utilizados para verificar as condicionantes de iluminação em seus projetos, e o resultado segue exposto na Figura 12.

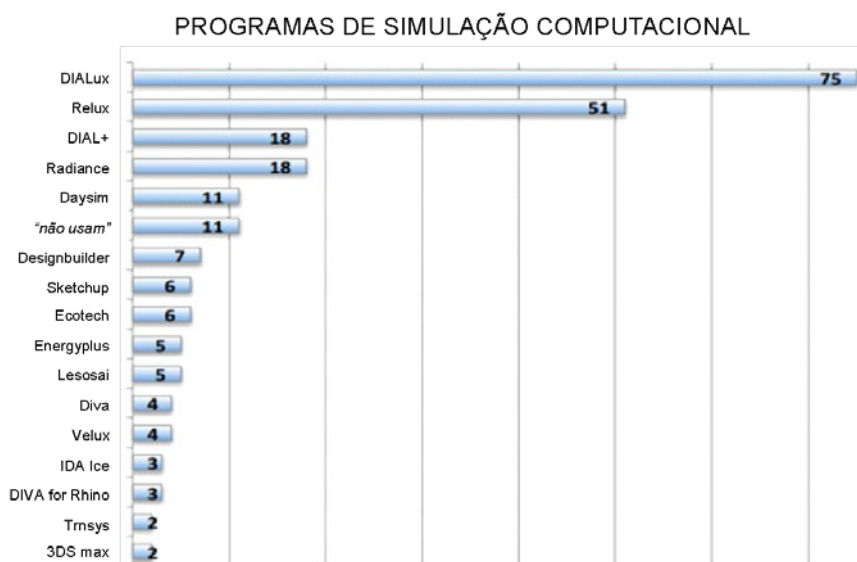


Figura 12. Lista de métodos e ferramentas usados para auxiliar no processo de retrofit de edificações. Fonte: IEA (2016)

O *software* utilizado nessa pesquisa é popularmente conhecido como Relux, desenvolvido pela Relux Informatik AG, e possui as versões ReluxPro, ReluxSensor, ReluxOffer e ReluxEnergy. Trata-se de uma plataforma gratuita, disponível em mais de 26 idiomas. O programa é uma interface de fácil utilização e aplicabilidade nos escritórios de Arquitetura, no que se inserem estudos luminotécnicos dentro de seu escopo de projeto. Desenvolve-se dentro de um ambiente 2D e 3D, com recursos de importação para os planos de arquitetura. A função de importação de desenho 2D comporta arquivos vetoriais como .dxf ou .dwg, bem como imagens .bmp, .jpg e .wmf. O Relux dispõe, também, de um banco de dados com lâmpadas e luminárias que são alimentadas por empresas do setor e permite, dentro de seu modelador, definir configurações do equipamento, sua posição (distribuição) nos ambientes, bem como uma renderização baseada em cálculos luminotécnicos.

O mecanismo de rastreamento luminoso utilizado pelo Relux calcula valores de luminância (L) e iluminância (E) e, para cada uma das zonas de construção, os cálculos podem ser obtidos juntamente com seu grau de uniformidade (Uo). A modelagem 3D no programa é gerenciável e o caminho de modelagem utilizado nesta pesquisa foi de importação dos arquivos de

arquitetura derivados do levantamento documental e compatibilizados com os devidos ajustes, com posterior definição de configuração de elementos relacionados à iluminação (pé direito, refletância das superfícies e plano de avaliação da simulação).

4.2.2.2 Substituição de equipamentos de ar-condicionado e consumo de energia elétrica

Para as simulações termoenergéticas, aplicou-se a modelagem via Designbuilder, versão 6.1.6, ferramenta computacional capaz de realizar cálculos avançados de carga térmica e simulações do comportamento e consumo de sistemas de condicionamento ambiental. Tal programa serve como ambiente gráfico no qual o projetista pode importar a planta baixa do edifício, permitindo a construção de um modelo tridimensional da edificação. Além disso, permite definir os materiais que compõem (envoltória e internamente), carregando informações sobre características térmicas, além de utilizar o arquivo climático local e o tipo de sistema de condicionamento ambiental, de maneira a adequar a simulação à realidade. Em seguida, o *software* grava as informações inseridas e cria um arquivo que pode ser automaticamente lido pelo Energy Plus, uma calculadora digital de alta eficiência, que apresenta os resultados requeridos pelo projetista.

Utilizando os parâmetros definidos para os ambientes modelos, foram construídos macromodelos para calcular a economia global de energia para a Faculdade de Tecnologia. Foram consideradas as estruturas adjacentes aos macroblocos, de modo a considerar a influência do sombreamento na estrutura analisada. Isso foi realizado para aumentar a precisão da análise tornando o modelo mais próximo da realidade, já que a versão de testes não permite a simulação do edifício inteiro e, assim, não possibilita inserir todas as influências das adjacências.

Por fim, vale ressaltar que os *component block* (blocos que não apresentam zonas térmicas internas, porém geram sombras e barreiras para a transferência de calor) foram utilizados para construir as adjacências externas dos macroblocos, como, por exemplo, lajes externas, paredes, e para representarem outras partes do edifício que não estavam sendo simuladas naquele momento. Tais estruturas só podem apresentar um material, assim elas foram construídas com o material mais significativo que o compõem. Como exemplo, pode-se observar o caso de uma parede externa, no qual o material foi definido como tijolo comum já que este configura a maior parte da parede.

4.2.3 Análise dos dados

4.2.3.1 Substituição de equipamentos de iluminação artificial

Para fins de organização dos dados, foi gerado um modelo para cada ambiente simulado. Todos os ambientes simulados geraram dois arquivos: um de modelagem, em formato .rdf; e um com os resultados gerados pelos cálculos luminotécnicos (resultado da simulação de cada ambiente), em formato .pdf. Todos esses resultados foram levados a uma tabela geral e depurados, de acordo com os parâmetros de qualidade luminotécnica estabelecida pela NBR ISO CIE 8995 e parâmetros de eficiência energética, de acordo com o RTQ-C (2010).

Quanto à qualidade de iluminação, os valores de referência (iluminância média e uniformidade) seguiram as indicações da NBR ISO CIE 8995 e, no que se refere à eficiência energética dos ambientes levantados e simulados, em termos de iluminação artificial, para fins de apreciação do nível de Densidade de Potência Instalada para Iluminação, conforme a etiqueta PROCEL, ambiente por ambiente, foram explorados os valores encontrados para o momento anterior e posterior às intervenções. É importante frisar que a análise de eficiência energética é um processo complexo. O que foi levantado aqui é o potencial dos ambientes em alcançar melhorias consideráveis, de acordo com parâmetros estabelecidos pelo RTQ-C, mediante o método das atividades do edifício.

De acordo com o RTQ-C, o método das atividades do edifício avalia separadamente os ambientes do edifício e deve seguir os passos de:

- identificar adequadamente as atividades encontradas no prédio, de acordo com parâmetros determinados pelo RTQ-C;
- consultar a densidade de potência de iluminação limite (DPIL - W/m^2) para cada nível de eficiência a cada uma das atividades (para atividades não listadas, deve-se escolher uma atividade equivalente);
- multiplicar a área iluminada de cada atividade pela DPIL, para encontrar a potência limite a cada atividade (a potência limite para o edifício será a soma das potências limites das atividades); e
- calcular a potência instalada no edifício e compará-la com a potência limite do edifício, identificando o equivalente numérico do sistema de iluminação.

Assim, por questões de limitação de dados e fornecimento e acesso a dados das edificações como um todo, foram realizadas as etapas a, b e c (sem calcular a potência limite do edifício), eximindo a etapa d em detrimento das limitações encontradas. A intenção é mapear o potencial de melhoria do DPIL por ambiente, para fins comparativos do momento anterior e posterior à execução deste projeto.

4.2.3.2 Substituição de equipamentos de ar-condicionado e consumo de energia elétrica

De forma a organizar os dados e calibrar as simulações termoenergéticas, foram simulados ambientes modelos, ou seja, ambientes representativos das edificações escolhidos para realizar modelagem e análise de dados detalhada, de modo que refletissem o consumo real de energia destes locais. Em seguida, os resultados obtidos foram extrapolados para as edificações como um todo.

Criaram-se três modelos no Designbuilder. O primeiro contemplando ambientes pontuais, o segundo contemplando os blocos das edificações e o último contemplando a edificação como um todo.

Para analisar os ganhos obtidos com a implementação do projeto de eficiência energética, foram simulados os cenários pré e pós-substituição dos equipamentos. O resultado obtido foi calculado a partir da subtração da curva de consumo da edificação antes e depois do projeto, de acordo com o método de cálculo presente no PIMVP.

O estudo apresentou as seguintes etapas:

- a. identificar os equipamentos utilizados em cada ambiente de estudo e suas características técnicas, como modelo, potência e COP;
- b. identificar a utilização e ocupação do ambiente;
- c. identificar as características da envoltória;
- d. realizar os cálculos teóricos de consumo de energia para comparação/calibração com os resultados da simulação termoenergética;
- e. realizar as simulações dos ambientes modelos, conforme os dados obtidos;
- f. extrapolar a calibração para edificação como um todo; e
- g. comparar os resultados das simulações com a medição *in loco*, realizada na instalação.

Apenas o item g não pode ser realizado no projeto, devido a limitações no tempo de execução.

4.3. Resultados

4.3.1 Substituição de equipamentos de iluminação artificial

Basicamente, o material adquirido por meio de consulta ao CEPLAN e INFRA UnB trata de peças técnicas, restritas à planta-baixa de ambas as edificações. Em verificação *in loco* foram percebidos diversos contrastes em relação à espacialização dos ambientes em planta e seus respectivos dimensionamentos. Essas divergências foram atualizadas ao máximo.

No total, o levantamento documental gerou dados para cerca de 146 ambientes, sendo 77 do edifício SG 11 (42 no Térreo e 35 no Pavimento Superior) e 69 no edifício da Faculdade de Tecnologia (54 no Térreo e 15 no Pavimento Superior).

Os ambientes visitados foram verificados de acordo com a destinação prevista nas peças técnicas disponibilizadas e, para fins de análise de qualidade de iluminação e eficiência energética, alinhadas em conformidade com a NBR ISO CIE 8995 e o RTQ-C (2010), divididas em ambientes de auditório, reunião, laboratório, escritório, sala de aula, sala de professor, copa, depósito e ambientes genéricos. Nesse sentido, por meio das informações coletadas e do volume de dados gerados, foram adotados cenários padrões representativos para a refletância dos ambientes. Para o edifício da FT, são propostas três composições:

- **Salas de Aula** – referindo-se aos ambientes destinados à prática docente;
- **Salas dos Professores** – ambientes destinados ao trabalho individualizado do corpo docente; e
- **Demais Ambientes (FT)** – que engloba todos os outros tipos de recintos simulados do prédio.

Já para o edifício do SG 11, houve a apreciação de uma composição mais uniforme, o que resultou na elaboração de um cenário único adotado como padrão, denominado Demais Ambientes (SG 11).

Em todos os casos, foi adotada uma estratégia de “pior cenário”, onde se buscou explorar composições de refletância mais depreciadas daquela tipologia específica. Isso permite obter resultados que, extrapolados, subestimam a qualidade da condição real de uso.

Para a simulação computacional de iluminação artificial via Relux, foram adotadas como dados de entrada (*inputs*) as informações contidas na Tabela 3.

Tabela 3. Dados de entrada para simulação computacional de iluminação artificial Relux

Geometria do ambiente	Área: variável de acordo com o ambiente
	Pé direito = 2.64 m
Refletâncias	Salas de Aula (FT) Piso (cor - marfim) = 71% Teto (gesso - branco) = 90% Paredes (cerâmica vermelha) = 30%
	Salas dos Professores (Ft) Piso (cor - marfim) = 71% Teto (gesso branco) = 90% Paredes (cerâmica vermelha) = 30%
	Demais Ambientes (Ft) Piso (cor - marfim) = 71% Teto (gesso branco) = 90% Paredes (cor - branca) = 85%
	Demais Ambientes (Sg11) Piso (cor - marfim) = 71% Teto (cor - branco) = 90% Paredes (divisória PVC) = 65%
Altura do plano de avaliação	0.75 m
Luminária	Luminária Tipo 1 Modelo de referência: ITAIM 3320 Quantidade de lâmpadas: 2 Tipo de lâmpadas: Tubular T8 (TIPO 01)
	Luminária Tipo 2 Modelo de referência: ITAIM 3581 Quantidade de lâmpadas: 4 Tipo de lâmpadas: Tubular T5 (TIPO 02)
Lâmpadas	Lâmpada Tipo 1 LED tubular T8 Potência 18W Fluxo Luminoso de 1800 lm
	Lâmpada Tipo 2 LED tubular T5 Potência 9W Fluxo Luminoso de 900 lm

Os tipos de lâmpadas (*vide* Tabela 3) foram alinhadas de acordo com o Termo de Referência elaborado para aquisição delas, por meio da equipe gestora deste projeto. Já as luminárias seguiram o modelo existente nos edifícios, verificado *in loco* e consultado junto à equipe INFRA e CEPLAN UnB acerca do modelo de referência, tendo em vista que a execução deste projeto não contempla a substituição destes equipamentos. Para simulação, esse modelo foi ajustado e aplicado.

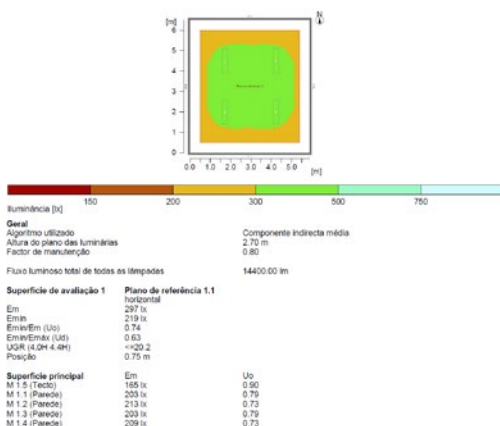
Os cálculos individualizados, de cada ambiente, levaram à produção de um documento com aproximadamente 13 páginas cada (para cada um dos 146 modelos simulados). Este documento contém o nível intermediário de informações geradas pelo *software* de simulação computacional. A Figura 13 exemplifica um desses documentos acerca do ambiente FT BT 85/23, do edifício FT, sendo que a Figura 13 (a) apresenta dados luminotécnicos gerais e a Figura 13 (b) trata das medições em *grid* (a cada 0.5 m), que permite mapear o comportamento luminoso no recinto.

Objecto : Simulações de Iluminação Artificial (FT)
Instalação : Substituição de lâmpada
Número do projecto: FT BT 85/23
Data : 06.04.2020

1 FT BT 85/23

1.2 Resumo, FT BT 85/23

1.2.1 Resumo dos resultados, Superfície de avaliação 1



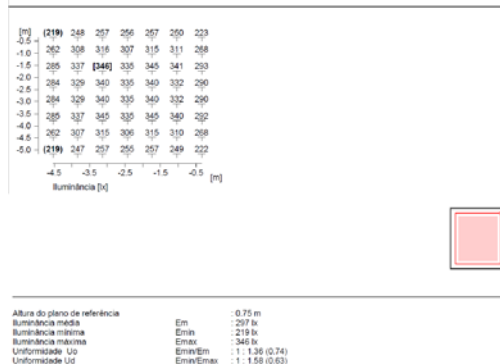
(a)

Objecto : Simulações de Iluminação Artificial (FT)
Instalação : Substituição de lâmpada
Número do projecto: FT BT 85/23
Data : 06.04.2020

1 FT BT 85/23

1.3 Resultados do cálculo, FT BT 85/23

1.3.1 Tabela, Plano de referência 1.1 (E)

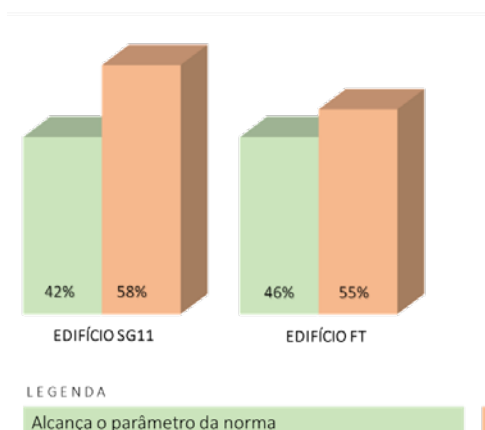


(b)

Figura 13. Parte do relatório de Iluminação artificial do ambiente FT BT 85/23. Fonte: Medeiros (2020)

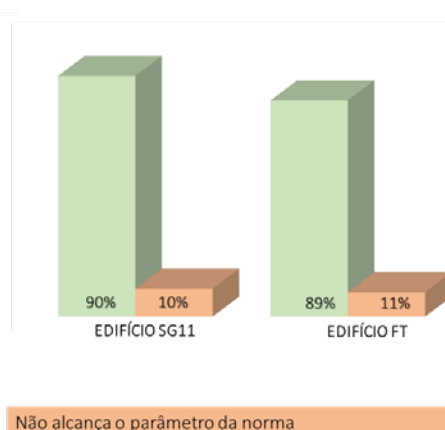
Em termos de qualidade de iluminação, é possível constatar que, mesmo após a substituição de lâmpadas dos ambientes, não há um nível ideal de iluminância média, apesar de resultados expressivos em termos de uniformidade. Apenas 44% de todas as salas analisadas (ambos os estudos de caso) alcançam a métrica da iluminância média determinada para ambientes de trabalho, conforme NBR ISO CIE 8995. A Figura 14 apresenta os percentuais verificados de cada edifício. Nota-se que o edifício FT apresenta uma condição um pouco melhor que o SG11.

Iluminância média nos ambientes analisados



(a)

Uniformidade nos ambientes analisados



(b)

Figura 14. Dados percentuais dos ambientes analisados acerca de iluminância média (a) e uniformidade (b). Fonte: Medeiros (2020)

Contudo, é preciso salientar que, neste estudo, os resultados obtidos por simulação de iluminação artificial desconsideram por completo a incidência de luz natural presente em muitos dos espaços investigados.

Outro fator relevante é que dos 56% dos ambientes que não alcançam a iluminância média prevista pela norma (87 salas), mais da metade (48 destas salas), apesar de não atingir os parâmetros normativos, chega em uma iluminância média próxima da recomendada e, ao extrapolarmos os resultados, pode-se entender que, com a colaboração da luz natural e diante das condições de refletância distintas das padronizadas para simulação, há potencial para resultados melhores.

Quanto à verificação da eficiência energética nos edifícios trabalhados, antes das intervenções, das 77 salas analisadas no edifício SG11, os dados eram de: 37 com DPIL equivalente à etiqueta nível "A"; 16 nível "B"; 8 nível "C"; 3 nível "D"; e 13 nível "E". Após a substituição das lâmpadas por equipamentos LED, de menor potência, os resultados foram: 68 salas com nível "A"; 5 nível "B"; 1 nível "C"; nenhuma sala com nível "D"; e 3 nível "E". Percentualmente, houve um salto de 40% no total de ambientes com DPIL equivalente à etiqueta nível "A" (de 48% para 88%).

Já o edifício FT apresentava anteriormente dados percentuais melhores do que os indicados pelo edifício SG11. Antes das intervenções, das 69 salas analisadas no edifício FT, os dados eram de: 50 com DPIL nível "A"; 10 nível "B"; 2 nível "C"; 3 nível "D"; e 4 nível "E". Após a substituição das lâmpadas, os resultados obtidos foram: 66 salas com nível "A"; 1 nível "B"; 2 nível "C"; e nenhuma sala com nível "D" e "E".

Em linhas gerais, acerca das ações do projeto por completo, em ambos os edifícios, dos dados luminotécnicos obtidos no levantamento documental e simulação computacional de iluminação artificial, os 146 ambientes analisados totalizavam os seguintes dados: 87 com DPIL nível "A"; 26 nível "B"; 10 nível "C"; 6 nível "D"; e 17 salas com nível "E". Após a substituição das fontes luminosas, esses números apresentam-se como: 134 salas nível "A"; 6 nível "B"; 3 nível "C", nenhum ambiente com nível "D"; e 3 nível "E". Foi uma melhoria de mais de 30% na obtenção de DPILs nível "A". A Figura 15 indica os percentuais anteriores e posteriores à execução do projeto.

Nível de eficiência energética do DPIL, com base nos dados do PBE EDIFICA (RTQ-C 2010)
Substituição das lâmpadas | Projeto de ambos os edifícios (SG11 + FT)

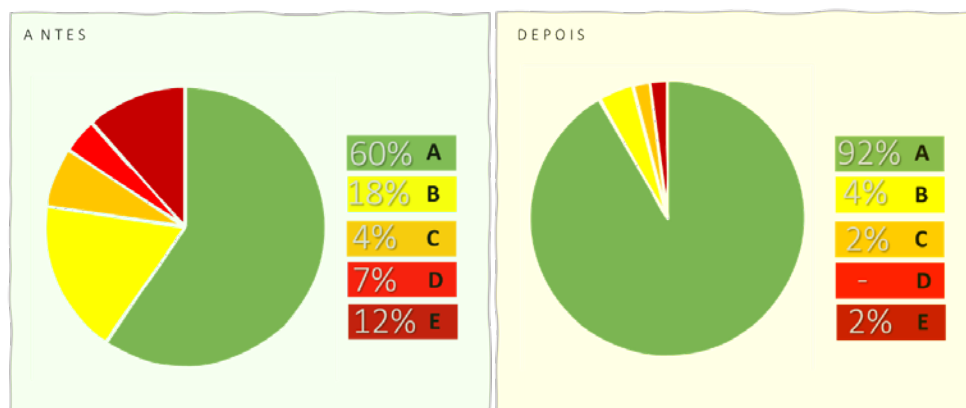


Figura 15. Dados percentuais dos ambientes analisados em ambos os edifícios, com fins de etiquetagem (simulação apenas para o sistema de iluminação). Fonte: Medeiros (2020)

4.3.2 Substituição de equipamentos de ar-condicionado e consumo de energia elétrica

Inicialmente, realizaram-se os cálculos teóricos para consumo de energia elétrica estimado dos ambientes modelo na simulação termoenergética para o momento pré-implantação do projeto. As lâmpadas utilizadas apresentam potência nominal de 32W, com um reator de potência 8W (fator de conversão 1,25), ou seja, para os cálculos pré-projeto, cada lâmpada detém potência composta de 36W. Para as simulações pós-implantações, foram utilizadas lâmpadas de LED, 18W cada, que dispensam reator.

Tabela 4. Economia de energia e redução de potência em ponta no sistema de iluminação

Resultados esperados antes do retrofit				
	Total	Sala de aula	Sala administrativa	Sala de professor
Consumo de energia (kWh)	4445,28	3024,00	967,68	453,60
Demanda em ponta (kW)	1,03	0,79	0,24	0,00
Resultados esperados depois do retrofit				
	Total	Sala de aula	Sala administrativa	Sala de professor
Consumo de energia (kWh)	2222,64	1512,00	483,84	226,80
Demanda em ponta (kW)	0,515	0,395	0,12	0,00
Resultados esperados: economia de energia				
	Total	Sala de aula	Sala administrativa	Sala de professor
Redução de demanda em ponta (RDP) (kW)	0,515	0,395	0,12	0,00
Porcentagem de RDP	50%	50%	50%	0%
Energia economizada (EE) (kWh/ano)	2222,64	1512,00	483,84	226,80
Porcentagem de EE	50%	50%	50%	50%

A economia de energia esperada alcança os 2,22 MWh/ano, representando algo em torno de 50% do consumo anual de energia elétrica na edificação. Além disso, observa-se uma redução da demanda de ponta de 0,515 kW, o que representa cerca de 50% desse sistema. Tais valores apresentam o potencial teórico estimado de economia que pode ser obtida no momento pós-implantação do projeto e foram comparados com valores medidos através da medição e verificação, métodos D, comentado mais à frente.

A partir da análise direta das substituições realizadas, a potência das lâmpadas LED corresponde à metade das lâmpadas fluorescentes preexistentes, de maneira que os resultados de EE e RDP, de 50%, indicam que a metodologia de cálculo apresenta resultados coerentes.

Para o sistema de condicionamento de ar, foi realizado procedimento análogo, obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 5. Ganhos teóricos da AEE no Sistema de Condicionamento Ambiental

Resultados esperados antes do <i>retrofit</i>				
	Total	Sala de aula	Sala administrativa	Sala de professor
Consumo de energia (kWh)	8925,16	5533,50	2319,40	1072,26
Demanda em ponta (kW)	0,99	0,82	0,17	0,00
Resultados esperados depois do <i>retrofit</i>				
	Total	Sala de aula	Sala administrativa	Sala de professor
Consumo de energia (kWh)	6309,54	3872,78	1699,23	737,53
Demanda em ponta (kW)	0,67	0,56	0,11	0,00
Resultados esperados: economia de energia				
	Total	Sala de aula	Sala administrativa	Sala de professor
Redução de demanda em ponta (RDP) (kW)	0,32	0,26	0,06	0,00
Porcentagem de RDP (%)	32,32%	31,70%	35,29%	0%
Energia economizada (EE) (kWh/ano)	2615,62	1460,72	620,17	334,73
Porcentagem de EE (%)	29,30%	26,39%	26,73%	31,21%

A economia de energia teórica estimada é de 2,61 MWh/ano, representando 29,3% de redução no consumo de energia elétrica do sistema. Além disso, detecta-se uma redução de demanda de ponta de 2,906 kW, que representa cerca de 69,15% da demanda pré-projeto. Tais resultados também estão presentes em medição e verificação, posteriormente descritos.

Quanto às simulações termoenergéticas, os ambientes propostos foram modelados e simulados, de modo a obter a estimativa de consumo de energia anual total do sistema de ar-condicionado. A Tabela 6 apresenta os valores alcançados:

Tabela 6. Consumo de energia simulado para sala de aula no período antes do *retrofit*

Parâmetro	Valor simulado
Consumo de energia dos equipamentos na sala de aula (kWh/a)	1388,20
Consumo de energia dos ares-condicionados (kWh/a)	5528,68
Consumo de energia da iluminação (kWh/a)	3026,54
Temperatura média na sala de aula (°C)	23,85

Podem-se observar valores levemente diferentes dos teóricos, com uma variação de 4,82 kWh/a do valor esperado. Esta variação é proveniente de erros de truncamento e da influência dos demais parâmetros programados no *software*. Tais diferenças representam uma incerteza de 0,087% em relação aos valores teóricos.

Vale ressaltar que o *software* também calcula o consumo de energia do sistema de iluminação. Estes resultados foram usados para obter os resultados da eficiência energética no sistema de iluminação. Tal eficiência está pautada na economia de energia e apenas os demais parâmetros do sistema de iluminação podem ser vistos na seção anterior. Também foi calculado o consumo de energia dos demais equipamentos presentes nas salas. Este consumo é um valor estimado a partir das cargas fixas dos ambientes, que foram levantadas durante as visitas técnicas, fazendo-se a ressalva de que não foi possível realizar o levantamento das instalações em sua totalidade.

De posse dos resultados, foi possível calcular a economia obtida. A tabela a seguir apresenta a economia para cada ambiente e a incerteza agregada.

Tabela 7. Resultados da economia de energia para as salas modelos

Ambiente	Economia Ar (kWh/a)	Incerteza (%)	Economia Iluminação (kWh/a)	Incerteza (%)
Sala de aula	1657,64	0,097	1513,27	0,117
Sala administrativa	625,41	0,365	484,4	0,160
Sala de professor	339,07	0,3348	226,24	0,330
Total	2622,12	0,504	2223,91	0,384

É possível observar que todas as incertezas se encontram dentro do intervalo de precisão estipulado. Além disso, a calibração realizada oferece resultados próximos aos cálculos teóricos, o que corrobora com sua validade.

Para cálculo da economia global, houve a expansão da calibração dos ambientes modelos para toda a edificação da FT, seguindo as considerações e levantamentos expostos. Seus resultados e calibrações serviram de base para construção do modelo completo da edificação.

Inicialmente realizaram-se os cálculos teóricos de consumo de energia para a edificação e, assim, foi possível criar uma tabela de economia de energia. A economia de energia esperada para o projeto de *retrofit* da iluminação é de 111,70 MWh/ano representando cerca de 50% do consumo anual de energia. Além disso, observa-se uma redução da demanda de ponta de 14,14 kW, o que representa cerca de 50,5% da potência de ponta deste sistema.

A economia de energia teórica esperada é de 103,58 MWh/ano representando cerca de 27,17% de redução no consumo deste sistema. Além disso, espera-se uma redução de demanda de ponta de 4,9 kW que representa cerca de 29,35% da demanda atual. A redução de demanda de ponta se mostra pequena neste caso, pois os únicos ares considerados em funcionamento no horário de ponta são os ares das salas de *rack* e salas que operam em regime de 14 horas. Desse modo, o número de aparelhos é pequeno e reflete a RDP apresentada. De posse dos cálculos teóricos para o consumo de energia do sistema, é possível realizar as simulações computacionais globais e comparar os resultados obtidos.

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos após a simulação das duas edificações, além de trazer a economia total obtida com o projeto de eficiência energética.

Tabela 8. Dados gerais

	FT (Antes)	FT (Depois)	SG11 (Antes)	SG11 (Depois)
Sistema de iluminação (MWh/ano)	222,9	109,94	122,72	57,51
Ar-condicionado (MWh/ano)	381,17	276,61	161,34	119,47
Economia de energia	217,52		107,08	

Assim, a economia total de energia obtida com o projeto alcança os 324,6 MWh/ano. Trabalhos futuros, pretende-se realizar a comparação entre este valor obtido pela simulação computacional com os resultados das medições da edificação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em termos da economia de energia obtida através do *retrofit* do sistema de iluminação e do sistema de condicionamento ambiental, a substituição dos equipamentos promoveu o aumento da eficiência energética da instalação. Ou seja, ela realiza a mesma atividade consumindo menos energia. Dentre as muitas formas possíveis de promover um processo de melhoria, essa economia foi possível com a troca de equipamentos por modelos modernos e mais eficientes, o que está alinhado com um dos métodos de efficientização de instalações apresentados no decorrer do capítulo.

Os resultados apresentados têm o objetivo de demonstrar como a simulação computacional pode ser utilizada em conjunto com projetos de eficiência energética, de forma a calcular seus resultados. Além disso, é uma ferramenta importante que permite identificar o estado atual da edificação e simular projetos de melhoria.

Em termos da tecnologia do sistema de ar-condicionado, não houve alterações entre o período anterior e posterior, já que uma das premissas de projeto foi realizar a substituição dos equipamentos por modelos similares, porém mais eficientes.

Ainda, foi possível observar o efeito interativo que a redução da potência do sistema de iluminação causa no consumo do sistema de condicionamento ambiental, mostrando que um projeto de eficiência energética deve ser integrado já que seus impactos não se limitam apenas ao sistema efficientizado. Em termos de qualidade lumínica, não havia levantamento sobre a situação anterior à execução do projeto; entretanto, pode-se afirmar que, baseando-se na deterioração observada nos equipamentos e modelos retirados, a substituição utilizou produtos com maior fluxo luminoso, e, desse modo, conclui-se que o projeto promoveu melhorias em termos quantitativos e qualitativos.

Contudo, as verificações ocorridas por meio de simulação computacional indicam que ainda há potencial de melhorias nas condições de qualidade lumínica em ambos os edifícios, SG11 e FT. Mantendo a base referencial da NBR ISO CIE 8995, que trata da iluminação em ambientes de trabalho, 56% dos ambientes simulados não alcançam os níveis de iluminância requeridos. Deve-se, entretanto, observar que as simulações realizadas não exploram o potencial de aproveitamento da luz natural, o que é significativo durante o horário de funcionamento desses edifícios (das 8 às 22 horas).

Numericamente, avaliando a Densidade de Potência Instalada para fins de Iluminação dos 146 ambientes verificados, de acordo com o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), houve um aumento de 32% na quantidade de salas que passaram para o nível "A" de eficiência energética. Nessas 146 salas, os resultados gerais após a substituição das fontes luminosas são: 134 salas nível "A"; 6 nível "B"; 3 nível "C", nenhum ambiente com nível "D"; e 3 nível "E".

É válido comentar que o resultado das simulações realizadas pode ser extrapolado para cálculos mais substanciais no edifício da FT. As salas de aula e salas de professores foram representadas, cada, por um único modelo representativo.

Apesar de não aprofundado, desde a execução do projeto houve alguns sinais que indicam um retorno dos usuários em relação às ações implementadas pelo Projeto de Eficiência Energética e Minigeração na Universidade de Brasília. Mediante entrevistas não sistematizadas a usuários frequentes de ambos os edifícios, houve um retorno positivo em relação às ações de iluminação artificial. A percepção de algo novo foi notável, e a questão com o ofuscamento, algo que era de grande preocupação na elaboração do projeto, não foi relatado. De fato, a ausência desse fenômeno, em escala significativa, já era prevista pelas simulações de iluminação artificial.

Outro fator presente no *feedback* das ações implementadas relaciona-se à temperatura de cor. As lâmpadas instaladas anteriormente detinham um tom mais quente, algo em torno de 3000 K. Já após a substituição, é possível verificar a utilização de equipamentos com tom mais frio (a indicação da temperatura de cor no Termo de Referência era de 6000 K). Essa escala encontra-se de acordo com as questões de adequação e conforto aos ambientes laborais (salas de aula, professores, reuniões e laboratórios, por exemplo). Recordando questões supracitadas, esse aspecto da luz está relacionado com a sensação de atenção e estímulo.

Tratando das questões que lidam com o projeto em si, é importante comentar as limitações impostas pelo formato do projeto. Ater-se à substituição de equipamentos, sem tratar de circuitos elétricos, pequenas alocações, reparos e troca de equipamentos adjacentes (como as luminárias), desperdiça resultados mais significativos ainda. Conforme visto, questões que englobam o ambiente térmico e luminoso são amplas e complexas, sendo limitante tratar apenas da substituição de equipamentos unitários.

No que tange ao sistema de climatização, houve uma melhoria significativa em relação ao consumo de energia e conforto térmico, visto que os aparelhos substituídos foram adquiridos considerando a carga térmica e atividades desenvolvidas nos ambientes instalados.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-1:2005 Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades*, 2005.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-2:2005 versão corrigida 2008 Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*, 2008.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16401:2008 Instalações de Ar-Condicionado Sistemas Centrais e Unitários*, 2008.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE)*, Brasília, DF, 2018.
- [5] AGUIAR, V.; BUENO-BARTHOLOMEI, C. *Conforto luminoso no ambiente escolar: níveis de iluminância para escolas públicas em Álvares Machado (SP)*. ENTAC 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/>>. Acesso em: 12 de abril de 2019.
- [6] AKUTSO, M. *Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil*. 1998. Tese de Doutorado na Escola de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- [7] AMORIM, C.N.D. *Diagrama Morfológico - Parte I: instrumento de análise e projeto ambiental com uso de luz natural*. Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo, [s.l.], n. 3, pp.58-77, 31 dez. 2007. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo - Universidade de Brasília, Brasília, DF. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n3.2007.12111>>.
- [8] ARMINES, F. et al. *Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems. conditioning systems. Final report of Task 7th*. 2012, França. Available at: <https://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Working_Documents/Task_7_Lot_6_Air_Conditioning_Final_report_July_2012.pdf>. Acesso em: 8 de abril de 2019.

- [9] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *Handbook of Fundamentals*, 2017, Nova Iorque, EUA.
- [10] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal environmental conditions for human occupancy*. 2017, Atlanta, EUA.
- [11] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *Standard 100-2018 - Energy Efficiency in Existing Buildings*. 2018, Atlanta, EUA.
- [12] ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *Standard 90.1-2016 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. 2016, Atlanta, EUA.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15215: Iluminação natural*. Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO/CIE 8995: Iluminação de ambientes de trabalho*. Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2003.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15.575: Edificações Habitacionais - Desempenho*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2013.
- [17] AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. V. *Thermal comfort*. 1997. PLEA NOTES, Passive and Low Energy Architecture International, Universidade de Queensland, Brisbane, Australia.
- [18] BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. *Ventilação Natural em Edificações*. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobrás, 2010. 101 p. (PROCEL - PBE Edifica).
- [19] CASTRO, A. P. A. S. et al. *Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral*. Ambiente Construído, Porto Alegre, RS, v. 3, n. 2, pp. 69-76, 2003.
- [20] CLARKE, J. A.; HENSEN, J. L. M. *Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements*. *Building and Environment*. 2015.
- [21] CUTTLE, C. (1971). *Lighting Patterns and the Flow of Light*. *Lighting Research & Technology*, 3(3), pp. 171-189.
- [22] DUBOIS, M. et al. *Performance Evaluation of Lighting and Daylighting Retrofits: Results from IEA SHC Task 50*. *Energy Procedia*, [s.l.], v. 91, pp. 926-937, Jun. 2016. Elsevier BV. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.259>>.
- [23] EDWARDS, B. *O Guia Básico para Sustentabilidade*. São Paulo: G. Gili, Ltda, 2013. 226 p.
- [24] EUROPEAN STANDART. *EN 17037: Daylight in buildings*. Cen., 2018.
- [25] FANGER, P. O. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. 1972. McGraw-Hill, Nova Iorque, EUA.
- [26] FERNANDES, J. T.; AMORIM, C. N. D.; SOUSA, J. A. B. *Lighting and daylighting quality: critical review of criteria and recommendations and its insertion in brazilian context*. *Proceedings of CIE Centenary Conference: Towards a New Century of Light*, Paris, França, 2013.
- [27] FERREIRA, F. D.; MARQUES, T. H. T. *Carga Térmica: Princípios básicos*. 2018, Coleção Fundamentos, Departamento de Engenharia Mecânica da POLI-USP. Publicado no Portal Engenharia e Arquitetura da Nova Técnica Editorial. São Paulo, SP, Brasil.
- [28] FONSECA, J. J. S. *Metodologia da pesquisa científica*. Fortaleza, CE: UEC, 2002.
- [29] GALASIU, A. D.; REINHART, C. F. *Current daylighting design practice: a survey*. *Building Research & Information*, [s.l.], v. 36, n. 2, pp. 159-174, Mar. 2008. Informa UK Limited. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1080/09613210701549748>>.
- [30] GALASIU, A. D.; VEITCH, J. A. *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review*. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 38, n. 7, pp. 728-742, Jul. 2006. Elsevier BV. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.001>>.
- [31] GHIAUS, C.; ALLARD, F. *Potential for free-cooling by ventilation*. *Solar Energy*, [s.l.], v. 80, n. 4, pp. 402-413, br. 2006. Elsevier BV. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.019>>.
- [32] GUERRINI, D. *Iluminação - Teoria e Projeto*. São Paulo, SP: Editora Érica, 2007.
- [33] HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. *Building Performance Simulation and Operation*, New York, EUA: Spon Press, 2011.
- [34] HEYWOOD, H. *101 Regras básicas para uma arquitetura de baixo consumo energético*. São Paulo, SP: Editora GG, 2015.

- [35] HONORATO, J. P. A., *Medição e verificação: uma análise da utilização de simulação computacional para avaliar os resultados da eficiência energética*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília, 2019, Brasília, DF.
- [36] HUMPHREYS, M. A. *Field studies of thermal comfort compared and applied*. in: *Building Research Establishment Current Paper*. 1975. Watfort, Reino Unido.
- [37] IEA - International Energy Agency, SHC. *Task 50: Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings. Subtask D: Monitoring protocol for lighting and daylighting retrofits*, 2016. Available at: <http://task50.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Technical_Report_T50_D3_final.pdf>. Acesso em: 29 de setembro de 2019.
- [38] IEA - International Energy Agency, SHC. *Task 61: Integrated Solutions for Daylight and Electric Lighting. Subtask A: User perspective and requirements*, 2019. Available at: <<http://task61.iea-shc.org/subtasks>>. Acesso em: 29 de setembro de 2019.
- [39] IEA (Org.). *D.2 - Monitoring Protocol and Commissioning Guide*. S.I: IEA SHC, 2019. (IEA SHC Task 61 / EBC Annex 77: Integrated Solutions for Daylighting and Electric Lighting). Edited: OSTERHAUS, W., GENTILE, N.
- [40] INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. *Programa Brasileiro de Etiquetagem*. 2019. Disponível em: <https://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php>. Acesso em: 29 de março de 2019.
- [41] JOHNSON, K.; WATKINS, R. (ed.). *Daylight in Buildings: ECBCS Annex 29 / SHC Task 21 Project Summary Report*. Hertfordshire: Aecom Ltd, 2010. 50 p. Available at: <https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_29_PSR.pdf>. Acesso em: 12 julho de 2019.
- [42] KEELER, M.; BURKE, B. *Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis*. Porto Alegre, RS: Bookman, 2010, 362 p.
- [43] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. Rio de Janeiro, RJ: PROCEL, 2014.
- [44] LAMBERTS, R.; NARANJO, A. *Desempenho Térmico de Edificações*. 2007, Florianópolis, SC, Brasil.
- [45] MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. E. R. *Incidência das variáveis projetivas e de construção não consumo energético dos edifícios*. 1992, Sagra DC Luzatto, segunda edição. Porto Alegre, RS, Brasil.
- [46] MASCARÓ, L.R. *Energia nas edificações*. São Paulo, SP: Projeto Editores Associados, 1991.
- [47] MEDEIROS, A.D. (2020). *Relatório de Iluminação Artificial*. Projeto de Eficiência Energética e Minigeração na Universidade de Brasília. Abril, 2020. Brasília, DF.
- [48] NARDELLI, T. *Métodos para o cálculo de Carga Térmica*. 2018, Coleção Fundamentos, Departamento de Engenharia Mecânica da POLI-USP. Publicado no Portal Engenharia e Arquitetura da Nova Técnica Editorial. São Paulo, SP, Brasil.
- [49] OLIVEIRA, M. *Como fazer pesquisa qualitativa*. São Paulo, SP: Vozes, 2016.
- [50] OSRAM. *Manual luminotécnico prático*. Disponível em: <<https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf>>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019.
- [51] PBE EDIFICA. RTQ-C: *Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos*. Brasília, DF: PROCEL Edifica, 2010.
- [52] PILOTTO NETO, E. *Cor e Iluminação nos Ambientes de Trabalho*. São Paulo, SP: Ciência e Tecnologia - 1980. PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica).
- [53] PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. *Sistemas de Ar Condicionado*. 2011, Rio de Janeiro, RJ.
- [54] RHEINGANTZ, P. A. et al. *Observando a qualidade do lugar: Procedimentos para a avaliação pós ocupação*. Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2009, 119 p., (PROARQ).
- [55] SCHMID, A. L. *A ideia de conforto: Reflexões sobre o ambiente construído*. Curitiba, PR: Pacto Ambiental, 2005, 339 p.
- [56] SIDDADAWAY, A. P.; WOOD, A. M.; HEDGES, L. V. *how to do a systematic review: a best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses*. Annual Review Of Psychology, [s.l.], v. 70, n. 1, pp. 747-770, 4 Jan. 2019. Annual Reviews. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>>.
- [57] SILVEIRA, D. T.; CORDOVA, F. P. *A pesquisa científica*. In: GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Org.). *Métodos de Pesquisa*. Porto Alegre, RS: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2009, pp. 31-42.

- [58] TREGENZA, P.; MARDALJEVIC, J. *Daylighting buildings: Standards and the needs of the designer*. Lighting Research & Technology, [s.l.], v. 50, n. 1, pp. 63-79, Jan. 2018. SAGE Publications. Available at: <<http://dx.doi.org/10.1177/1477153517740611>>.
- [59] VEITCH, J.; NEWSHAM, G. *Determinants of Lighting Quality II: Research and Recommendations*. Lighting Research & Recommendations. Canadá: National Research Council of Canada, 1996.
- [60] VEITCH, J.; CHRISTOFFERSEN, J.; GALASIU, A. D. *What we know about window and well-being and what we need to know*. NRC, 2013. NRC Publications Archive.
- [61] VEITCH, J.; GALASIU, A. D. *The physiological and psychological effects of windows, daylight and view at home: review and research agenda*. [s.l.]: NRC Construction, 2012. NRC Publications Archive.
- [62] VEITCH, J. A. *Lighting for well-being: a revolution on lighting?* In: 2nd CIE Expert Symposium on Lighting And Health, 2, 2006, Ottawa. Proceedings. Viena, Áustria: CIE, 2006. v. 13, pp. 56-61.
- [63] VOORDT, T. J. M.; VAN WEGEN, H. B. R. *Arquitetura sob o olhar do usuário*. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2013, 380 p. Tradução: Beatriz de Medina.
- [64] TREGENZA, P.; LOE, D. *Projeto de Iluminação*. Porto Alegre, RS: Bookman, 2015.

CAPÍTULO 3

Aspectos da Implantação de Sistema de Geração Solar Fotovoltaico na Universidade de Brasília

Alex Reis

Loana Nunes Velasco

Francisco Assis Lima

Mateus de Sordi

Felipe Tadeu Silva Viana Stemler

Yuri Tadeu Silva Viana Stemler



OBJETIVO

Elencar um conjunto de critérios para subsidiar o planejamento, implantação e operação de uma planta fotovoltaica, levando-se em consideração o ciclo de vida da instalação.

Apresentar experiências na implantação de sistema solar fotovoltaico na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

1. INTRODUÇÃO

O presente documento se insere no âmbito das ações do Projeto de Eficiência Energética (PEE) intitulado “Eficiência Energética em Prédios Públicos da Universidade de Brasília”, o qual é resultante de acordos de cooperação celebrados entre a Fundação Universidade de Brasília (FUB), Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec) e CEB Distribuição. Tal projeto se vincula à Chamada Aneel n.º 001/2016 – Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Dentre as diversas ações previstas e executadas no PEE, realizou-se a instalação de um sistema de geração solar fotovoltaica de 150 kWp nos prédios da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB).

Nesse contexto, este capítulo tem por objetivo descrever as experiências associadas à implantação deste sistema de geração. Este documento possui a seguinte estrutura:

- a seção 2 elenca um conjunto de critérios que subsidiam o planejamento, implantação e operação de uma planta fotovoltaica. Os critérios tendem a observar as diversas fases do ciclo de vida da instalação e se apresentam como elementos referenciais para a adoção de ações específicas sobre o sistema;
- a seção 3 descreve as premissas utilizadas para o processo de licitação do sistema fotovoltaico;
- a seção 4 apresenta características do projeto implantado;
- a seção 5 apresenta informações sobre o desempenho da instalação fotovoltaica, sob a ótica do projeto e da operação. São comparadas informações acerca da expectativa de produção de energia, a qual foi obtida por simulação do sistema no *software Helioscope*, e os dados obtidos ao longo do funcionamento do sistema; e
- por fim, a seção 6 apresenta considerações finais sobre o capítulo.

2. DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Esta seção apresenta um conjunto de diretrizes que serão tomadas como referência para o desenvolvimento de projetos de micro e minigeração solar fotovoltaico. Tais critérios abrangem todo o ciclo de vida da instalação e se apresentam como elementos referenciais para subsidiar a tomada de decisão e verificação de conformidade de produtos e serviços [1] [2] [3]. Nesse contexto, as seguintes fases de um sistema fotovoltaico são consideradas:

- levantamento de necessidades e planejamento do projeto de sistema fotovoltaico;
- elaboração do projeto executivo de sistema fotovoltaico;
- aquisição, montagem e comissionamento de instalações fotovoltaicas;
- operação e manutenção;
- *retrofitting* de instalações; e
- desmonte e descarte de equipamentos.

2.1 Levantamento de Necessidades e Planejamento do Sistema Fotovoltaico

A primeira fase do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico compreende o levantamento de necessidades e planejamento do projeto. Esta etapa deve ser norteada pela obtenção de requisitos e informações necessárias para subsidiar a execução das etapas subsequentes de projeto. Nesse sentido, as seguintes atividades podem integrar esta fase:

- identificar local de instalação dos equipamentos que perfazem o sistema fotovoltaico, tais como módulos, inversores e acessórios;
- identificar orientação dos painéis fotovoltaicos e possíveis soluções para estrutura de sustentação e fixação dos módulos;
- identificar o ponto de acoplamento do sistema fotovoltaico à rede elétrica;
- realizar o levantamento de documentos que subsidiem a elaboração do projeto, tais como pranchas e memoriais de projeto elétrico, arquitetônico e estrutural. Em alguns casos, os projetos de cabeamento estruturado, instalações hidrossanitárias, dentre outros, podem se fazer necessários, tendo em vista a necessidade de compatibilizar a implantação do sistema fotovoltaico com instalações já existentes;
- elaborar plano de gerenciamento do projeto fotovoltaico, definindo seus diversos componentes, tais como:
 - ▷ Termo de Abertura do Projeto (TAP);
 - ▷ Estrutura Analítica de Projeto (EAP) ou *Work Breakdown Structure* (WBS);
 - ▷ gestão de tempo: definir atividades e seu sequenciamento, bem como elaborar o cronograma;
 - ▷ gestão de custos: realizar estimativa de custos e orçamentos para a realização do projeto;
 - ▷ recursos humanos: alocar recursos humanos capacitados para a execução das atividades que compõem o projeto;
 - ▷ riscos: realizar levantamento de riscos para a execução do projeto e definição de plano de contingências.

Como resultado desta etapa de levantamento de informações, sugere-se a elaboração de um “Termo de Referência” do sistema fotovoltaico. Este documento consiste em um memorial descritivo com requisitos para a elaboração do projeto elétrico, levando-se em conta evidências verificadas no levantamento de necessidades e planejamento da instalação.

2.2 Elaboração do Projeto Executivo de Sistema Fotovoltaico

Com base no levantamento de necessidades, procede-se à elaboração do projeto do sistema fotovoltaico. Esta etapa se baseia na elaboração de cálculos e desenhos técnicos, bem como a adoção de soluções de engenharia, que garantam o funcionamento do sistema dentro dos requisitos mínimos de desempenho; não proporcionem riscos à saúde e segurança dos usuários; assegurem baixos impactos no ambiente; e flexibilizem a utilização, expansão e integração de novas tecnologias. Nesse sentido, as seguintes atividades podem integrar esta fase:

- selecionar metodologias de cálculo e fatores de sobrecarga para a elaboração do projeto das estruturas metálicas de suporte dos módulos fotovoltaicos;
- avaliar local de instalação/fixação de estruturas metálicas de suporte dos módulos fotovoltaicos, de forma a validar a suportabilidade destes elementos à sobrecarga ocasionada pelo conjunto estrutura e módulos;
- caracterizar metodologias de cálculo, fatores de correção e critérios de escolha para a elaboração do projeto de instalações elétricas [4];
- identificar ferramentas computacionais para subsidiar a elaboração do projeto. Tais ferramentas podem subsidiar os cálculos de expectativa de produção de energia, a definição de *layout* de disposição de módulos fotovoltaicos e equipamentos de instalações elétricas;
- elaborar desenhos técnicos, especificando a alocação de equipamentos e detalhes de montagem dos dispositivos; e
- verificar os critérios para acesso ao sistema de distribuição, fornecidos em normas técnicas da concessionária de distribuição de energia elétrica. Em alguns casos, além do projeto do sistema de geração, pode ser necessária a elaboração de estudos de acesso (fluxo de potência, qualidade de energia, dentre outros) ou a adoção de equipamentos suplementares (filtros harmônicos, dispositivos para regulação de tensão etc).

Tendo por base as atividades deste ciclo de desenvolvimento, espera-se que os seguintes documentos sejam produzidos:

- planta geral do sistema de geração fotovoltaico, indicando a disposição dos módulos fotovoltaicos, inversores e outros componentes (cabos, caixas de junção, sistemas de medição etc) que perfazem a instalação;
- diagramas unifilares, contendo conexões elétricas entre módulos fotovoltaicos; caixas de junção e inversores; conexão entre inversores e quadros gerais de baixa tensão. Os diagramas unifilares devem conter as especificações e características dos componentes da instalação;
- lista dos materiais empregados na planta fotovoltaica, e seus respectivos quantitativos, indicando a marca e modelo. Os catálogos técnicos de todos os equipamentos deverão acompanhar a lista de materiais;
- detalhamento dos locais de instalação dos inversores, contendo sua disposição e a indicação de janelas, portas, eletrocalhas e/ou eletrodutos e outros itens pertinentes;

- memorial de cálculo do projeto elétrico, indicando os critérios para formação de *strings* de módulos fotovoltaicos, escolha de seção de cabos, definição de dispositivos de proteção, dentre outros;
- análise estrutural das coberturas ou outros locais, em que serão instalados os módulos fotovoltaicos;
- memorial de cálculo do projeto das estruturas de sustentação e fixação dos módulos fotovoltaicos;
- projeto do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento para a planta fotovoltaica; e
- Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) do projeto.

Os documentos e normas técnicas utilizados como referência para esta etapa são:

- ABNT NBR 16690:2019 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto [5];
- ABNT NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho [6];
- ABNT NBR 5410:2008 – Instalações elétricas em baixa tensão [7];
- ABNT NBR 5419:2015 – Proteção contra descargas atmosféricas [8];
- Norma Regulamentadora n.º 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade; e
- Resolução Normativa Aneel n.º 482/2012 e suas atualizações [9] [10] [11].

2.3 Aquisição, Montagem e Comissionamento de Instalações Fotovoltaicas

Com base no projeto executivo, procede-se às etapas subsequentes voltadas para a aquisição, montagens e comissionamento de instalações fotovoltaicas. Nesse sentido, as seguintes atividades podem integrar esta fase:

- realizar a especificação técnica de equipamentos;
- prever a utilização de equipamentos que atendam a critérios estabelecidos em normas técnicas nacionais e internacionais;
- identificar fornecedores de equipamentos e prazos de entrega de materiais;
- avaliar as garantias dos serviços e equipamentos e os meios de acionamento de suporte técnico. Em função de prazos para execução de atividades de suporte técnico, pode ser necessário prever peças de reposição, as quais podem ser obtidas durante a aquisição de material do sistema fotovoltaico;
- acompanhar e garantir a execução das montagens de forma fidedigna ao projeto executivo, assegurando atendimento a normas técnicas, regulamentações e dados do fabricante;
- elaborar planos de comissionamento da instalação; e
- atualizar o projeto do sistema, no formato "*as built*";

Tendo por base as atividades desta fase do ciclo de vida do projeto, esperam-se os seguintes elementos:

- fornecimento de módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas de sustentação e fixação de painéis e infraestrutura de montagem;
- todos os materiais elétricos e acessórios necessários para as montagens dos circuitos em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA);
- materiais e peças de reposição necessários para realizar trabalhos de operação e manutenção;
- cronograma com especificação de garantias do sistema, com detalhamentos que abrangem os materiais, equipamentos e serviços;
- documentação do projeto no formato “*as built*” e o “Prontuário de Instalações Elétricas”; e
- memorial descritivo contendo a metodologia e resultados do comissionamento da instalação.

Os documentos e normas técnicas utilizados como referência para esta etapa são:

- ABNT NBR 16690:2019 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto;
- ABNT NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho;
- ABNT NBR 16612:2020 - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - Requisitos de desempenho;
- ABNT NBR 16149:2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;
- ABNT NBR 16150:2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade;
- ABNT NBR 5410:2008 – Instalações elétricas em baixa tensão;
- ABNT NBR 5419:2015 – Proteção contra descargas atmosféricas;
- IEC 62446-1 – *Photovoltaic (PV) Systems - Requirements For Testing, Documentation And Maintenance - Part 1: Grid Connected Systems - Documentation, Commissioning Tests And Inspection*;
- Norma Regulamentadora n.º 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade;
- IEC 61215:2016 - *Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements*;
- IEC 61730:2016 – *Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction*;
- IEC 61727:2004 – *Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface*;
- IEC 62116:2014 – *Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures*;
- EN 50521:2008 – *Connectors for photovoltaic systems - Safety requirements and tests*;
- Cadastros de módulos fotovoltaicos e inversores no Inmetro e no Programa PROCEL; e
- Catálogos de equipamentos fornecidos pelos fabricantes.

2.4 Operação e Manutenção das Instalações Fotovoltaicas

Na sequência, iniciam-se as etapas de operação e manutenção da instalação. Nesse sentido, as seguintes atividades podem integrar esta fase:

- acompanhar a produção de energia da planta fotovoltaica;
- garantir a operação dos equipamentos dentro das condições nominais; e
- elaborar e executar plano de manutenção periódica do sistema fotovoltaico.

Tendo por base as atividades desta fase do ciclo de vida do projeto, esperam-se as seguintes evidências projetuais:

- elaboração de mecanismo para acompanhamento da instalação fotovoltaica, de modo a evidenciar se a produção de energia está em consonância com as previsões do projeto. Tais mecanismos abrangem sistemas supervisórios de gestão energética, os quais integram as unidades inversoras ou podem ser inseridos na instalação; e
- avaliação do funcionamento dos equipamentos, de forma a caracterizar sua operação dentro das características nominais;
- definição de base de dados que subsidiem os trabalhos de manutenção corretiva e preventiva, tais como ficha característica e histórica de equipamentos, catálogos etc; e
- avaliação de sistemas que viabilizem a manutenção preditiva de equipamentos de instalações fotovoltaicas.

Os documentos de referência para esta etapa são:

- Norma Regulamentadora n.º 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade; e
- catálogos de equipamentos fornecidos pelos fabricantes.

2.5 Retrofitting de Instalações Fotovoltaicas

Ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico, pode ser necessária a realização de ações de *retrofitting* da instalação, de modo a garantir a continuidade de operação, viabilizar a inclusão de novas tecnologias e/ou modernizar o sistema. Nesse sentido, as seguintes atividades podem integrar esta fase e subsidiar o planejamento de longo prazo da instalação:

- prever a substituição de equipamentos ao longo da vida útil do sistema; e
- prever a inclusão de novas tecnologias que favoreçam o aumento da produção.

Tendo por base as atividades desta fase do ciclo de vida do projeto, esperam-se as seguintes evidências projetuais:

- plano de *retrofitting* da instalação, descrevendo ações a serem realizadas na aquisição, montagem e substituição de equipamentos elétricos. Tal ação toma por base o tempo de vida útil esperado para os diversos equipamentos que perfazem a instalação, e possibilitam o planejamento de ações no médio e longo prazo.

Os documentos de referência para esta etapa são:

- catálogos de equipamentos.

2.6 Desmonte e Descarte de Equipamentos

Ao longo do ciclo de vida do sistema fotovoltaico, diversas ações de desmonte e descarte de equipamentos são necessárias, em função da montagem, operação e manutenção da instalação. Nesse sentido, esta fase deve levar em consideração as seguintes atividades:

- realizar o desmonte e descarte de equipamentos de acordo com as legislações ambientais; e
- identificar a disponibilidade de planos de logística reversa de equipamentos (quando existentes) para descarte de materiais.

Tendo por base as atividades desta fase do ciclo de vida do projeto, esperam-se os seguintes documentos:

- plano de desmonte e descarte de produtos, comprovando o atendimento ao planejamento de coleta, armazenamento e tratamento dos resíduos; e
- identificação de empresas que possuam certificação para recebimento e descarte de materiais da instalação fotovoltaica.

Os documentos de referência para esta etapa são:

- Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

3. ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Esta seção descreve os requisitos técnicos mínimos a que a planta fotovoltaica e seus componentes devem atender, os quais foram utilizados para a especificação e elaboração de termo de referência para licitação do sistema.

3.1 Local da Instalação

A área disponível para a instalação dos módulos fotovoltaicos corresponde à cobertura dos prédios da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília, conforme Figura 1.

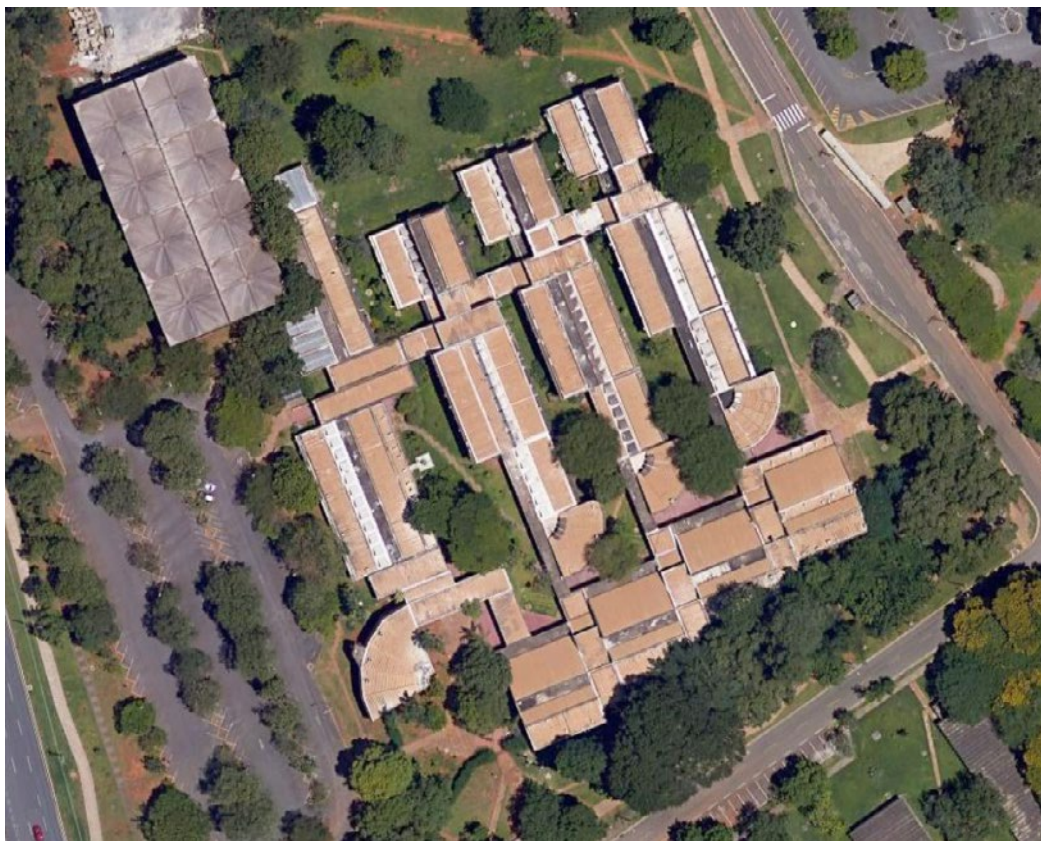


Figura 1. Faculdade de Tecnologia – UnB. Fonte: *Google Maps*

A Faculdade de Tecnologia (FT) foi fundada em 1964 e se localiza no Campus Universitário Darcy Ribeiro. As edificações que abrigam esta unidade acadêmica foram projetadas por Érico Paulo Siegmar Weidle e Adilson Costa Macedo, com construção entre 1974 e 1977 e inauguração em 1978. O conjunto é composto por um prédio principal, formado por blocos intercalados de jardins, e três blocos independentes. O edifício FT é marcado pelo caráter da prática docente, além da secretaria dos cursos, laboratórios e espaços destinados a sala de professores, sendo fortemente ocupado por salas de aula. A FT oferece regularmente dez cursos de graduação em engenharia e dez programas de pós-graduação em nível de mestrado acadêmico e de doutorado.

3.2 Serviços Prestados – Requisitos Técnicos Mínimos

Os serviços prestados pela empresa fornecedora do sistema fotovoltaico se resumem em:

- elaboração de projeto executivo: composto por plantas de implantação e detalhamentos de instalação de equipamentos do sistema, listas de materiais com respectivos quantitativos e memorial de cálculo. A configuração do sistema fotovoltaico foi simulada em *software* para estimar a quantidade de energia que o sistema produziria;
- fornecimento de materiais: caracterizado pelo fornecimento de módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas metálicas de sustentação e equipamentos elétricos para a implantação do sistema;
- montagem mecânica: constituída pela montagem das estruturas de suporte de módulos, fixação de módulos fotovoltaicos e outros componentes elétricos que perfazem o sistema;
- montagem de instalações elétricas: serviço de instalação de elementos em circuitos de corrente contínua e alternada, bem como etiquetagem do sistema;
- elaboração de documentação técnica do projeto; e
- comissionamento e avaliação de desempenho.

3.3 Estrutura Metálica – Requisitos Técnicos Mínimos

Os requisitos gerais da estrutura metálica para fixação e sustentação dos módulos fotovoltaicos são:

- as estruturas de apoio e sustentação dos módulos fotovoltaicos devem estar projetadas para resistir ao peso dos módulos fotovoltaicos associado a seus acessórios de fixação, bem como a ventos de, no mínimo, 120 km/h. Estes mesmos critérios devem ser aplicados para os pontos de fixação da estrutura na edificação e pontos de fixação da estrutura aos módulos fotovoltaicos;
- as estruturas de suporte e posicionamento devem ser feitas de alumínio ou aço galvanizado e deverão atender ao requisito de duração (vida útil) de 25 anos. Os procedimentos de instalação devem preservar a proteção contra corrosão, considerando ambientes classificados igual ou maiores que C4, em conformidade com ISO 9223:2012. Isto também é aplicável aos parafusos, porcas e elementos de fixação em geral;
- é de responsabilidade do fornecedor da estrutura a análise de suportabilidade de carga das edificações em que serão instalados os sistemas fotovoltaicos. Caso necessário, dever-se-ão realizar as adequações necessárias;
- suportes, ganchos e parafusos deverão ser de material inoxidável e sua especificação deverá garantir que a junção de dois materiais não levará à ocorrência de corrosão galvânica;
- as estruturas metálicas deverão estar com todos os acabamentos realizados antes da instalação dos módulos;

- a estrutura de suporte deve garantir que os módulos sejam instalados lado a lado, na posição vertical (“retrato”), formando fileiras. A estrutura metálica deverá possuir inclinação de 15°, preferencialmente direcionada para o norte geográfico, com o espaçamento entre fileiras, de modo a não produzir sombreamentos nos módulos;
- a disposição das estruturas não deve perturbar a passagem da equipe de manutenção dos módulos fotovoltaicos;
- a instalação da estrutura de suporte deverá ser realizada de forma a garantir a estanqueidade, não permitindo o acúmulo de água;
- os furos e as aberturas, realizados em lajes, telhas ou outro elemento da edificação para fixação de estruturas de suporte ou passagem de eletrodutos e eletrocalhas, deverão receber vedação e acabamento com impermeabilizantes adequados, de modo a impedir a infiltração ou o acúmulo de água; e
- no que tange às presilhas (grampos) de fixação lateral e intermediária (central) dos painéis fotovoltaicos, estas devem possuir as seguintes características gerais:
 - ▷ as presilhas de fixação devem ser alocadas em concordância com as posições de montagem, as quais são indicadas pelo fabricante do módulo fotovoltaico, em seu manual de montagem;
 - ▷ material: alumínio anodizado ou aço galvanizado; e
 - ▷ as presilhas devem acompanhar parafusos, porcas e arruelas de fixação em perfil estruturado de alumínio.

3.4 Módulos Fotovoltaicos – Requisitos Técnicos Mínimos

Os requisitos técnicos mínimos dos módulos fotovoltaicos estão apresentados na sequência:

- o sistema de geração fotovoltaica deve ser constituído por módulos fotovoltaicos do mesmo tipo e modelo, os quais são associados em série/paralelo e devem totalizar uma potência instalada de 150 kWp;
- os módulos devem contar com as certificações IEC 61215:2016 e/ou IEC 61730:2016;
- os módulos devem contar com certificação Inmetro e Selo PROCEL A;
- os módulos devem ser resistentes à degradação induzida por tensão (PID – *Potential Induced Degradation*);
- a potência nas condições padrão de teste (*STC – Standard Test Condition*) dos geradores fotovoltaicos, medida na entrada de cada inversor, deve ser igual ou superior a 93% da potência nominal correspondente, ou seja, a soma das perdas por degradação inicial, dispersão de características ou *mismatching* e cabeamento não pode superar 7% da potência nominal; e
- com o inversor operando normalmente e em ausência de sombras, os módulos fotovoltaicos e outras conexões não devem exibir sobreaquecimentos.
- Cuidados e manuseio dos módulos:
 - ▷ os módulos fotovoltaicos deverão ser armazenados, transportados e instalados seguindo os cuidados e instruções indicados pelo fabricante, as quais estão descritas no manual de instalação ou outro documento semelhante emitido pelo fabricante;

- ▷ além das instruções do fabricante, deverão ser tomadas todas as precauções para evitar queda ou impactos nas superfícies dos módulos, o que poderá ocasionar microfaturas nas células fotovoltaicas, as quais são normalmente invisíveis a olho humano e comprometem o desempenho do módulo; e
- ▷ especial atenção deverá ser dada ao equipamento de proteção individual (EPI) dos instaladores, principalmente os tipos de luvas, bem como a ferramentas e acessórios para o manuseio dos módulos, como, por exemplo, o uso de ventosas, que permitem o manuseio seguro e preciso.
- Conexão dos módulos fotovoltaicos:
 - ▷ os módulos fotovoltaicos serão conectados em série, de modo a fornecer um valor de tensão para o arranjo fotovoltaico compatível com a entrada do inversor; e
 - ▷ as *strings* serão conduzidas a uma Caixa de Junção CC.
- Garantia dos módulos fotovoltaicos:
 - ▷ defeitos de fabricação e materiais: mínimo de 10 anos; e
 - ▷ perda de potência STC: 3% o primeiro ano, 0,8% linear nos 24 anos seguintes.

3.5 Inversores Solares – Requisitos Técnicos Mínimos

O sistema de geração fotovoltaica deve ser constituído por, no mínimo, três inversores solares, sendo que cada unidade deve seguir as características técnicas mínimas apresentadas na sequência.

- Características elétricas do lado em corrente contínua do inversor:
 - ▷ número de MPPT: mínimo de duas entradas;
 - ▷ máxima tensão de entrada CC: 1000 V;
 - ▷ inclusão de chave seccionadora do lado CC;
 - ▷ proteção contra inversão de polaridade no lado CC; e
 - ▷ proteção contra surtos de tensão na entrada CC;
- Características elétricas do lado em corrente alternada do inversor:
 - ▷ inversor trifásico, sem transformador de acoplamento;
 - ▷ tensão nominal de saída: 220/380 V;
 - ▷ frequência nominal: 60 Hz;
 - ▷ distorção harmônica total da corrente de saída: menor que 3%;
 - ▷ rendimento: superior a 97,5%; e
 - ▷ proteção contra curto-circuito na saída CA;
- Características gerais:
 - ▷ interface de comunicação: no mínimo, incluir sistema de comunicação Ethernet, USB, RS485;
 - ▷ monitoramento remoto: os inversores devem incluir *software* de monitoramento, em tempo real, das variáveis relevantes ao fluxo de energia, bem como estado dos alarmes;
 - ▷ temperatura de operação: 10 °C a 50°C. Os inversores devem ser capazes de operar normalmente à potência nominal com uma temperatura ambiente de, no mínimo, 40° C;

- ▷ grau de proteção: IP 65 (IEC 60529:1989);
- ▷ os inversores deverão conter a certificação IEC 61727:2004 e IEC 62116:2014;
- ▷ os inversores devem possuir registro no programa brasileiro de etiquetagem do Inmetro;
- ▷ os inversores devem atender aos requisitos definidos nas normas ABNT NBR 16149:2013 e ABNT NBR 16150:2013;
- ▷ os inversores devem estar dentre aqueles homologados para utilização na área de concessão da CEB;
- ▷ a razão entre a potência nominal do inversor e a potência total de módulos fotovoltaicos conectado ao inversor deve estar situada entre 0,88 e 1,1;
- ▷ incluir manual de utilização e documentação técnica do inversor no formato digital;
- ▷ a contratada deve fornecer o sistema de fixação do inversor, e este deve estar de acordo com as recomendações do fabricante. Especial atenção deverá ser prestada ao aspecto de ventilação, seja na instalação individual ou no caso de inversores instalados e posicionados lado a lado ou ao lado de outro equipamento. As recomendações do fabricante deverão ser seguidas estritamente e, caso necessário, deverão ser providos meios adicionais de ventilação (ventilador/exaustor) no ambiente da instalação para atender aos requisitos do fabricante; e
- ▷ garantia dos inversores: garantia contra defeitos de fabricação e materiais: mínimo de cinco anos.

3.6 Conector Solar – Requisitos Técnicos Mínimos

A conexão entre os módulos fotovoltaicos deverá ser realizada por conectores solares apropriados para este tipo de instalação, com as especificações mínimas apresentadas a seguir.

- Corrente nominal compatível ao ponto de aplicação do conector, tensão 1000 V (DC), resistentes a intempéries e radiação ultravioleta (UV), atendimento aos requisitos da norma EN 50521:2008, compatível com as seções de cabo condutor padrão solar utilizado na instalação elétrica, faixa de temperatura de -40 °C a 85 °C, grau de proteção IP 65 ou superior (IEC 60529:1989).

Condições gerais para fornecimento deste equipamento:

- Montagem dos conectores:
 - ▷ os conectores de módulos fotovoltaicos possuem um terminal metálico interno, ao qual o cabo deverá ser fixado por compressão, processo este chamado de crimpagem. A crimpagem deverá ser realizada de acordo com as instruções do fabricante e utilizando as ferramentas indicadas;
 - ▷ o cabo deverá ser decapado, com ferramenta adequada, somente no momento da crimpagem, e deverá ser mantido perfeitamente limpo e isento de umidade, inclusive sem que a mão do operador entre em contato com a parte metálica exposta (cobre estanhado), para evitar a contaminação por suor, gordura ou outros resíduos carregados na mão;

- ▷ a crimpagem somente deverá ser realizada com ferramentas apropriadas, indicadas pelo fabricante do conector e, depois de concluída, deverá ser verificada visualmente e mecanicamente por meio de tração;
- ▷ após a verificação da crimpagem, o conector deverá ser fechado e vedado, utilizando ferramentas apropriadas e indicadas pelo fabricante, com torque adequado, de modo a garantir o índice de proteção IP 65 (IEC 60529:1989).
- Garantia dos conectores:
 - ▷ defeitos de fabricação e materiais: mínimo de 10 anos.

3.7 Cabo Elétrico, Padrão Solar – Requisitos Técnicos Mínimos

Este projeto contempla a utilização de cabo elétrico, padrão solar, para interligação entre elementos em corrente contínua existentes na instalação. Os requisitos técnicos mínimos que estes cabos devem possuir estão apresentados na sequência:

- Características dos cabos CC:
 - ▷ seção: a seção dos cabos CC deve ser determinada com base, no mínimo, nos critérios de seção mínima, capacidade de condução de corrente e queda de tensão, atendendo aos seguintes critérios:
 - seção mínima: 4 mm²;
 - capacidade de condução: devem-se considerar as correntes nominais circulantes na instalação;
 - queda de tensão: a queda de tensão de máxima no condutor deve ser de 2%, quando percorrido pela corrente nominal; e
 - deverá ser adotado o maior valor de seção transversal advinda da aplicação dos três critérios anteriores.
 - ▷ tipo flexível, condutor simples, composto de fios de cobre estanhado, com temperatura mole, encordoamento classe 5, conforme ABNT NBR-NM 280:2011;
 - ▷ dupla isolamento, com materiais de baixa emissão de fumaça, não propagação de chamas, autoextinção de chama e ausência de halogênios;
 - ▷ tensão de isolamento CC de 1,8 kV e CA de 0,6/1 kV;
 - ▷ faixa de temperatura de operação: -40°C a 120°C;
 - ▷ temperatura de trabalho até 120°C em serviço contínuo, 160°C em sobrecarga e 250°C em curto-circuito;
 - ▷ resistência à intempérie e à radiação ultravioleta (UV); e
 - ▷ padrão de cores: vermelha para condutor ligado ao polo positivo do sistema fotovoltaico; preta para condutor ligado ao polo negativo do sistema fotovoltaico; verde ou verde-amarelo para condutor de aterramento do sistema fotovoltaico.
- Instalação dos cabos CC:
 - ▷ os cabos CC deverão ser posicionados em eletroduto existente na estrutura de suporte, de modo a não sofrerem movimentação por vento e não ficar em contato com água;

- ▶ não serão admitidas emendas em qualquer dos cabos do circuito CC, para aumento de sua extensão;
- ▶ nas extremidades dos cabos CC, que não utilizam conectores solares, deverão ser utilizados terminais (conectores) pré-isolados, adequados ao tipo de conexão; e
- ▶ os cabos CC de cada polo deverão ser instalados, de forma a evitar formação de espiras. A Figura 2(a) mostra o método de instalação que deverá ser evitado, e a Figura 2(b) mostra o modo de instalação que deverá ser empregado.

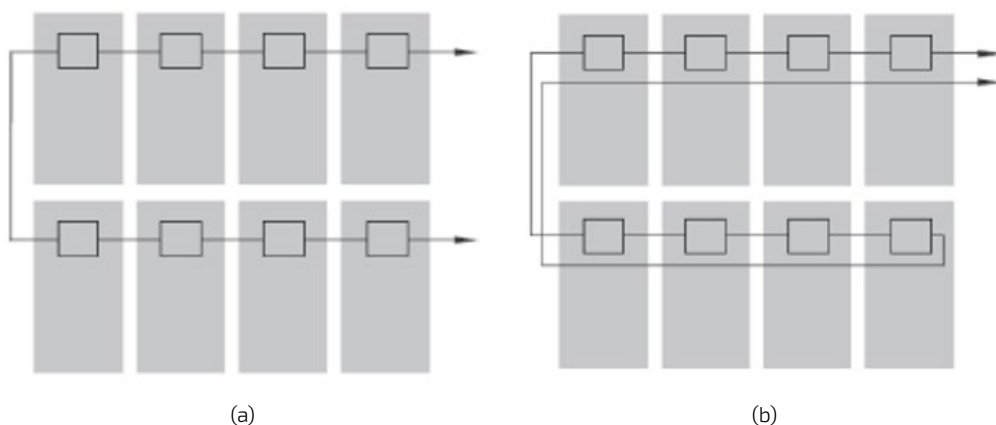


Figura 2. Método de instalação dos cabos CC. (a) Método não permitido para a instalação fotovoltaica; (b) Método a ser considerado na instalação fotovoltaica, para minimizar indução de descargas atmosféricas

3.8 Eletrodutos e Eletrocalhas – Requisitos Técnicos Mínimos

Todos os cabos CC e CA da instalação devem ser instalados em eletrodutos ou eletrocalhas, os quais devem atender a requisitos da Norma NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão. Assim, tais dispositivos oferecem proteção mecânica para fios e cabos nas instalações.

Os eletrodutos e eletrocalhas devem ser de material galvanizado, resistente à corrosão e oxidação por um período mínimo de 25 anos e com dimensões compatíveis para a passagem de cabos.

Os eletrodutos e eletrocalhas devem estar acompanhados de elementos de fixação (abraceiras, parafusos, buchas etc), também feitos de material galvanizado, resistente à corrosão e oxidação por um período mínimo de 25 anos e com dimensões compatíveis ao eletroduto. Além do mais, deverão ser previstas caixas de passagem, com tampa e parafusos de fixação da tampa.

3.9 Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) – Requisitos Técnicos Mínimos

O quadro geral de baixa tensão da planta fotovoltaica contém dispositivos de proteção, seccionamento e medição, e deve conter, no mínimo, os seguintes elementos:

- caixa de proteção com grau de proteção IP 65 (IEC 60529:1989); resistente às intempéries e radiação UV;
- disjuntores termomagnéticos, instalados na saída de cada inversor, tripolares CA, de comando frontal, 380 V, 100 kA e corrente nominal compatível com a corrente de saída do inversor. Estes disjuntores devem atender aos requisitos do fabricante do inversor, bem como às normas NBR IEC 90947-2:2013 e NBR 5410:2008; e
- disjuntor tripolar CA, para seccionamento geral da planta fotovoltaica, de comando frontal, 380 V, 100 kA e corrente nominal compatível com a corrente de saída da planta fotovoltaica. Este disjuntor deve atender aos requisitos do fabricante do inversor, bem como às normas NBR IEC 90947-2:2013 e NBR 5410:2008.
- Dispositivos de Proteção contra Surto (DPS) para circuitos em corrente alternada:
 - ▷ Características elétricas:
 - limitador de tensão composto por varistor de Óxido de Zinco;
 - temperatura de operação: de -40°C a 70°C; e
 - sinalização local, para indicação do estado de operação - SERVIÇO/DEFEITO -, por meio de bandeirola verde/vermelha ou outro dispositivo assemelhado.
 - ▷ Instalação:
 - todos os DPS deverão ser interconectados equipotencialmente e interligados ao condutor de aterramento.
- Dispositivos de supervisão e monitoramento, instalados na saída de cada inversor, para controle de produção de cada conjunto de painéis fotovoltaicos. Estes dispositivos são multimedidores de grandezas elétricas, com as seguintes características:
 - ▷ grandezas medidas: tensão; corrente; potência ativa, reativa e aparente; fator de potência; Demanda Ativa Total, Demanda Reativa Total, Rateio de Custos de Energia;
 - ▷ comunicação Ethernet;
 - ▷ protocolo de comunicação MODBUSs encapsulado TCP/IP;
 - ▷ conectividade com *WiFi*, 3G, 4G e demais tecnologias para Telemetria de Sistemas; e
 - ▷ memória de massa com autonomia de 60 dias integrada em 15 minutos.
- Cabos unipolares ou multipolares CA, para interligação do Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) da planta fotovoltaica ao QGBT da edificação, com as seguintes características elétricas:
 - ▷ seção: deverá ser calculada segundo os critérios especificados na NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão;
 - ▷ tipo flexível, composto de fios de cobre, com têmpera mole, encordoamento classe 2, conforme ABNT NBR-NM 280:2011;
 - ▷ isolamento de PVC sem chumbo, com materiais de baixa emissão de fumaça, não propagação de chamas, autoextinção de chama e ausência de halogênios;
 - ▷ tensão de isolamento CA de 0,6/1 kV;
 - ▷ faixa de temperatura de operação: -40°C a 120°C;

- ▷ temperatura de trabalho até 70°C em serviço contínuo, 100°C em sobrecarga e 160°C em curto-circuito; e
- ▷ certificado pelo Inmetro.
- o quadro deve conter barramentos de cobre, com seções compatíveis com a corrente nominal do sistema, destinado à interconexão entre as fases, bem como barramentos de neutro e proteção;
- os barramentos de cobre devem ser instalados via isoladores epóxi, com dimensões compatíveis com o barramento;
- adesivos para identificação dos circuitos. A identificação dos componentes deverá ser feita de acordo com a norma NBR 16274:2014, e os requisitos para sinais e etiquetas de sistemas fotovoltaicos são detalhados na norma IEC 60364-7-712:2017, bem como conforme NR-10;
- aviso de risco de choque elétrico, conforme NR-10. A identificação dos componentes deverá ser feita de acordo com a norma NBR 16274:2014, e os requisitos para sinais e etiquetas de sistemas fotovoltaicos são detalhados na norma IEC 60364-7-712:2017, bem como conforme NR-10; e
- barreira de proteção de elementos energizados, conforme NR-10.
- Condições gerais de instalação do quadro geral CA:
 - ▷ no local do QGBT da planta fotovoltaica deverá ser colocado um diagrama unifilar correspondente aos equipamentos instalados, suas características, configurações do inversor e informações do instalador;
 - ▷ padrão de cores: azul para condutor neutro, verde ou verde-amarelo para condutor de aterramento;
 - ▷ as partes metálicas da caixa de proteção, quando aplicável, devem estar equipotencializadas.

3.10 Aterramento das Instalações

As seguintes características gerais devem ser atendidas:

- todas as partes metálicas da instalação fotovoltaica, não destinadas a conduzir corrente, tais como estruturas de suporte, eletrodutos, eletrocalhas, caixas de quadros elétricos (CC ou CA), entre outros, devem ser protegidas por meio da interconexão elétrica delas, mantendo isolamento da parte energizada e conexão à malha terra do sistema. Esse processo deve ser executado seguindo as determinações da norma NBR 5410:2004 e da norma NBR 5419:2015, no que for aplicável;
- os polos dos arranjos fotovoltaicos, positivo ou negativo, não deverão ser aterrados, exceto se esse procedimento não for especificamente recomendado pelos fabricantes dos módulos e dos inversores. Caso seja necessário, deverá ser realizado com acessório especificado pelos fabricantes de módulo e inversor; e
- a infraestrutura de aterramento deve ser instalada de acordo com as normas NBR 5410:2004 e NBR 14039:2005, de modo a atender aos requisitos de segurança, operar de forma satisfatória nos casos de falhas e não ocasionar danos às novas e antigas instalações.

3.11 Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

A planta de geração fotovoltaica deve conter sistema de proteção contra descargas atmosféricas, satisfazendo as normas técnicas ABNT NBR 5419:2015 e IEC 60364-7-712:2017.

Comissionamento e documentação

Os requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho estão previstos na norma ABNT NBR 16274:2014.

Além do mais, o projeto executivo (plantas e desenhos de engenharia) deve ser atualizado para conter as informações da instalação no formato “como construído” (*as built*), sendo disponibilizado no formato CAD.

3.12 Manutenção

A contratada deverá apresentar plano de manutenção periódica do sistema de geração fotovoltaica.

3.13 Peças de Reposição

O sistema fotovoltaico deve contar com as seguintes peças de reposição:

- cinco módulos fotovoltaicos, do mesmo tipo e modelo daqueles instalados no sistema de geração;
- dez Dispositivos de Proteção contra Surto (DPS) para instalações em corrente contínua, do mesmo tipo e modelo daqueles instalados no sistema de geração;
- dez Dispositivos de Proteção contra Surto (DPS) para instalações em corrente alternada, do mesmo tipo e modelo daqueles instalados no sistema de geração; e
- 15% dos fusíveis existentes no sistema fotovoltaico, do mesmo tipo e modelo daqueles instalados no sistema de geração.

3.14 Garantia

Os serviços prestados neste documento devem contar com as garantias especificadas nas próximas seções.

3.14.1 Garantia da instalação

A empresa contratada fornecerá todos os materiais, instalará a planta fotovoltaica e deverá apresentar garantia dos serviços prestados pelo período de cinco anos, respondendo por sua solidez e segurança, conforme o art. 1245 do Código Civil Brasileiro. Tal período independe das garantias individuais dos equipamentos junto aos respectivos fabricantes e será contado

a partir da data da assinatura do Certificado de Recebimento do sistema fotovoltaico. Dentro desse período de garantia, de cinco anos, a contratada deverá corrigir qualquer problema encontrado por ocasião das atividades periódicas.

A contratada deverá apresentar os certificados de garantia das estruturas de suporte e fixação dos módulos contra defeitos de fabricação e corrosão com validade mínima de cinco anos, a contar da data de assinatura do Termo de Recebimento da planta fotovoltaica, bem como de todos os equipamentos elétricos e eletrônicos, juntamente com o Manual de Instruções para Manutenção.

A contratada deverá apresentar um “Cronograma de Garantias” contendo todos os materiais e equipamentos fornecidos, com as respectivas descrições e identificação conforme consta no Projeto Executivo, e os respectivos prazos de garantia em meses. Esse “Cronograma de Garantias” tem o principal objetivo de apresentar, de forma clara, a abrangência de todas as garantias.

3.14.2 Garantia de desempenho

Conforme a NBR 16274:2014, o desempenho é avaliado por parâmetros anuais, um dos quais é denominado desempenho global anual, correspondendo ao parâmetro tratado na literatura técnica especializada por taxa de desempenho (TD) ou, em inglês, por *performance ratio* (PR). Assim, o desempenho global anual deverá ser calculado segundo os procedimentos apresentados na NBR 16274:2014, *Seção 10 – Avaliação de desempenho* e no *Anexo 3: Comissionamento e Avaliação de Desempenho*. A finalidade da avaliação do desempenho é verificar se a UFV está produzindo o valor de energia (kWh) em determinado período, em função da potência instalada, conforme especificado pela CONTRATADA.

A CONTRATADA deverá garantir o valor de geração mínima e o desempenho global anual, estimados e apresentados no Projeto Executivo. Nesse contexto, destaca-se que o projeto executivo deve apresentar uma taxa de desempenho superior a 0,75.

O processo de avaliação de desempenho é composto por avaliações iniciais e avaliações de desempenho anuais, conforme especificado na sequência:

- avaliações iniciais de desempenho: a avaliação inicial de desempenho deverá ser nos primeiros 45 dias após o início de operação da planta fotovoltaica, utilizando, no que for aplicável, os procedimentos apresentados na norma NBR 16274:2014, *Seção 10 – Avaliação de desempenho*; e
- avaliações de desempenho anual: estão previstas duas avaliações anuais de desempenho, a serem realizadas durante o período de garantia da instalação, sendo efetuadas, respectivamente, após um ano de operação e após dois anos de operação. Nas avaliações anuais será calculado o desempenho global anual do sistema, segundo os procedimentos apresentados na NBR 16274:2014, *Seção 10 – Avaliação de desempenho*.

Os resultados das avaliações de desempenho da UFV deverão ser apresentados em relatórios, com todos os dados de medições e ensaios realizados, conforme detalhados na *Seção 10 – Avaliação de desempenho*, da norma NBR 16274:2014.

4. PROJETO EXECUTIVO E IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Esta seção descreve as características básicas do projeto e do sistema fotovoltaico implantado na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

4.1 Estrutura Metálica de Fixação e Suporte

Baseado nos requisitos apresentados na seção anterior, o desenvolvimento do projeto da estrutura de fixação e suporte está sintetizado na Figura 3. Os painéis fotovoltaicos do sistema foram instalados em estrutura de alumínio, que possuem inclinação de 15° em relação ao solo e estão fixadas em estrutura metálica de aço, perfil UDC (Perfil U de Chapa Dobrada). Estes últimos elementos foram enrijecidos com galvanização a fogo e estão montados sob estrutura de concreto convencional, por meio de chumbadores. A estrutura foi projetada de forma a garantir a modularidade, sendo constituída de módulos para vão de três e seis metros longitudinais e outra para vão de seis metros transversais. A avaliação de suportabilidade a sobrecargas se baseia em requisitos estabelecidos na ABNT NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, e o carregamento proveniente do vento será considerado conforme a norma ABNT NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações. A ancoragem do sistema é realizada por meio de barra roscada com diâmetro de 9/16". O procedimento de impermeabilização da ancoragem está detalhado na Figura 4.

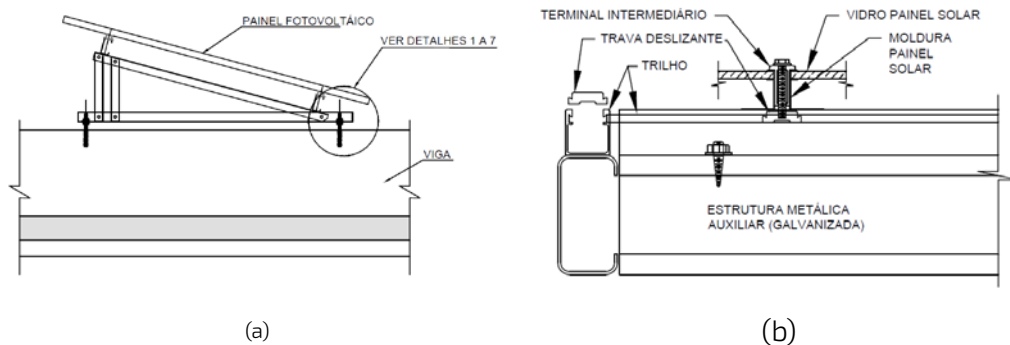


Figura 3. Projeto de estrutura de fixação e suporte de módulos fotovoltaicos. (a) Vista lateral; (b) Vista frontal

IMPERMEABILIZAÇÃO DA FIXAÇÃO DA ESTRUTURA FOTOVOLTAICA
S/ ESCALA

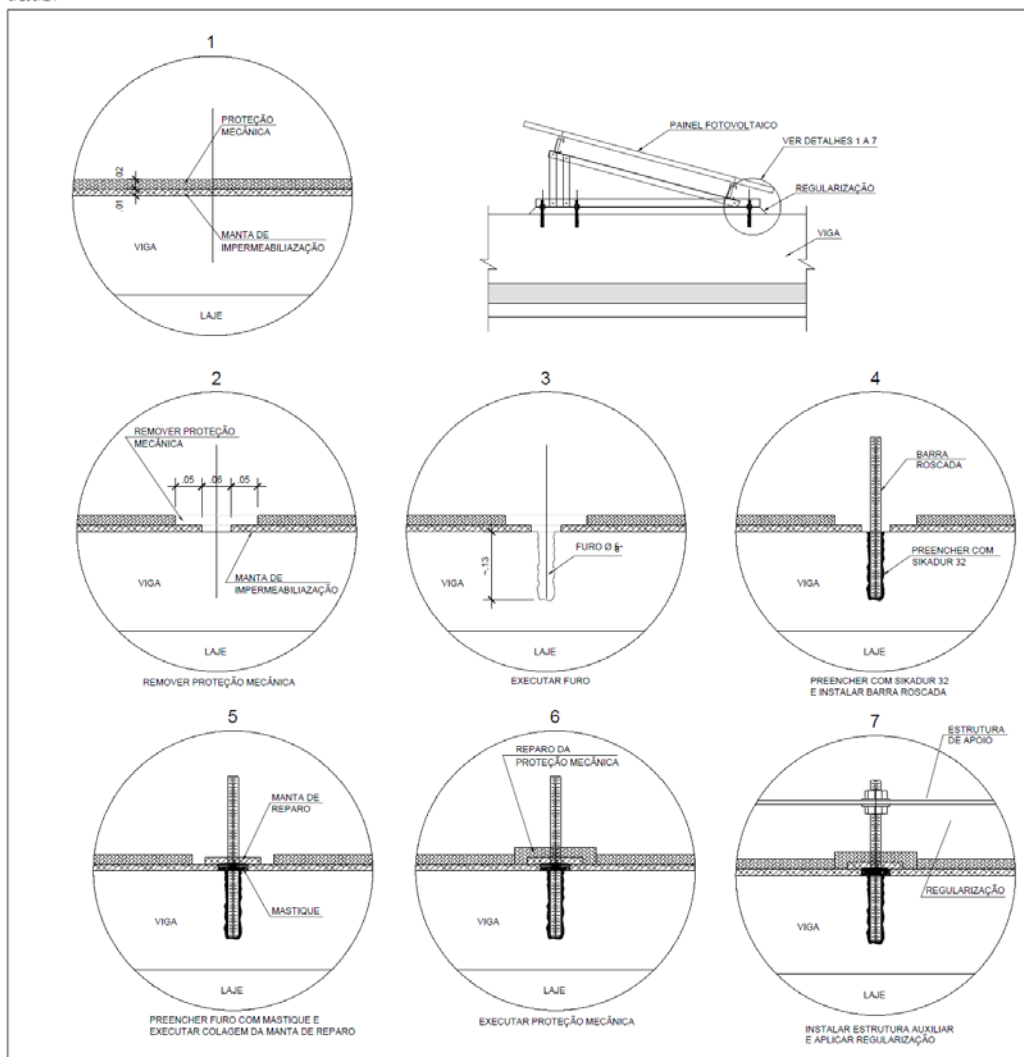


Figura 4. Impermeabilização de fixação de estrutura de fixação e suporte

Por fim, a Figura 5 apresenta o registro fotográfico da montagem da estrutura metálica na Faculdade de Tecnologia.



(a)



(b)



(c)



(d)

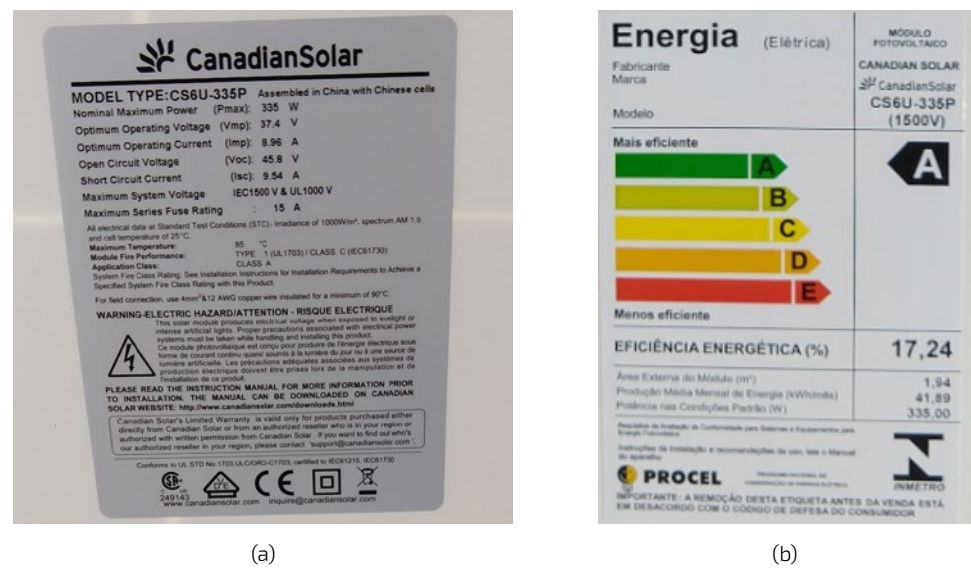
Figura 5. Montagem de estrutura de fixação e suporte de módulos fotovoltaicos. (a) Vista panorâmica; (b) Montagem do sistema; (c) Detalhes de impermeabilização; (d) Grampos de fixação de módulos fotovoltaicos na estrutura de alumínio

4.2 Módulos Fotovoltaicos

O *layout* utilizado para a alocação dos painéis fotovoltaicos está apresentado na Figura 6. Para totalizar a potência instalada de 150 kWp, utilizaram-se 450 módulos de potência nominal de 335 Wp, sob a STC. Os módulos utilizados são do fabricante Canadian Solar, modelo CS6U, conforme dados apresentados na Figura 7. A Figura 8 apresenta uma vista aérea da disposição dos painéis após a montagem do sistema.



Figura 6. Alocação de módulos fotovoltaicos na Faculdade de Tecnologia



(a) (b)
Figura 7. Informações dos módulos fotovoltaicos utilizados. (a) Dados nominais; (b) Selo PROCEL



Figura 8. Distribuição dos módulos fotovoltaicos

4.3 Inversores Solar

Tendo em vista os requisitos para o inversor solar, a opção recaiu sobre a utilização de três unidades iguais, que possuem 50 kW de potência nominal. O modelo empregado foi o ABB-TRIO-TM-50.0, o qual dispõe de três entradas individuais para rastreamento de máxima potência. Este inversor possui caixa de junção integrada, contendo fusíveis individuais para as *strings*, dispositivo de proteção contra surto e chave seccionadora no lado CC. A Figura 9 apresenta os diagramas unifilares do sistema, demonstrando a associação dos módulos fotovoltaicos de forma a garantir as condições operacionais na entrada CC do inversor. Quanto ao lado CA, o inversor atende a requisitos de normas técnicas nacionais e internacionais e integra esquemas de proteção contra ilhamento, sobrecorrente, dentre outras.

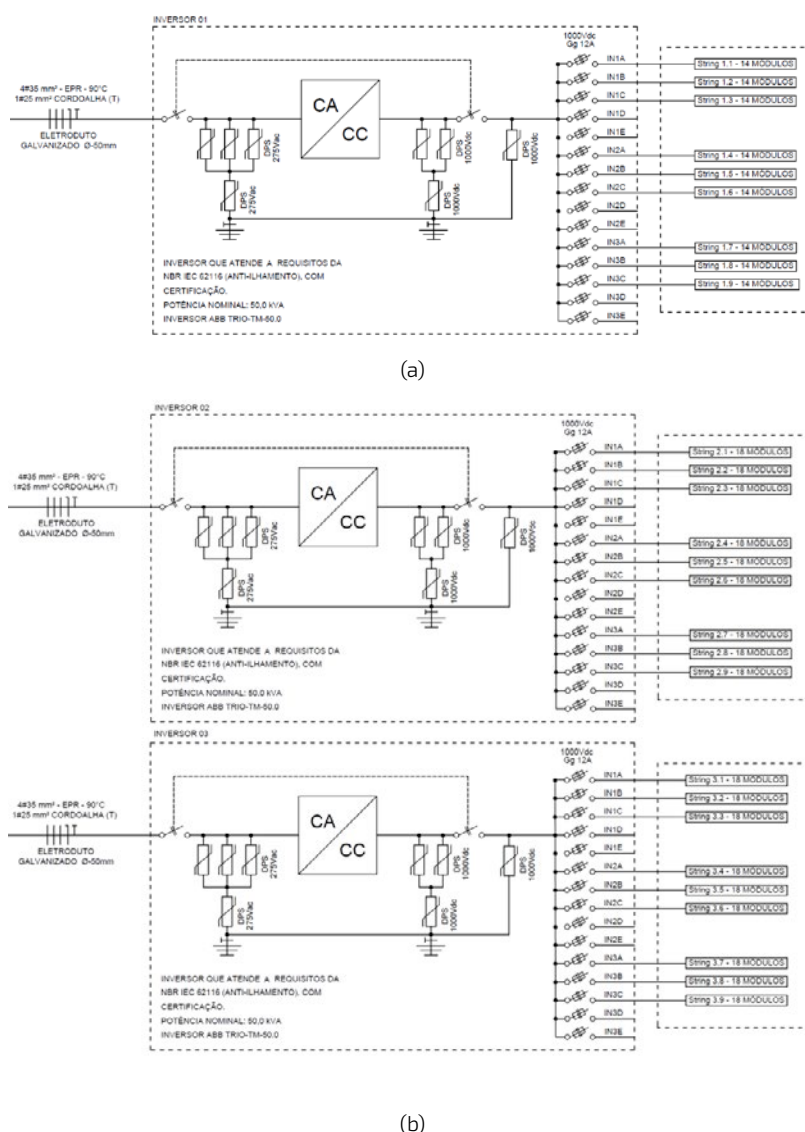


Figura 9. Diagrama unifilar. (a) Inversor 01; (b) Inversores 02 e 03

A Figura 10 apresenta o projeto e execução da alocação dos inversores na Faculdade de Tecnologia.

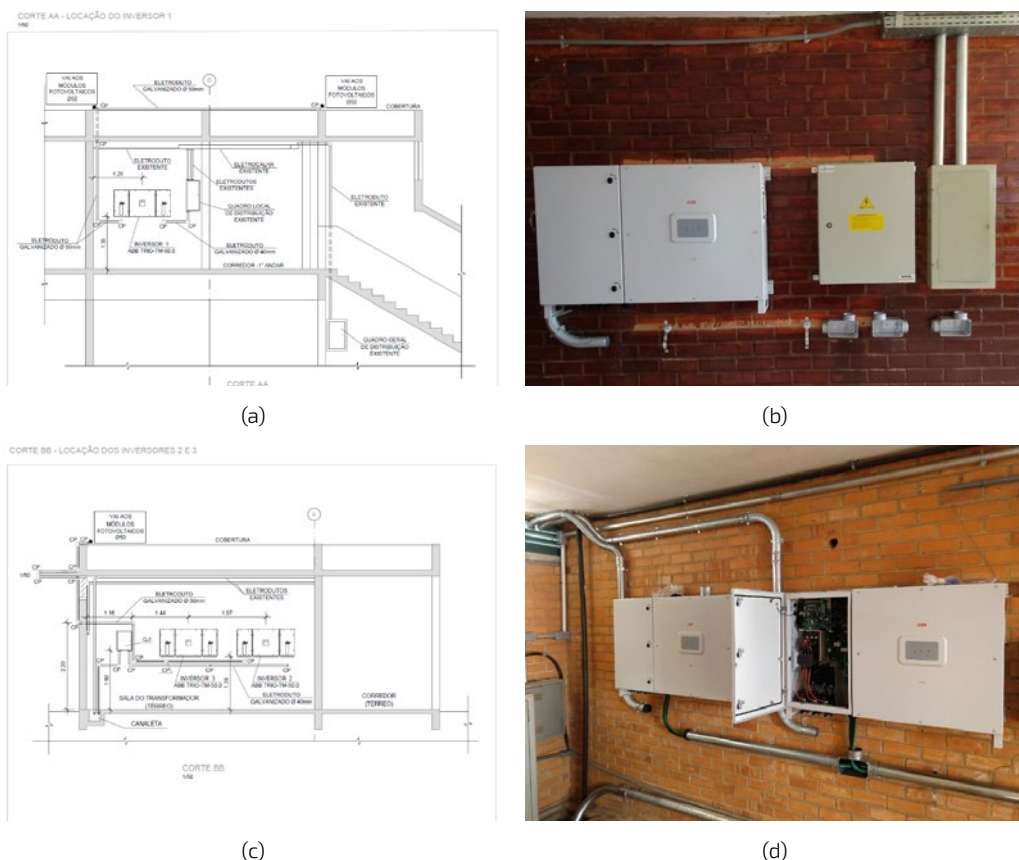


Figura 10. Montagem dos inversores. (a) Projeto de alocação do inversor 01; (b) Registro fotográfico da montagem do inversor 01; (c) Projeto de alocação dos inversores 02 e 03; (d) Registro fotográfico da montagem dos inversores 02 e 03

4.4 Cabo Elétrico, Padrão Solar

Quanto aos cabos elétricos utilizados no lado CC da instalação, a empresa contratada utilizou materiais destinados a sistemas solares, conforme requisitos estabelecidos no edital de licitação. A opção empregada foi o Cabo Prysun, do fabricante Prysmian. Os polos positivo e negativo de cada *string* empregam cabos com seção nominal de 6 mm², enquanto o cabo utilizado para aterramento da estrutura metálica possui seção de 4 mm².

4.5 Conector Solar

De forma a atender aos requisitos de interconexão dos elementos em CC do sistema fotovoltaico, conector MC4, fabricado pela empresa Weidmüller, tais conectores possuem corrente nominal de 30 A, tensão CC de isolamento de 1000 V, grau de proteção IP 65 e permitem a conexão de cabos de até 6 mm².

4.6 Eletrodutos

Todos os cabos CC e CA da instalação foram instalados em eletrodutos de material galvanizado a fogo. Os critérios de escolha de seção se basearam em uma ocupação máxima de 33% da área útil do eletroduto. A Figura 11 apresenta registro fotográfico da execução destas instalações.



(a)



(b)

Figura 11. Montagem dos eletrodutos. (a) Instalação de eletrodutos junto à estrutura de sustentação dos módulos; (b) Instalação de eletrodutos no lado CA do inversor

4.7 Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT)

A Figura 12 apresenta as características dos quadros CA do sistema fotovoltaico. Destaca-se a montagem em caixa metálica, com grau de proteção IP 65, resistente a intempéries e radiação UV, existência de barreira de proteção de elementos energizados, conforme NR-10, adesivos para identificação dos circuitos e avisos de risco de choque elétrico, conforme NR-10. Os quadros contam com medidores de grandezas elétricas instalados na saída de cada inversor, para controle de produção de cada conjunto de painéis fotovoltaicos e integração com sistema de gestão energética da Universidade de Brasília.

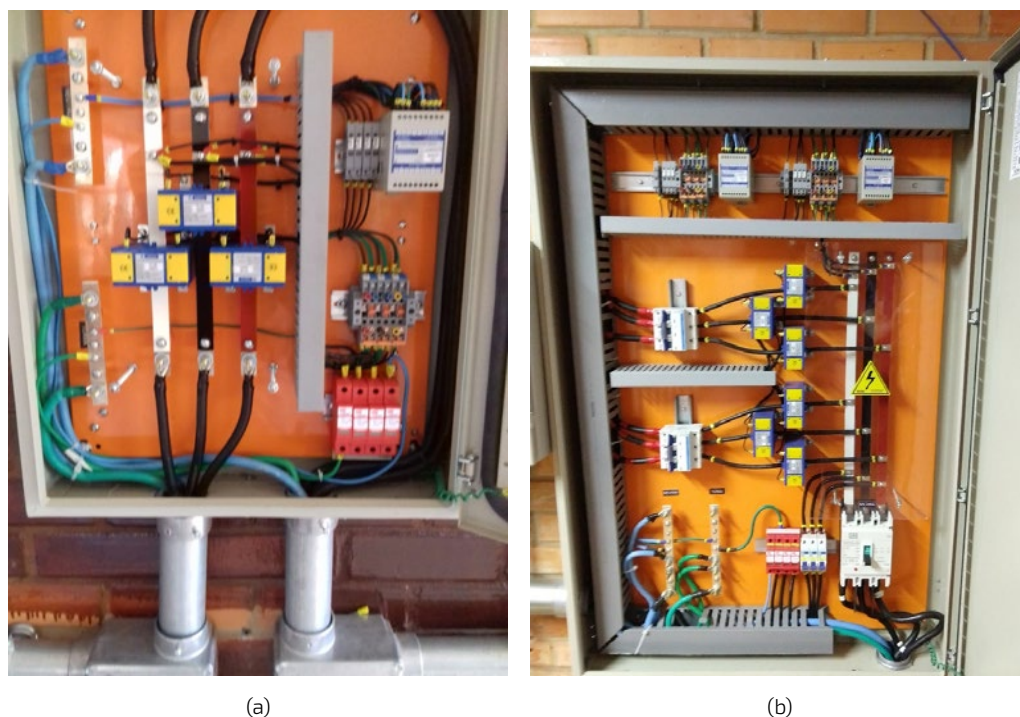


Figura 12. Montagem dos QGBT. (a) Inversor 01; (b) Inversor 02 e 03

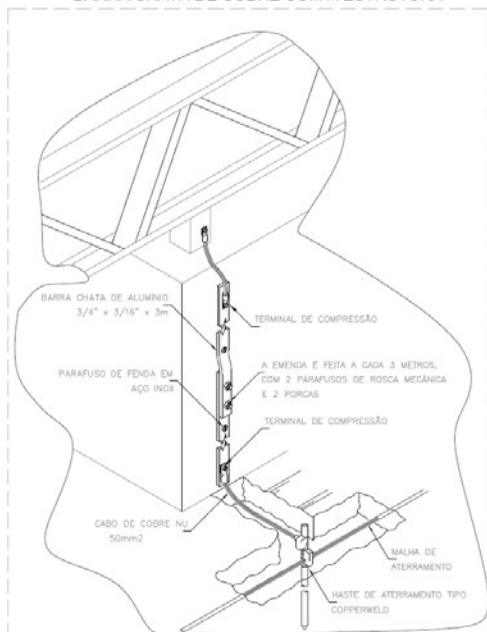
4.8 SPDA e Aterramento das Instalações

O sistema fotovoltaico implantado na Faculdade de Tecnologia conta com a instalação de SPDA próprio, o qual se integra ao sistema de aterramento existente na edificação. As características do SPDA são:

- seguindo os critérios definidos na norma técnica ABNT NBR 5419:2015 – Parte 2, a análise de risco da estrutura quanto à incidência de descargas atmosféricas indicou que o SPDA deve atender aos critérios de um sistema classe IV;
- o subsistema de captação considera o uso de componentes naturais, uma vez que toda estrutura do sistema fotovoltaico foi executada em estrutura de aço galvanizado, atendendo às dimensões mínimas especificadas na norma;
- subsistema de descida: o subsistema de descida utiliza barras chatas de alumínio, de 70 mm², fixadas em alvenaria. O número de descidas atende aos critérios de um sistema classe IV; e
- subsistema de aterramento: as descidas do SPDA do sistema fotovoltaico foram interligadas à malha de aterramento existente na edificação.

A Figura 13 apresenta detalhes do projeto e execução do SPDA e aterramento das instalações.

DETALHE 4 - DETALHE DA CONEXÃO DA DESCIDA EM BARRA CHATA DE COBRE COM A ESTRUTURA

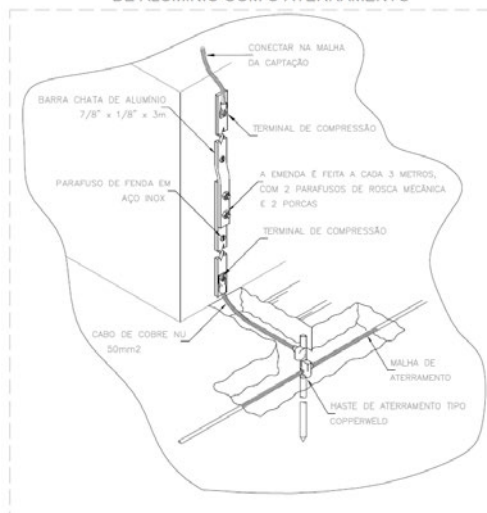


(a)



(b)

DETALHE 3 - DETALHE DE DESCIDA EM BARRA CHATA DE ALUMÍNIO COM O ATERRAMENTO



(c)



(d)

Figura 13. Montagem de SPDA do sistema fotovoltaico. (a) Projeto de subsistema de captação; (b) Detalhe de montagem do subsistema de captação; (c) Projeto do subsistema de descida; (d) Detalhe de montagem do subsistema de descida e interligação com subsistema de aterramento

4.9 Comissionamento do Sistema Fotovoltaico

No que se refere ao comissionamento do sistema fotovoltaico, as atividades abrangem os requisitos definidos na norma ABNT NBR 16274:2014. Nesse sentido, foram realizadas as seguintes ações:

- inspeção: a inspeção visual é realizada no local da instalação elétrica e tem por objetivo analisar a montagem dos componentes elétricos e as medidas de proteção adotadas no projeto. O procedimento de inspeção foi realizado pela análise de subsistemas, a saber: instalações em CC; instalações em CA; medidas contra sobretensão e choques elétricos; etiquetagem e identificação; montagens mecânicas. De forma geral, foram considerados os seguintes critérios:
 - ▷ conformidade: verificação da compatibilidade dos equipamentos elétricos com as indicações na documentação do sistema, que contém as normas específicas para construção;
 - ▷ integridade física: análise das condições físicas dos equipamentos utilizados na planta fotovoltaica, de tal maneira que eles não devem estar danificados, nem faltando peças ou mal-instalados;
 - ▷ acessibilidade: avaliação das condições de montagem e localização de dispositivos, de forma a não restringir o acesso dos usuários durante operações ou manutenções;
 - ▷ medidas de proteção: devem-se verificar se as medidas de proteção contra choques elétricos e contra efeitos térmicos indicadas no projeto estão instaladas adequadamente; e
 - ▷ linhas elétricas: análise da instalação das linhas elétricas e condutores indicados na documentação da instalação elétrica. Além do mais, deve-se verificar a separação dos circuitos.

Ensaios após a realização da inspeção:

A instalação elétrica deve ser submetida a um conjunto de ensaios prescritos pela NBR 16274. Tais ensaios visam complementar a avaliação de conformidade e, consequentemente, determinar a existência de falhas em componentes ou montagens e o atendimento aos critérios de saúde e segurança dos usuários e a proteção do meio ambiente. Os ensaios realizados foram de categoria 1 e se constituem em:

- continuidade da ligação à terra e dos condutores de ligação equipotencial;
- ensaio de polaridade;
- ensaio de tensão de circuito aberto das *strings*;
- ensaio de corrente operacional da série fotovoltaica;
- ensaios de funcionamento; e
- ensaio de resistência de isolamento do(s) circuito(s) CC.

5. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO DA FACULDADE DE TECNOLOGIA

Esta seção apresenta as características de produção de energia do sistema fotovoltaico.

5.1 Expectativa de Produção de Energia

A instalação descrita no projeto executivo foi simulada no *software* Helioscope. Esta medida teve por objetivo quantificar a expectativa de produção de energia do sistema, fato este balizador para o acompanhamento da operação do sistema. Nesse contexto, as premissas utilizadas para a simulação foram:

- 450 módulos do Fabricante Canadian solar CS6U-335P, potência nominal de 335 Wp. Tal condição totaliza uma potência de 150,8 kWp;
- três inversores ABB TRIO-TM-50.0-400;
- 27 *strings* de módulos fotovoltaicos, considerando a utilização de cabos padrão solar de 6 mm². Os cabos totalizaram um comprimento total de 1806,4 metros;
- base de dados climáticas: TMY;
- valor médio da temperatura ambiente de operação: 23,5 °C;
- valor médio da temperatura ambiente da célula: 34,1 °C;
- tempo de operação: 4622 horas;
- variação de irradiância solar: 5%;
- percentual de sujeira: 2%. O mesmo valor foi adotado para todos os meses do ano;
- modelo de transposição: modelo de Perez;
- modelo de temperatura: modelo de difusão;
- propagação de temperatura na célula: 4 °C; e
- perdas estimadas no lado CA: 0,5%;

Baseado nestes parâmetros, a Figura 14 apresenta a expectativa de produção de energia, por mês. Tais resultados evidenciam que, ao longo de um ano, a energia produzida pelo sistema pode atingir a marca de 246,438 MWh. O mês de agosto se apresenta como o período de maior produção de energia, integralizando uma produção provável de 24,3 kWh, enquanto o mês de novembro apresenta a menor produção, com metas de 17,1 kWh. De forma complementar, a Figura 15 apresenta as fontes e percentuais de perdas de energia no sistema na cadeia de conversão de energia.

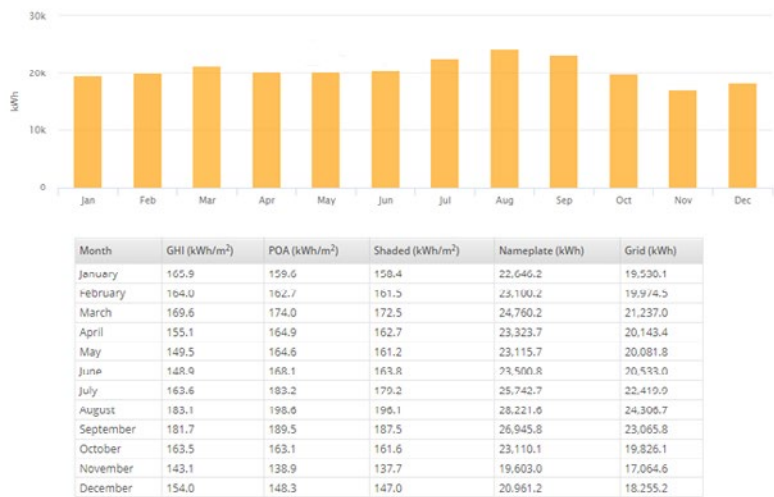


Figura 14. Expectativa de produção mensal de energia

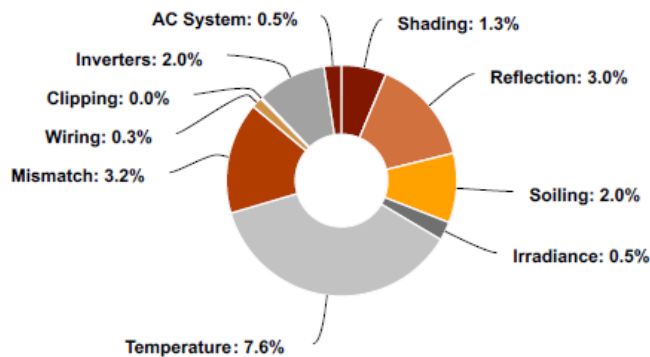


Figura 15. Perdas de energia no sistema fotovoltaico

Por fim, as simulações indicam uma taxa de desempenho (*Performance Ratio*) da ordem de 0,81. Este valor é superior ao valor definido nas premissas do projeto.

5.2 Avaliação do Sistema – Dados de Medição do Inversor

O desempenho do sistema fotovoltaico, em termos da energia produzida, está exemplificado pela Figura 16. Os dados apresentam a produção de energia verificada entre 25/5/2020 e 31/5/2020, para cada um dos inversores, e foram obtidos a partir do sistema de monitoramento que integra o próprio dispositivo. Nesse contexto, destaca-se que, nesta semana, o sistema apresentou uma produção total 4,13 MWh, sendo os inversores 1, 2 e 3 responsáveis, respectivamente, por 1,21 MWh, 1,44 MWh e 1,48 MWh. Os dados anteriores evidenciam uma produção de energia em consonância com aquela prevista nas condições de simulação, as quais indicam, para o mês de maio, uma estimativa de 5,0 MWh. As discrepâncias observadas se relacionam às diferenças climáticas entre a série histórica de dados utilizadas na simulação e as condições efetivamente observadas no período supracitado.

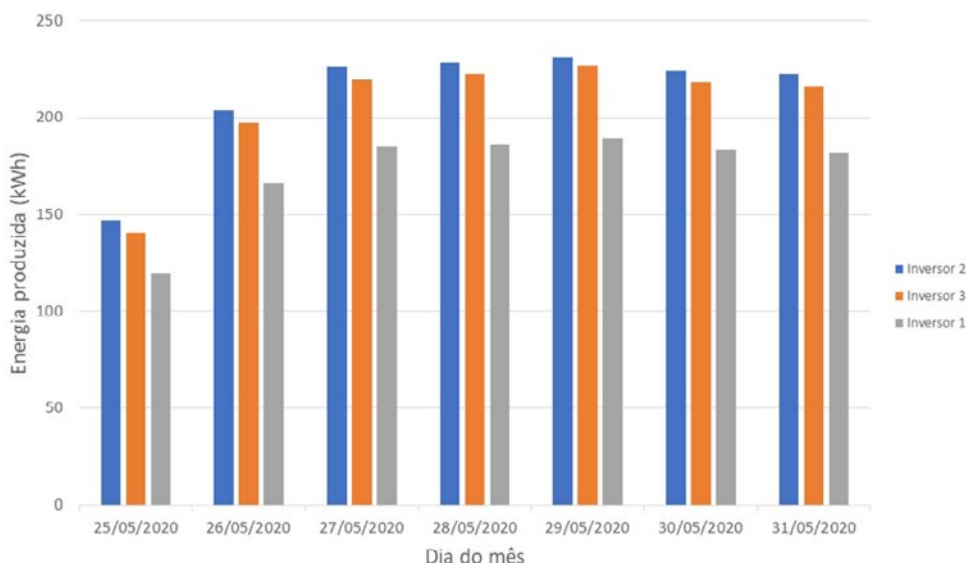


Figura 16. Energia produzida pelo sistema fotovoltaico, de 25/5/2020 a 31/5/2020

De forma complementar, a Figura 17 apresenta as curvas diárias de operação para 25/05/2020 e 31/05/2020.

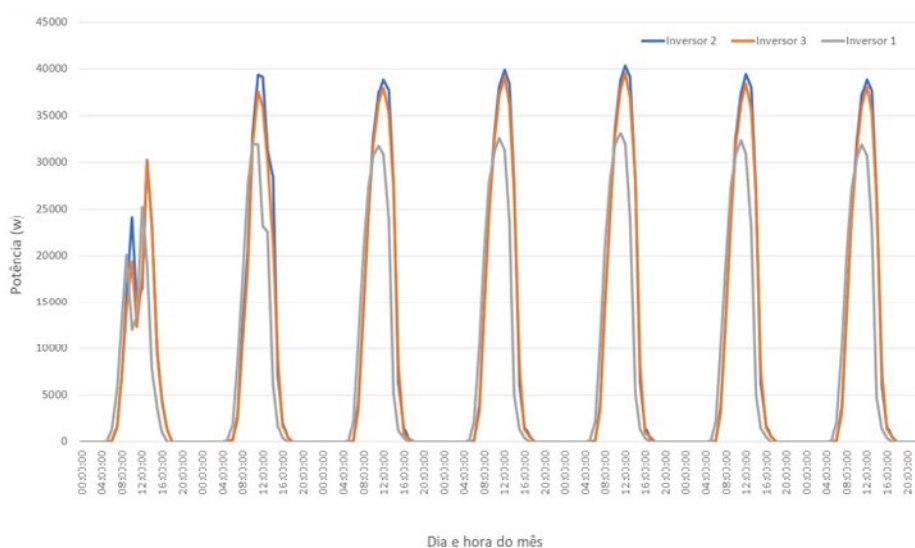


Figura 17. Operação do sistema fotovoltaico, de 25/5/2020 a 31/5/2020

Por fim, a Figura 18 apresenta os resultados, informados pelo sistema supervisor do inversor, para a emissão evitada de gases de efeito estufa, os quais foram considerados desde o início da operação do sistema até a data de publicação deste livro. Tais dados abrangem as emissões de Dióxido de Carbono, Óxido de Nitrogênio e Dióxido de Enxofre e são estimados a partir da comparação entre a energia produzida pelo sistema fotovoltaico e aquela que deixa de ser produzida por fontes de energia baseada em combustíveis fósseis.

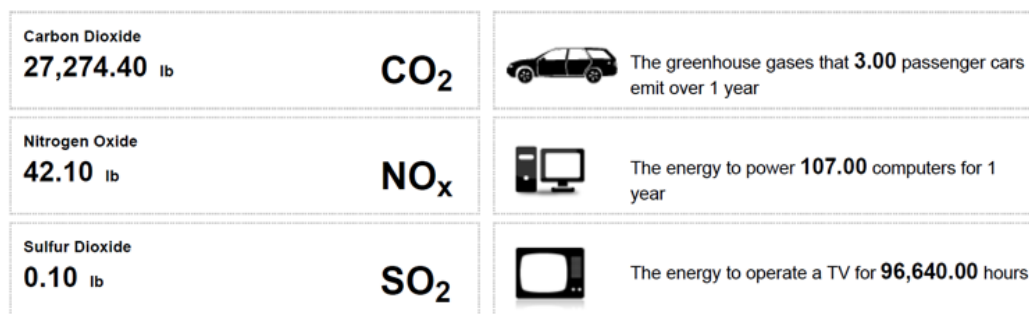


Figura 18. Emissão evitada de gases de efeito estufa – estimativa realizada entre a entrada em operação do sistema e 1/6/2020

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as experiências associadas à implantação de geração solar fotovoltaica de 150 kWp nos prédios da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Tal sistema se insere no âmbito do PEE intitulado “Eficiência Energética em Prédios Públicos da Universidade de Brasília”, o qual é resultante de acordos de cooperação FUB-Finatec-CEB.

Os resultados e as experiências adquiridas na execução desta instalação permitiram a definição de um conjunto de diretrizes que podem ser utilizadas durante o ciclo de vida do sistema e tendem a subsidiar o planejamento, elaboração de projeto executivo, implantação, operação, manutenção, *retrofitting* e desmonte/descarte de equipamentos.

7. REFERÊNCIAS

- [1] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE – PMI. *Guide of Project Management Body of Knowledge*. PMBOK, 2013.
- [2] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSN, J. *Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações*. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2005.
- [3] BAXTER, M. *Projeto de Produto – Guia prático para o design de novos produtos*. 3ª edição, São Paulo, SP: Edgar Blucher, 2011.
- [4] FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. 9ª edição, São Paulo, SP: LTC, 2017.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 16690:2019 – Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto*. São Paulo, SP, 2019.
- [6] _____. *ABNT NBR 16274:2014 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho*. São Paulo, SP, 2014.
- [7] _____. *ABNT NBR 5410:2004 Versão Corrigida: 2008 – Instalações elétricas em baixa tensão*. São Paulo, SP, 2008.
- [8] _____. *ABNT NBR 5419:2015 Versão Corrigida 2018 – Proteção contra descargas atmosféricas*. São Paulo, SP, 2018.
- [9] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução normativa 482/2012*. Brasília, DF, 2012.
- [10] _____. *Resolução normativa 687/2015*. Brasília, DF, 2015.
- [11] _____. *Resolução normativa 786/2017*. Brasília, DF, 2017.

CAPÍTULO 4

Experiências na Execução de Medição e Verificação de Performance de Ações de Eficiência Energética

Alex Reis

Loana Nunes Velasco

João Pedro Alemonge Honorato

Alexandre Schinazi

Bruno Marcos Chaves da Silva

Hamilton Yair Ortiz Cuchivague

Pedro Paulo Fernandes da Silva



OBJETIVO

Apresentar conceitos relacionados ao Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance de ações de eficiência energética.

Descrever experiências na realização de Medição e Verificação de Performance, por meio de exemplos práticos que abrangem situações reais.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais barreiras para a difusão da cultura da eficiência energética (EE) é a dificuldade de quantificar os benefícios das ações realizadas e superar as incertezas. Nesse sentido, o processo de Medição e Verificação de performance (M&V) surge como tentativa de suplantar esta barreira e aumentar a confiabilidade de um projeto. Basicamente, a M&V consiste na aplicação de mecanismos metodológicos para determinar, de modo seguro e confiável, a economia real de energia proveniente das ações de eficiência energética. Como a economia não pode ser medida diretamente, o processo de M&V determina os ganhos obtidos a partir da comparação entre o consumo medido antes e depois da implementação do projeto (EVO, 2012).

De maneira geral, uma ação de M&V consiste em uma sequência de etapas, as quais são estruturadas de forma a garantir a confiabilidade dos resultados medidos e se caracterizam por:

- confecção de um plano de Medição e Verificação, o qual orienta as atividades e os métodos a serem empregados, assim como os cálculos e estimativas a serem realizados;
- instalação, calibração e manutenção de medidores ou *softwares* de medição;
- coleta e processamento de dados obtidos; e
- confecção do relatório final de M&V, com garantias de reprodutibilidade e verificação do relatório por terceiros.

Além disso, quando corretamente integradas, as atividades de M&V podem reforçar a operação e manutenção das economias obtidas no projeto, evitando que os benefícios obtidos se percam ao longo do tempo (EVO, 2019).

O Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) é o documento de referência para a execução de um processo de M&V, definindo seus objetivos e impactos/benefícios das ações, conforme exemplificado na Tabela 1. Deve-se destacar que o Guia de M&V proposto pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) se baseia no PIMVP.

Tabela 1. Objetivos de um processo de Medição e Verificação. Fonte: Evo (2012)

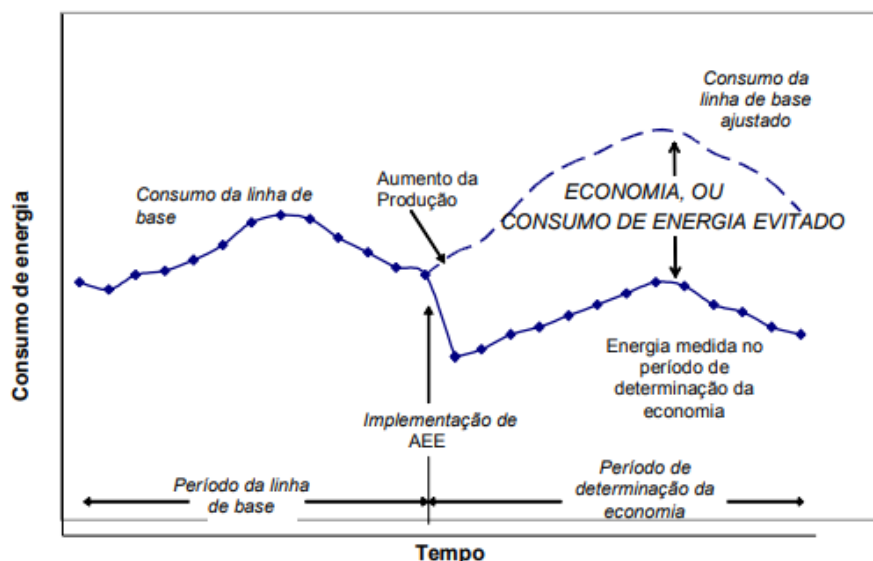
Objetivos	Benefícios
Aumentar a economia de energia	A determinação da economia de energia ajuda os gestores a ajustar a concepção das Ações de Eficiência Energética (AEE) e seus processos, de modo a aumentar a economia e assegurar a manutenção dos ganhos obtidos no projeto.
Documentar transações financeiras	Em alguns projetos, a economia obtida pela EE constitui a base dos pagamentos financeiros através de um contrato de desempenho energético. A medição exata da economia é fundamental para determinação transparente das transações financeiras.
Aumentar o financiamento para projetos de eficiência	Aumento da transparência e credibilidade dos relatórios acerca dos investimentos em eficiência, subindo o nível de confiança de investidores e patrocinadores e, assim, aumentando as possibilidades de financiamento para tais projetos.
Melhorar projetos de engenharia, funcionamento e manutenção	Ajuda os gestores a descobrir e reduzir problemas de manutenção e funcionamento, a fim de gerir as instalações de modo mais eficiente e gerar informações para a concepção de projetos futuros.
Aumentar o valor dos créditos de redução de emissão	A determinação da economia de energia melhora os relatórios de redução de emissões embasando parte de suas informações.
Apoiar a avaliação de programas de eficiência regionais	Programas governamentais ou de empresas de energia podem usar os dados obtidos nas instalações selecionadas com o objetivo de realizar projeções e outras suposições, de modo a prever a economia gerada em seus programas de eficiência energética.
Aumentar a compreensão do público acerca da gestão energética	Ao aumentar a credibilidade dos projetos de EE, o M&V aumenta a aceitação pública encorajando o investimento nestes projetos e conscientizando a população sobre os benefícios da racionalização do uso de energia.

Nesse contexto, este capítulo tem por objetivo descrever experiências associadas à realização de processos de Medição e Verificação de performance de ações de eficiência energética. Este documento possui a seguinte estrutura:

- a seção 2 elenca um conjunto de conceitos associados ao processo de M&V, os quais subsidiam a definição de procedimentos de medição e análise de dados;
- a seção 3 descreve as metodologias de M&V definidas no PIMVP;
- a seção 4 apresenta as características do plano de Medição e Verificação, de forma a indicar o conteúdo e definições que este documento deve possuir;
- a seção 5 contém aspectos práticos do processo de M&V, de modo a detalhar a execução de procedimentos do PIMVP e demonstrar a realização de tratamento de dados; e
- a seção 6 apresenta trechos de relatórios de processos de M&V; e
- por fim, a seção 7 apresenta considerações finais sobre o capítulo.

2. CONCEITOS BÁSICOS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

Esta seção apresenta um conjunto de conceitos associados ao processo de M&V. Como a economia de energia não pode ser medida diretamente, torna-se necessário definir a chamada “linha de base” para o período anterior e posterior às ações de eficiência energética (AEE), ajustando as características, de forma a refletir a realidade e possibilitar a comparação entre os consumos (EVO, 2012). A Figura 1 abaixo apresenta um exemplo de linhas de base.



Fonte: Evo (2012)

Figura 1. Exemplo de histórico de consumo

A energia economizada pela AEE é obtida pela subtração da energia medida no período de linha de base da energia medida no período de determinação da economia. Nesse contexto, deve-se ressaltar que a linha de base precisa ser ajustada para refletir mudanças no padrão de utilização e alterações na instalação, de maneira a refletir a realidade e a real economia. Desse modo, a equação (1) sintetiza o processo de M&V.

$$\text{Economia} = (\text{Consumo\_linha\_de\_base} - \text{Consumo\_determinação\_da\_economia}) \pm \text{Ajustes} \quad (1)$$

Na sequência, apresentam-se características que devem ser consideradas para a implementação da M&V.

2.1 Fronteira de Medição

A fronteira de medição corresponde aos limites da instalação sob análise e deve ser definida de acordo com o método de M&V e os parâmetros que se deseja medir. Além disso, ela delimita os fluxos de energia em um determinado sistema (EVO, 2012). A Figura 2 apresenta um exemplo de fronteira de medição para um sistema de iluminação.

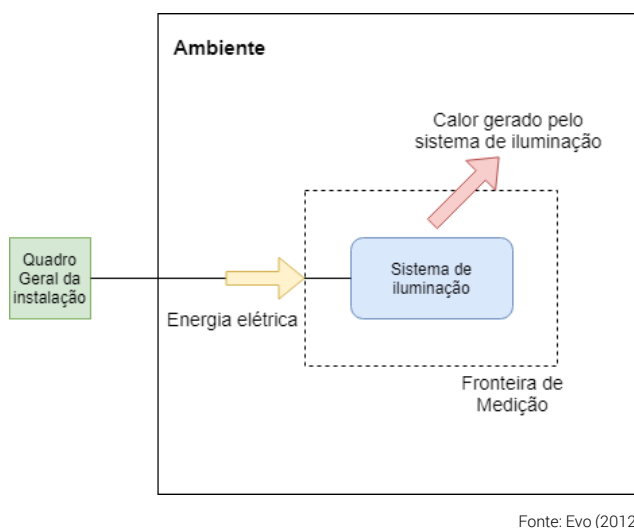


Figura 2. Exemplo de histórico de consumo

Se o objetivo da medição se foca na gestão ou monitoramento de apenas um equipamento ou sistema específico, deve-se ajustar a fronteira de medição em torno destes componentes usando as opções de medição isolada, conforme métodos A e B detalhados na seção 3. Por outro lado, quando o objetivo é gerir o desempenho energético de toda a instalação, a fronteira deve englobar toda o complexo usando as opções de medição global, conforme Métodos C e D.

2.2 Período da Linha de Base

O período de linha de base é usado para medir o consumo de energia de uma instalação ou sistema antes da execução de uma AEE, com vistas à criação de um perfil de consumo. Este período deve cobrir um ciclo completo de funcionamento, desde o consumo máximo de energia ao mínimo tendo uma duração específica para cada tipo de sistema a ser analisado (EVO, 2012).

Idealmente, esse período seria de um ano e refletiria a variação do consumo ao longo de todos os meses em função das variáveis determinadas. Todavia, a realização de uma medição de um equipamento ou sistema durante um ano implica elevados custos, no que concerne aos equipamentos de medição e profissionais para coletar e tratar os dados. Assim, os períodos de medição costumam ser menores; e os resultados, extrapolados para o restante do tempo de análise. Vale ressaltar que este processo insere uma incerteza nos cálculos, de forma que se deve sempre buscar o ponto ótimo entre precisão e custo.

O uso de energia global em edifícios é afetado diretamente por condições climáticas e condições de operação, de modo que as medições da linha de base devem representar bem todas as características envolvidas a fim de garantir que este período condiz com a realidade da instalação.

2.3 Período de Determinação da Economia

O período de determinação da economia deve englobar pelo menos um ciclo de funcionamento do equipamento ou instalação, de forma a caracterizar completamente a eficácia da economia em todos os modos de funcionamento e possibilitar a comparação com o período de linha de base. Em geral, ele apresenta a mesma duração que o período de determinação da linha de base (EVO, 2012).

De forma a exemplificar a problemática da escolha do período de determinação, considere um processo de M&V em um sistema de iluminação de um edifício, o qual é composto por lâmpadas sem dimerização, ou seja, apresentam apenas dois estados, ligado ou desligado. Esse tipo de carga possui um comportamento de consumo relativamente constante, uma vez que, após ser acionada e atingir a estabilidade térmica, seu consumo tende a se manter em valores nominais durante todo o tempo de funcionamento. Nesse caso, não é necessário realizar um ano de medição para caracterizar a economia desta AEE. Por outro lado, considere o consumo de energia de um ar-condicionado central em uma universidade. Nesse caso, tanto a taxa de ocupação da edificação, a temperatura ambiente e o período do ano influenciam o consumo de energia. Nessa situação, existe a necessidade de um período de linha de base e determinação da economia mais extensos e que englobem tais variações.

Esses exemplos simples demonstram que a escolha do tempo de medição para a determinação da economia vai depender do sistema sob análise, sendo esta escolha do responsável técnico pelo processo de M&V. Todavia, deve-se destacar que é necessário obter dados de medição estatisticamente válidos, para que o sistema possa ser caracterizado e que os modelos de extrapolação produzam resultados condizentes com a realidade.

2.4 Bases para Ajustes

O termo de "ajustes" presente na equação 1 deve ser calculado a partir de fatores físicos e mensuráveis acerca das características que regem o consumo de energia. São possíveis dois tipos de ajustes para mensuração da economia (EVO, 2012):

- ajustes de rotina: quaisquer fatores que variam periodicamente durante o período de determinação da economia, como, por exemplo, temperatura ou produção devem ser levados em conta, de modo a ajustar a linha de base e refletir corretamente a energia economizada. Contudo, para realização dos ajustes, devem-se utilizar modelos matemáticos e estatísticos válidos para justificar as alterações; e
- ajustes não de rotina: fatores que influenciam o consumo de energia, porém não há expectativas de mudança, como, por exemplo, tamanho da instalação ou alteração no tempo de utilização dos equipamentos que devem ser monitorados, de forma a ajustar a linha de base caso haja mudanças e validar a economia real de energia.

Todo ajuste realizado deve ser passível de medição, para não alterar os níveis de confiabilidade do processo de Medição e Verificação.

2.5 Variáveis Independentes e Fatores Estáticos

Estes conceitos estão diretamente relacionados com a variável “ajustes” indicada na equação 1 e precisam ser definidos para realização do cálculo de economia de energia. Nesse contexto:

- as variáveis independentes determinam fatores que impactam diretamente no consumo de energia e variam periodicamente, de modo que é possível criar um modelo matemático que correlacione esta variável ao consumo de energia. Assim, é possível criar um modelo de ajuste de rotina que relacione o período de linha de base ao período de determinação da economia e garanta a validade dos ajustes realizados (EVO, 2012); e
- os fatores estáticos representam variáveis que afetam o consumo de energia, porém se espera que não se alterem durante a determinação da economia de energia. Eles devem ser monitorados e, caso se alterem, servirão de base para os ajustes não de rotina (EVO, 2012).

De posse das variáveis independentes e fatores estáticos, podem-se traçar os períodos de linha de base e de determinação da economia, assim como todos os ajustes necessários, possibilitando a aplicação da equação 1 e quantificação da economia de energia ou uso evitado de energia.

2.6 Efeitos Interativos

Ao se realizar mais de uma AEE em uma instalação, existe a probabilidade da interação de efeitos, de forma a alterar o consumo de energia (EVO, 2012). De modo a exemplificar os conceitos relativos aos efeitos interativos, considere um projeto que realize a substituição de refletores de vapor de sódio por refletores de LED em um galpão. Este tipo de AEE provoca uma redução na geração de calor associada aos equipamentos de iluminação e, consequentemente, afetará a carga térmica que precisa ser dissipada pelos aparelhos de ar-condicionados. O resultado está associado a uma redução de consumo nos aparelhos de climatização, uma vez que se reduziu sua necessidade de resfriamento.

Todavia, deve-se destacar que a interação nem sempre é positiva, como exposta no caso anterior. Existem situações em que uma determinada ação pode ocasionar aumento no consumo de outros elementos existentes no sistema. Nesse contexto, considere um projeto onde ocorra um aumento da área de janelas de uma edificação, tendo em vista um melhor aproveitamento da iluminação natural. Esta situação implica um aumento de consumo de sistemas de condicionamento ambiental, em função de um aumento na carga térmica. Dessa forma, é necessário o mapeamento dos fatores interativos, para que sejam realizados os devidos cálculos de compensação no período de determinação de economia de energia.

2.7 Incerteza

Para garantir que o erro associado ao processo de medição esteja dentro das faixas definidas para o processo de M&V, o tratamento de dados durante a fase de determinação de economia de energia deve gerir as incertezas e garantir a precisão do resultado.

As principais fontes de incertezas segundo o PIMVP 2012 são:

- instrumentação: são os erros agregados à precisão dos equipamentos de medição utilizados;
- modelagem: é a incapacidade de criar modelos matemáticos que incluam todos os parâmetros que influenciam o sistema;
- amostragem: é a utilização de amostras estatísticas para representar toda a população, o que traz um erro agregado;
- efeitos interativos: são efeitos para além da fronteira de medição não completamente incluídos na metodologia de cálculo da economia; e
- estimativa dos parâmetros: toda estimativa realizada possui um erro agregado.

Para comunicar uma economia de forma estatisticamente válida, deve ser expresso o intervalo de confiança e a precisão do resultado. A confiança refere-se à probabilidade de que a economia estimada esteja dentro do intervalo de precisão estabelecido (EVO, 2012). De forma a exemplificar esta condição, considere que o resultado estimado para economia de energia de uma AEE é calculado em 1 MWh/ano, com uma confiança de 90% e uma precisão de 10%. Isso significa que há 90% de chance de a economia real de energia estar na faixa de 1 MWh/ano mais ou menos 10% deste valor. Assim, a precisão define a faixa de valores em torno do valor médio calculado nos quais a economia real pode estar, e a confiança define a probabilidade de o valor real estar neste intervalo.

2.8 Amostragem

O processo de M&V envolve custos e, por consequência, implica a necessidade de análise do custo-benefício da técnica aplicada, do número de pontos medidos e da duração do processo. Tais condições visam à avaliação das melhores opções, de forma a garantir resultado com o grau de confiança e precisão que irá satisfazer o cliente e o custo relacionado a isso.

Nesse contexto, uma forma de se reduzirem os custos e garantir a qualidade da Medição e Verificação se dá por meio da aplicação de técnicas de amostragem estatística. O procedimento adotado pelo PIMVP tem os seguintes passos:

- selecionar uma população homogênea: se há dois ou mais tipos diferentes de unidades na população, estas deverão ser agrupadas e a amostragem deverá ser feita separadamente;
- determinar os níveis desejados de precisão e de confiança: a abordagem convencional consiste em conceber a amostragem para obter um intervalo de confiança de 90% e uma precisão de $\pm 10\%$. No entanto, o Plano de M&V precisa de considerar os limites criados pelo orçamento. Melhorar a precisão de $\pm 20\%$ para $\pm 10\%$ aumentará o tamanho da amostra em quatro vezes, ao passo que melhorá-la para $\pm 2\%$ aumentará o tamanho da amostra em 100 vezes. A seleção dos critérios de amostragem adequados exige o equilíbrio dos requerimentos de precisão com os custos de M&V;

- decidir o nível de desagregação: estabelecer os critérios do intervalo de confiança e de precisão devem ser aplicados à medição de todos os componentes ou a vários subgrupos de componentes; e
- calcular o tamanho da amostra inicial: baseando-se nos níveis de precisão e confiança, é possível determinar o tamanho da amostra global;

$$\eta = \frac{z^2 \cdot cv^2}{e^2} \quad (2)$$

Em que:

- ▶ η é a estimativa inicial do tamanho da amostra requerido, antes de começar a amostragem;
 - ▶ cv é o coeficiente de variância, definido como o desvio padrão das leituras dividido pela média. Até que a média real e o desvio padrão da população possam ser estimados a partir de amostra reais, 0,5 poderá ser usado como estimativa inicial para o cv ;
 - ▶ e é o nível desejado de precisão;
 - ▶ z é o valor padrão de distribuição normal, com um número infinito de leituras e para o intervalo de confiança desejado. Por exemplo, z é 1,96 para um intervalo de confiança de 95% (1,64 para 90%; 1,28 para 80%; e 0,67 para 50% de confiança).
- ajustar a estimativa inicial do tamanho da amostra para pequenas populações: o tamanho da amostra necessário poderá ser reduzido se toda a população (N) a ser sujeita à amostragem não for 20 vezes maior do que o tamanho da amostra. Este ajuste reduz o tamanho da amostra ($\tilde{n}$) pela equação (3); e

$$\tilde{n} = \frac{\eta \cdot N}{\eta + N} \quad (3)$$

- finalizar o tamanho da amostra: uma vez que o tamanho inicial da amostra (η) é determinado usando um cv suposto, é crucial lembrar-se de que o cv real da população a ser sujeita à amostragem pode ser diferente. Por conseguinte, um tamanho de amostra real diferente pode ser necessário para obedecer ao critério de precisão. Se o cv real se revelar inferior à suposição inicial no passo 4, o tamanho necessário da amostra terá sido desnecessariamente grande demais para atingir os objetivos de precisão. Se o cv real se revelar maior do que o suposto, o objetivo de precisão não será atingido, a menos que se aumente o tamanho da amostra para além do valor calculado pelas equações 2 e 3. À medida que a amostragem continua, a média e o desvio padrão das leituras devem ser calculados. O cv real e o tamanho da amostra necessários (equações 2 e 3) devem ser novamente calculados. Refazer estes cálculos pode permitir uma redução antecipada do processo de amostragem. Pode também levar à necessidade de realizar mais amostragens do que o originalmente planejado. Para manter os custos de M&V dentro do orçamento, pode ser apropriado estabelecer um tamanho de amostra máximo. Se este máximo for realmente alcançado após os novos cálculos mencionados acima, os relatórios de economia deverão registrar a precisão real obtida pela amostragem.

3. OPÇÕES DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DO PIMVP

Os conceitos apresentados na seção anterior são usados para definir a metodologia a ser implementada em um processo de M&V e guiar sua execução. Nesse contexto, o PIMVP define quatro métodos de M&V os dividindo em dois grandes grupos, conforme a Figura 3:

- o primeiro grupo corresponde a medições isoladas que visam analisar o consumo de equipamentos ou sistemas específicos; e
- o segundo grupo consiste em medições globais, para monitorar o impacto das AEE's de forma a englobar toda a instalação.

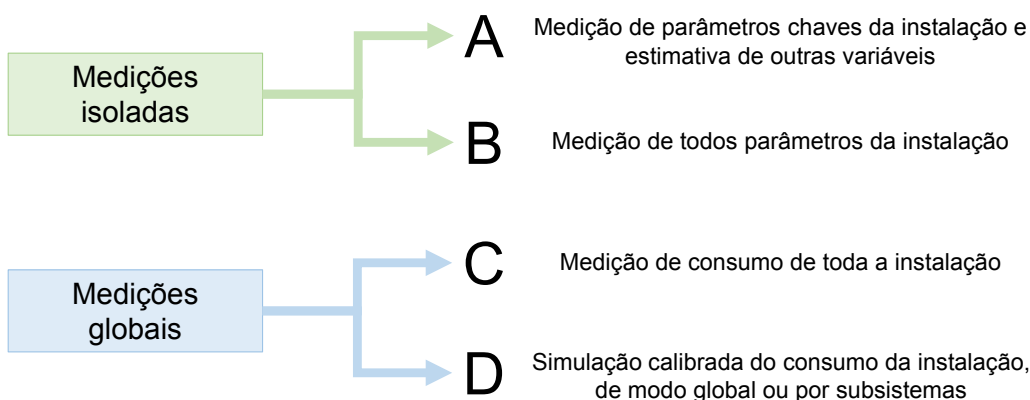


Figura 3. Métodos de M&V

3.1 Opção de Medição e Verificação A

A opção A consiste na medição isolada, de forma que os medidores de energia devem ser instalados nos limites da fronteira de medição e coletam dados apenas do equipamento ou sistema a ser analisado no processo de M&V. Este método monitora parâmetros chaves do subsistema e estima os demais, sendo a economia de energia derivada da combinação destas variáveis. Desse modo, a equação geral 1 pode ser alterada em função das características deste método, sendo a economia de energia determinada por (4). É possível observar que esta equação é formada por um parâmetro que foi medido e por um parâmetro que foi estimado, o qual será igual em ambos os períodos. Além disso, considerando que a medição é feita diretamente e em equipamentos isolados, o termo de ajustes foi omitido, pois não se esperam ajustes de rotina ou não rotina.

$$Economia = Valor\ estimado \times (Parametro\_medido\_na\_linha\_de\_base - Parametro\_medido\_na\_determinação\_da\_economia) \quad (4)$$

A opção A é utilizada para medir AEE's em sistemas relativamente constantes, de modo a medir um parâmetro e estimar outros. Por exemplo, uma AEE em um sistema de iluminação que substitua as lâmpadas por modelos mais eficientes, mas não altere os períodos de funcionamento do sistema, pode utilizar a opção A, de forma a medir a potência das lâmpadas antes e depois da ação e estimar as horas de funcionamento do sistema. Baseado neste exemplo, constata-se que esse método é indicado para M&V de ações de eficiência energética que alterem apenas um fator do sistema como, por exemplo, a potência ou o tempo de funcionamento. No caso de uma ação que altere mais parâmetros impossibilitando as estimativas, é necessária a escolha de outro método.

Como o método depende de estimativas, torna-se necessário realizar uma verificação da instalação, de modo a criar estimativas realistas, realizáveis e baseadas na utilização atual da instalação, para os períodos de linha de base e determinação da economia (EVO, 2012). Devem-se apresentar as justificativas para a estimação de grandezas que não serão medidas. Em alguns casos, pode utilizar dados históricos, informações disponibilizadas pelo fabricante do equipamento, testes de laboratório e outras informações que permitam a caracterização dos parâmetros que não estão sob medição direta. Todos os parâmetros estimados apresentam uma incerteza agregada que deve ser considerada no cálculo da economia de energia e deve ser justificada no plano de M&V, de forma a atender aos requisitos do PIMVP.

Esta opção pode ser a menos dispendiosa dentre as quatro, uma vez que o custo de se estimar um parâmetro pode ser menor do que o medir diretamente.

3.2 Opção de Medição e Verificação B

A opção B funciona como um aprimoramento da opção A, pois consiste na medição de todos os parâmetros necessários para calcular a energia consumida por um equipamento ou sistema, eliminando a necessidade da realização de estimativas de parâmetros.

Os medidores de energia são instalados na fronteira de medição e devem medir todas as quantidades de energia que fluem através desta fronteira. Conhecendo os fluxos de energia através da fronteira de medição, pode-se obter um modelo de consumo do equipamento, o qual correlaciona as variáveis medidas e viabiliza o cálculo dos ganhos obtidos com a AEE. Geralmente, esse processo é mais demorado que a opção A, uma vez que requer uma maior quantidade de medições. Em alguns casos, podem-se apresentar maiores complexidades de medição, em função da variável que se deseja monitorar.

A fronteira de medição pode englobar um único equipamento ou um conjunto, a depender das definições contidas no plano de M&V. Além disso, dependendo do tipo de grandeza a ser monitorada, estas medições podem ser feitas em laboratório, ou seja, o equipamento é levado para uma banca de testes na qual será simulado seu funcionamento para realizar as medições. Esta última situação pode ser exemplificada, por exemplo, pelas medições de potência por uma lâmpada em funcionamento.

Vale ressaltar que os analisadores de energia podem ser instalados diretamente no equipamento a ser medido ou podem ser instalados dentro do quadro de distribuição para monitorar um circuito inteiro. A melhor opção deve ser analisada em cada projeto, já que equipamentos analisadores de energia são caros e pode haver problemas em deixá-los expostos por longos períodos de tempo junto aos equipamentos ou dentro de quadros que não foram dimensionados para isso.

Por fim, o PIMVP define uma variante da equação geral 1 para calcular a energia economizada quando da aplicação do método B. A equação (5) é semelhante à equação geral com a diferença de que o termo de ajustes é omitido, já que todos os parâmetros são medidos neste método, e o equipamento é analisado de modo isolado e não se esperam ajustes de rotina ou não rotina.

$$\text{Economia} = (\text{Energia\_linha\_de\_base} - \text{Energia\_determinação\_da\_economia}) \quad (5)$$

3.3 Opção de Medição e Verificação C

Esta opção implica a utilização de medidores que englobem o consumo de toda a instalação, podendo ser aqueles utilizados pelas concessionárias de energia para medição de faturamento ou outros medidores próprios para a M&V. Assim, avaliam-se os impactos conjuntos de todas as AEE's e o desempenho energético de toda a instalação. A fronteira de medição inclui toda a instalação ou grande parte dela, em que se medem os efeitos positivos ou negativos de todas as alterações feitas na instalação, mesmo aquelas não relacionadas à AEE (EVO, 2012).

A opção C destina-se a projetos em que a economia é significativa em relação ao consumo total. Estima-se que a economia deve ultrapassar os 10% do consumo da linha de base para o método ser utilizado com confiança, considerando o período de determinação da economia inferior a dois anos (EVO, 2012).

Para a opção C, os ajustes de rotina são calculados por meio de um modelo matemático válido, que correlacione uma variável independente com o consumo geral de energia na instalação. Para se obter uma maior confiabilidade dos modelos, a opção C utiliza períodos completos de anos para análise, de modo a computar as variações sazonais nos modelos criados (EVO, 2012). Os "ajustes não de rotina" se constituem no principal desafio desta opção, pois são necessárias inspeções periódicas, de maneira a identificar as mudanças nos fatores estáticos e a manutenção das condições de operação nos períodos de linha de base e determinação de economia. Sendo assim, este método é indicado em locais de fácil acesso e com informações de ocupação, produção e tempo de funcionamento estruturadas para garantir que as condições se mantenham.

O custo para execução desta opção depende da origem dos dados de energia e da dificuldade para localizar e medir as alterações dos fatores estáticos dentro da fronteira de medição. Caso o medidor de faturamento de energia da concessionária local englobe todo o consumo e os fatores estáticos sejam relativamente simples de serem avaliados, esse método se mostra menos complexo e menos oneroso que os demais. Por outro lado, em algumas situações, pode ser necessária a instalação de submedições, de modo a obter dados significativos do consumo e reduzir a influência das variações inexplicáveis na medição global.

Vale ressaltar que, em algumas situações, a concessionária de energia estima os valores de consumo de energia para o cliente, principalmente se a instalação for afastada da área urbana e pequena, fazendo medições em intervalos maiores para ajustar suas estimativas. Nestes casos, não é possível utilizar a opção C já que os dados de medição não são válidos.

Por fim, as economias podem ser determinadas a partir da aplicação da equação 1.

3.4 Opção de Medição e Verificação D

A opção D consiste na utilização de um *software* de simulação, de forma a prever a energia economizada em toda a instalação ou subsistema afetado pela AEE. Um modelo que represente o equipamento ou sistema deve ser implementado e calibrado para prever um padrão de energia que corresponda aproximadamente aos verdadeiros dados medidos (EVO, 2012). Este método é empregado quando não há dados disponíveis para o período de linha de base, período de determinação da economia ou tais dados não são confiáveis. Assim, o modelo computacional visa criar uma representação fiel do consumo de energia antes e depois da implementação do projeto de eficiência energética e, portanto, permitir o cálculo da energia economizada.

A calibração do modelo, para que a simulação represente o real funcionamento da instalação, é a principal dificuldade do método. Além disso, são necessários dados de entrada estatisticamente válidos, de modo a reduzir a incerteza e permitir a documentação de todas as considerações realizadas para aplicação das simulações. Por outro lado, esse método dispensa a realização de ajustes, uma vez que ambos os períodos serão simulados sob as mesmas condições.

Por fim, as economias podem ser determinadas a partir dos resultados das simulações para a linha de base e para o período de determinação da economia, conforme equação (6). Além disso, deve-se estimar o erro associado à calibração, de forma a adicionar um termo de erro à equação geral 1.

$$\begin{aligned} \text{Economia} = & (\text{Energia\_obtida\_com\_modelo\_calibrado\_para\_linha\_de\_base} \\ & - \text{Energia\_obtida\_com\_modelo\_calibrado\_para\_determinação\_da\_economia}) \end{aligned} \quad (6)$$

3.5 Escolha da Opção de Medição e Verificação

A decisão da opção de M&V depende de diversos fatores, tais como o tipo de instalação, características das variáveis sob análise, recursos financeiros disponíveis para o processo, dentre outros. Nesse sentido, a Figura 4 apresenta um fluxograma, de cunho referencial, para subsidiar a escolha da opção de M&V.

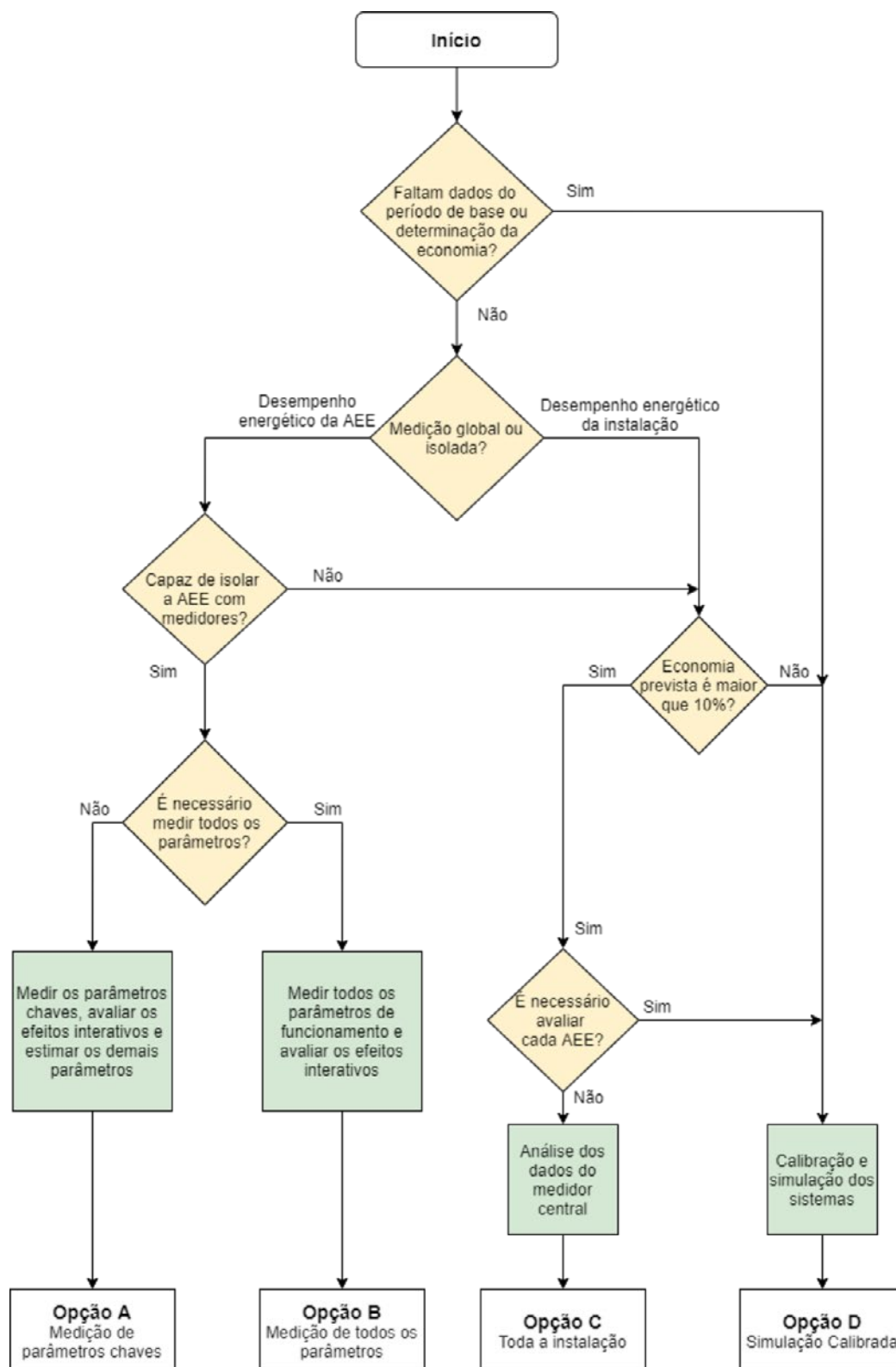


Figura 4. Referência para escolha de métodos de M&V

4. PLANO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

O Plano de Medição e Verificação é o documento responsável por definir como será realizado o processo de M&V. Este documento apresenta a opção do PIMVP que deve ser utilizada para avaliar as AEEs, as grandezas a ser medidas e outras características do processo, tais como: a fronteira de medição, os períodos de linha de base e determinação da economia, nível de confiança e precisão, dentre outros (EVO, 2012). Este documento orienta os procedimentos, estabelecendo premissas de medição, precisão e níveis de confiança, prazos e tende a tornar o trabalho transparente e reproduzível.

Um plano de M&V completo deve conter 13 tópicos, os quais são definidos pelo PIMVP e resumidos a seguir:

- objetivos da AEE: descrição da AEE e dos resultados esperados, assim como dos procedimentos da verificação operacional que indicarão o sucesso da implementação;
- opção do PIMVP e fronteira de medição: deve-se apresentar a opção escolhida, a fronteira de medição determinada e os efeitos interativos se existirem;
- linha de base, período, energia e condições: deve-se determinar o período no qual serão realizadas as medições, todos os dados de consumo e demanda de energia e todas as variáveis independentes e fatores estáticos que influenciam as AEEs;
- período de determinação da economia: o documento deve identificar o período no qual será monitorado o sistema, de modo a determinar a economia de energia proveniente da AEE;
- base para o ajuste: declarar o conjunto de condições às quais todas as medições serão ajustadas e definirá se a economia será reportada através de economia normalizada;
- procedimento de análise: define os procedimentos exatos de análise de dados a serem usados no relatório;
- preço da energia: indica o preço da energia a ser utilizada para calcular a economia advinda da AEE;
- especificação do medidor: especifica os pontos de medição e o período. Além disso, para medidores que não forem da concessionária, devem-se especificar as características da medição e o formato de medição do aparelho;
- responsabilidade de monitoramento: devem-se atribuir as responsabilidades presentes no plano de M&V aos respectivos profissionais responsáveis;
- precisão esperada: esta seção apresenta o cálculo das incertezas presentes nas medições e compara os valores obtidos com os limites apresentados, de forma a validar que o projeto está dentro dos limites de incerteza adequados;
- orçamento: define o orçamento e recursos necessários para determinação da economia de energia;
- formato do relatório: define a forma como os resultados serão reportados e documentados; e
- garantia de qualidade: especifica os procedimentos de garantia de qualidade que serão utilizados para realização do procedimento e confecção do relatório.

O Plano de Medição e Verificação deve atender a todas as normas específicas referentes a cada ação de eficiência energética.

5. ASPECTOS PRÁTICOS DA M&V

Esta seção apresenta aspectos práticos da aplicação das diferentes opções de M&V, de forma a se analisar a economia de energia advinda das AEEs e caracterizar o processo de tratamento de dados e cálculos estatísticos em cada opção.

5.1 Opção A – Aspectos Práticos

A opção A pode ser aplicada nas seguintes situações:

- é de interesse quantificar o desempenho de apenas um dos sistemas afetados pela AEE. Por exemplo, considere a substituição de lâmpadas incandescentes por LED em uma sala de aula que possui ar-condicionado. Além dos ganhos na redução de potência instalada das lâmpadas, há uma redução da carga térmica do ambiente. Entretanto, se somente o desempenho energético da substituição das lâmpadas for de interesse, a opção A pode ser aplicada avaliando apenas essa redução e desprezando os ganhos com a redução do consumo dos equipamentos de ar-condicionado;
- foram realizadas várias ações de eficiência energética e é necessário quantificar os ganhos de cada ação, tais como a troca de lâmpadas, troca de equipamentos de climatização etc;
- a economia estimada das ações de eficiência energética é baixa quando comparada ao consumo total da edificação, menor que 10%;
- as variáveis independentes que afetam o uso de energia não são complexas ou muito bem conhecidas, tais como o tempo de funcionamento diário de uma lâmpada, dias de uso de um equipamento ou tempo de operação e carregamento de um motor;
- as incertezas geradas pela estipulação das variáveis independentes são aceitáveis;
- não existem medidores de energia secundários instalados que monitoram essa carga;
- já existem medidores de energia secundários instalados que monitoram essa carga, mas não é possível isolar o consumo da carga que receberá a ação de eficiência energética de outras cargas; e
- a estipulação de alguns parâmetros é menos onerosa do que sua medição através da opção B ou opção D.

Na sequência, são apresentados exemplos de aplicação da opção A.

5.1.1 Estudo de caso 1

Este estudo de caso consiste na substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LEDs em uma sala de aula. A aplicação da opção A consiste nos seguintes passos:

1. Abrangência

- Escolher a localização da fronteira de medição (local de instalação dos medidores para isolar a carga de interesse).
 - ▷ Neste caso, a medição ocorrerá através do interruptor de iluminação da sala, e todas as lâmpadas estão em um único circuito.
- Estimar efeitos interativos da ação de eficiência energética.
 - ▷ Há efeito interativo com os equipamentos de ar-condicionado instalados na sala. Entretanto, esses efeitos serão desconsiderados para esse estudo.
- Avaliar que variáveis afetam a economia anual de energia.
 - ▷ Tempo de operação.
 - ▷ Potência instalada.
- Projetar o sistema de medição.
 - ▷ A medição ocorrerá através de multímetro, onde será medida a potência instantânea do circuito. As horas de operação são bastante previsíveis e podem ser estimadas para minimizar custo com Medição e Verificação.
- Escolher o período de linha de base.
 - ▷ Será medida a potência instantânea, um segundo, antes da substituição das lâmpadas.
- Escolher o período de determinação da economia.
 - ▷ Será medida a potência instantânea, um segundo, depois da substituição das lâmpadas.

2. Linha de base

- Verificar dados de calibração do medidor.
- Coletar informações operacionais do ambiente.
 - ▷ A sala de aula funciona 8 horas por dia (8:00 às 12:00 – 13:00 às 17:00), e somente dias letivos.
 - ▷ A escola possui 212 dias letivos por ano.
- Instalar medidor / medir a potência instantânea.
 - ▷ Dados da linha de base: os dados medidos estão exemplificados na Tabela 2.

Tabela 2. Linha de base – Estudo de caso 1, opção A do PIMVP

Potência Ativa Total (W)	Número de lâmpadas no ambiente	Tipo de lâmpada	Potência média por lâmpada (W)	Horas de Operação (horas/ano)	Consumo de Energia (kWh/ano)
1100	32	Fluorescente Tubular T8 – 120 cm	34,4	1696	1865,6

3. Medição de determinação da economia

- Verificar dados de calibração do medidor.
 - ▷ A determinação da economia deve ser realizada com o mesmo instrumento que realizou a medição da linha de base. Se for necessária a troca do equipamento, este fato deve ser registrado no relatório de Medição e Verificação.
 - ▷ Dados da determinação da economia: os dados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Determinação da economia – Estudo de caso 1, opção A do PIMVP

Potência Ativa Total (W)	Número de lâmpadas no ambiente	Tipo de lâmpada	Potência média por lâmpada (W)	Horas de Operação (horas/ano)	Consumo de Energia (kWh/ano)
580	32	Tubo LED T8 – 120 cm	18,1	1696	983,7

- Cálculo de economia de energia: indicado nas equações (7), (8) e (9).

$$Economia = Valor\_estimado \times (Parâmetro\_medido\_na\_linha\_de\_base - Parâmetro\_medido\_na\_determinação\_da\_economia) \quad (7)$$

$$Economia = horas\_operação \times (Potência\_total\_linha\_de\_base - Potência\_total\_determinação\_da\_economia) \quad (8)$$

$$Economia = 1.696 \times (1.100 - 580) = 881,9 \text{ kWh/ano} \quad (9)$$

- Cálculo redução de demanda: indicado na equação (10).

$$Economia = (Potência\_total\_linha\_de\_base - Potência\_total\_determinação\_da\_economia) = 0,52 \text{ kW} \quad (10)$$

- Cálculo de economia financeira: os resultados estão indicados na Tabela 4.
 - ▷ Avaliação das tarifas aplicáveis de acordo com o modelo tarifário do cliente e o perfil da ação de eficiência energética, se ela envolve horário de ponta ou não, por exemplo. Neste estudo de caso, o cliente está enquadrado no subgrupo tarifário A4 Verde, e a utilização da sala de aula ocorre apenas no horário de ponta, então somente as tarifas desse horário são importantes para essa análise.
 - i. tarifa de energia fora ponta = 0,56 R\$/kWh; e
 - ii. tarifa de demanda = 11,67.

Tabela 4. Economia financeira – Estudo de caso 1, opção A do PIMVP

Economia consumo Fora Ponta		Redução de demanda		Economia Total
(kWh/ano)	(R\$/ano)	(kW)	(R\$/ano)	(R\$/ano)
881,9	493,86	0,52	72,82	566,68

5.1.2 Estudo de caso 2

Este estudo de caso consiste no *retrofitting* da iluminação interna de uma universidade e necessita da determinação de uma amostra para aplicação da opção. Têm-se os seguintes passos de execução:

1. Abrangência

- Escolher a localização da fronteira de medição (local de instalação dos medidores para isolar a carga de interesse).
 - ▷ Neste caso, as lâmpadas estão distribuídas por toda a universidade, e, como é um volume significativo de equipamentos que serão substituídos, recomenda-se a aplicação de técnica de amostragem para reduzir custos com o processo de Medição e Verificação.
- Estimar efeitos interativos da ação de eficiência energética.
 - ▷ Há efeito interativo com os equipamentos de ar-condicionados. Entretanto, esses efeitos serão desconsiderados para esse estudo.
- Avaliar que variáveis afetam a economia anual de energia.
 - ▷ Tempo de operação.
 - ▷ Potência instalada.
- Projetar o sistema de medição.
 - ▷ A medição ocorrerá através de multímetro, onde será medida a potência instantânea das lâmpadas. As horas de operação são bastante previsíveis e podem ser estimadas para minimizar custo com Medição e Verificação.
- Escolher o período de linha de base.
 - ▷ Será medida a potência instantânea, um segundo, antes da substituição das lâmpadas.
- Escolher o período de determinação da economia.
 - ▷ Será medida a potência instantânea, um segundo, depois da substituição das lâmpadas.

2. Linha de base

- Verificar dados de calibração do medidor.
- Coletar informações operacionais do ambiente.
 - ▷ Coletar informações de cada ambiente:
 - i. número de lâmpadas;
 - ii. tipos de lâmpadas e luminárias;
 - iii. tempo de funcionamento por dia; e
 - iv. dias de funcionamento por ano
- Determinar amostragem necessária.
 - ▷ Selecionar uma população homogênea.
 - ▷ Para este estudo de caso, serão substituídas 7.871 lâmpadas fluorescentes de baixa eficiência por lâmpadas LED, sendo que as populações foram divididas de acordo com o tipo de luminária, tipo de lâmpada e potência. Na sequência, as populações homogêneas das lâmpadas fluorescentes:

- i. população 1 – 120 Lâmpadas Tubular T5 (14W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas;
 - ii. população 2 – 3.754 Lâmpadas Tubular T8 (32W), instaladas em luminárias de duas lâmpadas;
 - iii. população 3 – 2.004 Lâmpadas Tubular T8 (32W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas;
 - iv. população 4 – 470 Lâmpadas Tubular T8 (40W), instaladas em luminárias de duas lâmpadas;
 - v. população 5 – 1.132 Lâmpadas Tubular T8 (40W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas;
 - vi. população 6 – 76 Lâmpadas Tubular T8 (40W), instaladas em luminárias de uma lâmpada;
 - vii. população 7 – 32 Lâmpadas Tubular T8 (32W), instaladas em luminárias de uma lâmpada;
 - viii. população 8 – 66 Lâmpadas Compacta (15W), instaladas em luminárias de uma lâmpada;
 - ix. população 9 – 49 Lâmpadas Compacta (20W), instaladas em luminárias de uma lâmpada; e
 - x. população 10 – 168 Lâmpadas Tubular T8 (16W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas.
- Determinar os níveis desejados de precisão e de confiança.
 - ▷ Esse projeto será submetido a um programa que financia projetos de eficiência energética, os valores de precisão e de confiança são pré-requisitos para aprovação, sendo eles 95% de confiança e 10% de precisão.
 - Decidir o nível de desagregação.
 - ▷ Neste caso, o único componente a ser medido é a potência das lâmpadas, então todos os critérios do intervalo de confiança e de precisão serão aplicados ao componente.
 - Calcular o tamanho da amostra inicial.
 - ▷ Aplicando a equação (2), considerando os parâmetros indicados na sequência, se obtém (11):
 - i. cv – Até que a média real e o desvio padrão da população possam ser estimados a partir de amostras reais, 0,5 será usado como estimativa inicial para o cv ;
 - ii. $e = 0,10$; e
 - iii. $z = 1,96$ (valor de referência para 95%).

$$\eta = \frac{1,96^2 \cdot 0,5^2}{0,1^2} \quad (11)$$

- Ajustar a estimativa inicial do tamanho da amostra para pequenas populações.
 - ▷ A amostragem foi ajustada de acordo com a equação (3). Os resultados estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5. Determinação da amostragem de linha de base – Estudo de caso 2, opção A do PIMVP

Grupo	População	Amostragem inicial	Aplica ajuste?	Amostragem Final
T5 - 4x14W	120	96	Sim	53
T8 - 2x32W	3.754	96	Não	96
T8 - 4x32W	2.004	96	Não	96
T10 - 2x40W	470	96	Sim	80
T10 - 4x40W	1.132	96	Sim	88
T10 - 1x40W	76	96	Sim	42
T8 - 1x32W	32	96	Sim	24
Compacta 1X15W	66	96	Sim	39
Compacta 1X20W	49	96	Sim	32
T8 - 4x16W	168	96	Sim	61

- Finalizar o tamanho da amostra.
 - ▷ À medida que as medições forem acontecendo, é necessário calcular o coeficiente de variância (cv) real e substituí-lo na equação de amostragem para verificar a necessidade de ajustar as amostragens.
- Realização das medições.
 - ▷ As medições podem ser realizadas através dos interruptores de um conjunto homogêneo de lâmpadas. Neste caso, a potência medida do conjunto deve ser dividida pelo número de lâmpadas daquele circuito. É necessário garantir que as lâmpadas daquele circuito sejam todas de um mesmo grupo homogêneo.

3. Medição de determinação da economia

- Verificar dados de calibração do medidor.
- Coletar informações operacionais do ambiente.
 - ▷ Características das lâmpadas substituirão as atuais.
- Determinar amostragem necessária.
 - ▷ Selecionar uma população homogênea.
 - ▷ Definir as novas populações homogêneas a partir das lâmpadas LED que irão substituir as atuais lâmpadas fluorescentes. Abaixo os grupos homogêneos:
 - i. população 1 – 120 Lâmpadas Tubo LED T5 (7,5W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas;
 - ii. população 2 – 4.224 Lâmpadas Tubo LED T8 (18W), instaladas em luminárias de duas lâmpadas;
 - iii. população 3 – 3.136 Lâmpadas Tubo LED T8 (18W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas;
 - iv. população 4 – 108 Lâmpadas Tubo LED T8 (18W), instaladas em luminárias de uma lâmpada;
 - v. população 5 – 168 Lâmpadas Tubo LED T8 (9W), instaladas em luminárias de quatro lâmpadas; e
 - vi. população 6 – 115 Lâmpadas LED Bulbo (8W), instaladas em luminárias de uma lâmpada;

- Determinar os níveis desejados de precisão e de confiança.
 - Manter os níveis de precisão e de confiança utilizados para a amostragem de linha de base, sendo eles 95% de confiança e 10% de precisão.
- Calcular o tamanho da amostra inicial e ajustar a estimativa inicial do tamanho da amostra para pequenas populações, conforme exemplificado na Tabela 6.

Tabela 6. Determinação da amostragem na determinação de economia – Estudo de caso 2, opção A do PIMVP

Grupo	População	Amostragem inicial	Aplica ajuste?	Amostragem Final
Tubo LED T5 4X7,5W	120	96	Sim	53
Tubo LED T8 2X18W	4.224	96	Não	96
Tubo LED T8 4X18W	3.136	96	Não	96
Tubo LED T8 1X18W	108	96	Sim	51
Tubo LED T8 4X9W	168	96	Sim	61
LED Bulbo 1X8W	115	96	Sim	52

- Finalizar o tamanho da amostra.
 - À medida que as medições forem acontecendo, é necessário calcular o coeficiente de variância (cv) real e substituí-lo na equação de amostragem para verificar a necessidade de ajustar as amostragens.
- Realização das medições.
 - Assim como na determinação da linha de base, as medições na determinação da economia podem ocorrer através dos interruptores de energia, tomando sempre o cuidado para que as lâmpadas do circuito medido sejam de uma mesma população homogênea.

5.2 Opção B – Aspectos Práticos

A opção B é aplicada nas seguintes situações:

- é de interesse quantificar o desempenho de todos os sistemas afetados pela Ação de Eficiência Energética. Por exemplo, considere a substituição de lâmpadas incandescentes por LED em uma sala de aula que possui ar-condicionado. Além dos ganhos na redução de potência instalada das lâmpadas, há uma redução da carga térmica do ambiente. Se é desejável quantificar todos os ganhos dessa ação de eficiência energética, é necessário medir os ganhos com a troca das lâmpadas e os ganhos com a redução do consumo dos equipamentos de climatização. Neste caso, a medição deve ocorrer no(s) quadro(s) de energia que alimenta(m) essa sala por um período antes da troca e um período após a troca das lâmpadas;
- as variáveis independentes não são conhecidas ou não podem ser previstas, sendo necessário o seu monitoramento. Por exemplo: não se conhece o tempo de funcionamento diário de uma lâmpada; não existe um padrão no uso de um equipamento; tempo de operação e carregamento de um motor são desconhecidos ou possuem uma variação que deve ser quantificada;

- há medidores secundários instalados monitorando a carga que passará pela ação de eficiência energética; e
- A medição de todas as variáveis e parâmetros é menos dispendiosa do que a opção D.

Na sequência, exemplos de aplicação da opção B.

5.2.1 Estudo de caso 1

Este estudo de caso consiste na substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LEDs em uma sala de aula. A aplicação da opção B consiste nos seguintes passos:

1. Abrangência

- Escolher a localização da fronteira de medição (local de instalação dos medidores para isolar a carga de interesse).
 - ▷ Neste caso, a medição ocorrerá através do interruptor de iluminação da sala, e todas as lâmpadas estão em um único circuito.
- Estimar efeitos interativos da ação de eficiência energética.
 - ▷ Há efeito interativo com os equipamentos de ar-condicionado instalados na sala. Entretanto, esses efeitos serão desconsiderados para esse estudo.
- Avaliar que variáveis afetam a economia anual de energia.
 - ▷ Tempo de operação.
 - ▷ Potência instalada.
- Projetar o sistema de medição.
 - ▷ A medição ocorrerá através de multímetro, onde será medida a potência instantânea do circuito e um “horímetro” para medir o tempo de operação da iluminação da sala.
- Escolher o período de linha de base.
 - ▷ Será medida a potência instantânea, um segundo, antes da substituição das lâmpadas.
 - ▷ Será medido o tempo de utilização da iluminação na sala de aula durante sete dias, de forma a englobar dias letivos e não letivos.
- Escolher o período de determinação da economia.
 - ▷ Será medida a potência instantânea, em intervalos de um segundo, depois da substituição das lâmpadas.

2. Linha de base

- Verificar dados de calibração dos medidores.
- Instalar medidor.
 - ▷ Medir o tempo de utilização da iluminação por sete dias.
 - ▷ Medir a potência instantânea.
 - ▷ Dados da linha de base: os dados para a construção da linha de base estão especificados na Tabela 7 e Tabela 8;

Tabela 7. Linha de base horas de operação – Estudo de caso 1, opção B do PIMVP

Dia	Dia 1 (Segunda)	Dia 2 (Terça)	Dia 3 (Quarta)	Dia 4 (Quinta)	Dia 5 (Sexta)	Dia 6 (Sábado)	Dia 7 (Domingo)
Tempo de Operação (horas)	8,5	8,2	8,1	8,3	8,4	0	0

Tabela 8. Linha de base – Estudo de caso 1, opção B do PIMVP

Potência Ativa Total (W)	Horas de Operação (horas/semana)*	Horas de Operação (horas/dia letivo)	Extrapolção Horas de Operação (horas/ano)	Consumo de Energia (kWh/ano)
1100	41,5	8,3	1759,6	1935,6

*Foi considerada uma semana típica com cinco dias letivos e dois dias não letivos.

3. Medição de determinação da economia

- Verificar dados de calibração do medidor.
 - A determinação da economia deve ser realizada com o mesmo instrumento que realizou a medição da linha de base, e se for necessária a troca do equipamento, este fato deve ser registrado no relatório de Medição e Verificação.
 - Dados da determinação da economia: os dados do período de determinação de economia estão especificados na Tabela 9.

Tabela 9. Determinação da economia – Estudo de caso 1, opção B do PIMVP

Potência Ativa Total (W)	Horas de Operação (horas/dia letivo)	Extrapolção Horas de Operação (horas/ano)	Consumo de Energia (kWh/ano)
580	8,3	1759,6	1020,6

Cálculo de economia de energia: o cálculo está apresentado nas equações (12) e (13).

$$Economia = horas\_operação \times (Potência\_total\_linha\_de\_base - Potência\_total\_determinação\_da\_economia) \quad (12)$$

$$Economia = 1.759,6 \times (1100 - 580) = 915 \text{ kWh/ano} \quad (13)$$

Cálculo de redução de demanda: o cálculo está apresentado na equação (14).

$$Economia = (Potência\_total\_linha\_de\_base - Potência\_total\_determinação\_da\_economia) = 0,52 \text{ kW} \quad (14)$$

- Cálculo de economia financeira: os resultados estão indicados na Tabela 10.
 - Avaliação das tarifas aplicáveis de acordo com o modelo tarifário do cliente e o perfil da ação de eficiência energética, se há impacto da ação no consumo no horário de ponta ou não, por exemplo. Neste estudo de caso, o cliente está enquadrado no subgrupo tarifário A4 Verde e a utilização da sala de aula ocorre apenas no horário fora ponta, então somente as tarifas desse horário são importantes para essa análise.

- i. tarifa de energia fora ponta = 0,56 R\$/kWh; e
- ii. tarifa de demanda = 11,67.

Tabela 10. Economia financeira – Estudo de caso 1, opção B do PIMVP

Economia consumo Fora Ponta		Redução de demanda		Economia Total
(kWh/ano)	(R\$/ano)	(kW)	(R\$/ano)	(R\$/ano)
915	512,40	0,52	72,82	585,22

5.2.2 Estudo de caso 2

Este estudo de caso consiste na gestão do tempo de funcionamento de uma central de água gelada (CAG) e aplicação de *free cooling* na edificação. A aplicação da opção B consiste nos seguintes passos:

1. Abrangência

- Resumo das ações de eficiência energética.
 - ▷ Alteração do horário de acionamento da CAG de 07h30min para 9 horas.
 - ▷ Utilização de *free cooling* – Realizar uma renovação do ar interno diariamente às 4 horas, durante 30 minutos, aproveitando as temperaturas mais baixas da madrugada para reduzir a carga térmica residual da edificação.
- Escolher a localização da fronteira de medição (local de instalação dos medidores para isolar a carga de interesse).
 - ▷ Neste caso, a medição ocorrerá através de um medidor de energia, que já estava instalado, no quadro de distribuição onde estão todas as cargas relacionadas à CAG.
 - ▷ Também será necessário monitorar a temperatura externa, para isso utilizaremos dados da estação meteorológica automática de Brasília. Os dados serão obtidos através do site do INMET: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>.
- Estimar efeitos interativos da ação de eficiência energética.
 - ▷ Nenhum efeito interativo será considerado para a realização dessa análise.
- Avaliar que variáveis afetam a economia anual de energia.
 - ▷ Tempo de operação.
 - ▷ Potência instalada.
 - ▷ Temperatura externa.
- Projetar o sistema de medição.
 - ▷ A medição ocorrerá através de medidor de energia instalado no quadro de distribuição da CAG. O consumo de energia considera duas das variáveis chaves para essa análise, potência e tempo. Já o monitoramento de temperatura externa será realizado através de dados da estação meteorológica.
- Escolher o período de linha de base.
 - ▷ Acompanhamento do consumo de energia da edificação de 06/05/2019 até 21/06/2019, através do medidor de energia.

- ▷ Dados climáticos do INMET do mesmo período.
 - ▷ Como a edificação só funciona em dias úteis, considerar apenas esses dias, excluindo finais de semanas e feriados.
 - ▷ Acionamento da CAG no período 07h30min.
 - ▷ Desligamento da CAG no período de 18 horas.
 - ▷ Será medido o tempo de utilização da iluminação na sala de aula durante sete dias, de forma a englobar dias letivos e não letivos.
- Escolher o período de determinação da economia.
 - ▷ Do dia 06/05/2019 ao dia 21/06/2019.

2. Linha de base

- Dados de consumo de energia do período.
- Dados da temperatura externa.
 - ▷ A temperatura média horária, fornecida pelo INMET, foi transformada em graus dias de resfriamento (GDR), considerando a temperatura de *setpoint* de 20°C. A Tabela 11 apresenta um exemplo de transformação de dados de temperatura horário para GDR.

Tabela 11. Exemplo de cálculo de GHR - Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

Dia	Hora	Temperatura média (°C)	Graus horas de refrigeração (GHR)
06/mai	0h	21,4	1,4
06/mai	1h	20,9	0,9
06/mai	2h	20,4	0,4
06/mai	3h	20,2	0,2
06/mai	4h	19,9	0
06/mai	5h	19,4	0
06/mai	6h	18,4	0
06/mai	7h	19,4	0
06/mai	8h	17,8	0
06/mai	9h	18,6	0
06/mai	10h	19,1	0
06/mai	11h	20,8	0,8
06/mai	12h	22,1	2,1
06/mai	13h	23,2	3,2
06/mai	14h	24,2	4,2
06/mai	15h	25,4	5,4
06/mai	16h	26,2	6,2
06/mai	17h	26,7	6,7
06/mai	18h	26,6	6,6
06/mai	19h	26,6	6,6
06/mai	20h	25,4	5,4
06/mai	21h	24,2	4,2
06/mai	22h	22	2
06/mai	23h	22,6	2,6
Graus dia de resfriamento - GDR			58,9

- Neste caso, o GDR pode ser definido por quantos graus a temperatura externa ficou acima da temperatura de *setpoint*, no caso acima 20°C, durante o dia. A temperatura de *setpoint* é previamente definida, conforme a realidade da edificação, podendo ser ajustada em acordo entre o responsável pela Medição e Verificação e o cliente. A Tabela 12 apresenta os dados necessários para construir a linha de base de consumo.

Tabela 12. Dados da linha de base de consumo – Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

Data	Consumo (kWh)	GDR	Data	Consumo (kWh)	GDR
06/05/2019	3.387,00	58,9	30/05/2019	2.423,04	50,7
07/05/2019	3.082,00	72,9	31/05/2019	2.665,43	58,5
08/05/2019	2.898,76	84	01/06/2019	244,39	56,8
09/05/2019	2.796,46	63,7	02/06/2019	270,94	73,8
10/05/2019	3.001,52	58,8	03/06/2019	2.688,27	44,8
11/05/2019	441,69	61,8	04/06/2019	2.500,12	26,5
12/05/2019	267,58	61,3	05/06/2019	2.901,61	14
13/05/2019	3.177,90	59,7	06/06/2019	2.031,00	15,6
14/05/2019	2.955,49	59	07/06/2019	1.837,50	11,7
15/05/2019	2.674,09	43	08/06/2019	185,50	23,2
16/05/2019	2.317,21	6,2	09/06/2019	88,25	28,8
17/05/2019	2.269,52	9,6	10/06/2019	2.508,25	23,5
18/05/2019	286,67	27,9	11/06/2019	2.294,50	25,4
19/05/2019	176,65	32	12/06/2019	2.377,25	24,3
20/05/2019	2.602,75	43,2	13/06/2019	2.121,75	27,6
21/05/2019	2.450,25	45	14/06/2019	2.334,00	24,9
22/05/2019	2.624,00	54,4	15/06/2019	214,00	15,3
23/05/2019	2.920,00	56,4	16/06/2019	237,25	15,7
24/05/2019	2.626,33	52,6	17/06/2019	2.354,00	19,4
25/05/2019	386,48	46,3	18/06/2019	2.189,25	38,9
26/05/2019	234,13	56,1	19/06/2019	2.573,87	44,6
27/05/2019	2.780,66	53,8	20/06/2019	270,94	39,5
28/05/2019	2.632,02	52,7	21/06/2019	2.087,19	21,3
29/05/2019	2.773,68	52,3			

- Curva de correlação entre o GDR e o consumo de energia da CAG.
 - Após a obtenção dos dados de consumo e temperatura, é necessário correlacioná-los para entender o impacto da temperatura externa no consumo de energia da CAG. A Figura 5 apresenta a regressão linear que mede o grau de correlação entre as variáveis.

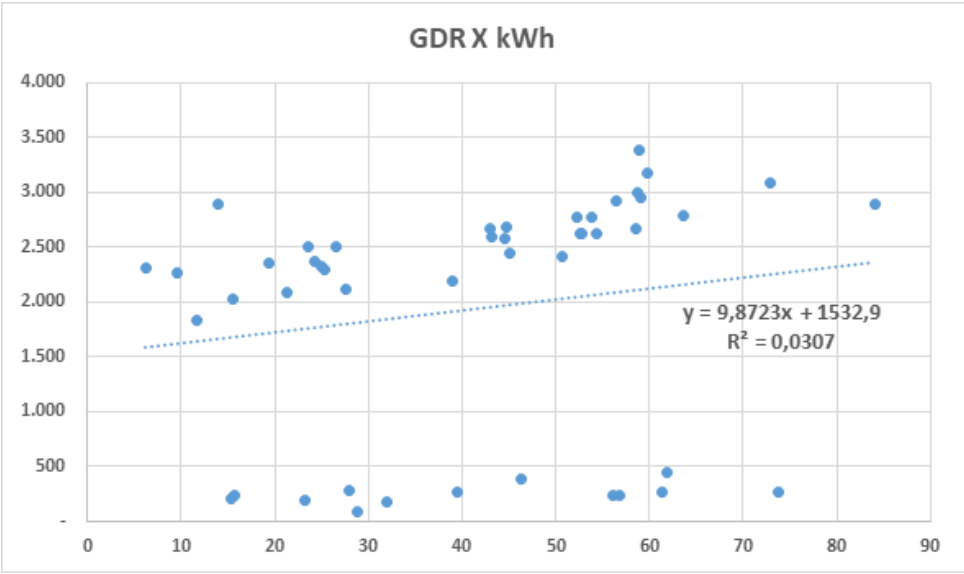


Figura 5. Gráfico de dispersão - Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

- Ajuste da curva de regressão.
 - Na Figura 5, verifica-se que a correlação entre o consumo e a temperatura está muito baixa. Para melhorar essa relação, é necessário excluir os valores dos finais de semanas e feriados e possíveis valores que, por algum motivo, estejam prejudicando significativamente o resultado, os *outliers*. A Tabela 13 e a Figura 6 apresentam os dados ajustados.

Tabela 13. Dados da linha de base de consumo ajustados – Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

Data	Consumo (kWh)	GDR	Data	Consumo (kWh)	GDR
06/05/2019	3.387,00	58,9	30/05/2019	2.423,04	50,7
07/05/2019	3.082,00	72,9	31/05/2019	2.665,43	58,5
09/05/2019	2.796,46	63,7	03/06/2019	2.688,27	44,8
10/05/2019	3.001,52	58,8	04/06/2019	2.500,12	26,5
13/05/2019	3.177,90	59,7	06/06/2019	2.031,00	15,6
14/05/2019	2.955,49	59	07/06/2019	1.837,50	11,7
15/05/2019	2.674,09	43	10/06/2019	2.508,25	23,5
17/05/2019	2.269,52	9,6	11/06/2019	2.294,50	25,4
20/05/2019	2.602,75	43,2	12/06/2019	2.377,25	24,3
21/05/2019	2.450,25	45	13/06/2019	2.121,75	27,6
22/05/2019	2.624,00	54,4	14/06/2019	2.334,00	24,9
23/05/2019	2.920,00	56,4	17/06/2019	2.354,00	19,4
24/05/2019	2.626,33	52,6	18/06/2019	2.189,25	38,9
27/05/2019	2.780,66	53,8	19/06/2019	2.573,87	44,6
28/05/2019	2.632,02	52,7	21/06/2019	2.087,19	21,3
29/05/2019	2.773,68	52,3			

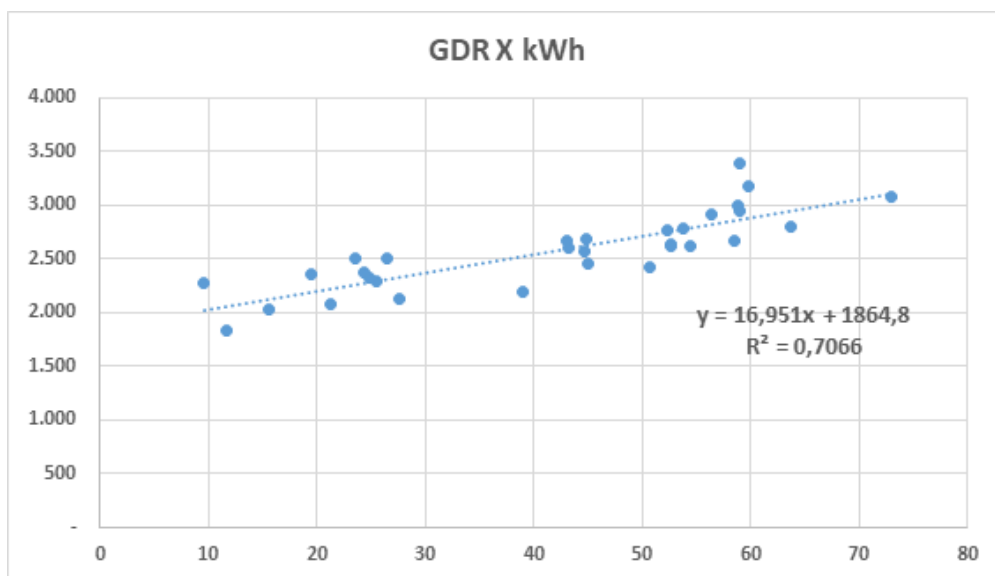


Figura 6. Gráfico de dispersão ajustado - Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

- Equação da linha de base: a equação (15) representa a linha de base.

$$\text{Consumo de energia} = 16,951 \times \text{GDR} + 1864,8 \quad (15)$$

3. Medição de determinação da economia

- Aplicando os dados de consumo e climáticos na equação de linha de base, encontraremos o consumo esperado, que é o consumo antes da ação de eficiência energética. Subtraindo o valor de consumo esperado pelo consumo real registrado, obtemos o resultado da ação de eficiência energética. A Tabela 14 apresenta os resultados diários da ação de eficiência energética até o dia 30/08/2019.

Tabela 14. Dados da determinação da economia – Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

Data	GDR	Consumo esperado (kWh)	Consumo registrado (kWh)	Economia (kWh)
24/jun	25,4	2.179,59	2.407,79	-228,19
25/jun	31,5	2.325,88	2.202,60	123,28
26/jun	50,7	2.786,31	2.288,98	497,32
27/jun	47	2.697,58	2.359,14	338,43
28/jun	32,7	2.354,65	2.144,22	210,43
01/jul	34,7	2.402,61	2.351,56	51,06
02/jul	41,6	2.568,08	2.155,10	412,98
03/jul	39,2	2.510,53	2.268,18	242,35
04/jul	56,3	2.920,60	2.025,16	895,44
05/jul	62	3.057,29	1.931,94	1.125,35
08/jul	19,3	2.033,31	2.074,22	-40,91
09/jul	16,2	1.958,97	1.891,46	67,51
10/jul	15,2	1.934,99	1.733,29	201,70
11/jul	33,1	2.364,24	1.966,44	397,81
12/jul	42,8	2.596,86	2.023,19	573,66
15/jul	55,4	2.899,02	2.361,30	537,72
16/jul	63,8	3.100,46	2.540,36	560,10
17/jul	46,9	2.695,18	2.327,93	367,25
18/jul	28,5	2.253,93	2.605,79	-351,85
19/jul	10	1.810,29	2.023,19	-212,91
22/jul	17,8	1.997,34	2.263,23	-265,89
23/jul	20	2.050,10	2.026,98	23,12
24/jul	18,8	2.021,32	2.229,96	-208,64
25/jul	30,6	2.304,29	2.138,86	165,43
26/jul	21,1	2.076,47	2.091,67	-15,20
29/jul	32,3	2.345,06	2.124,57	220,49
30/jul	43,2	2.606,45	2.094,98	511,47
31/jul	61,5	3.045,30	2.187,82	857,48
01/ago	69,2	3.229,95	2.442,43	787,52
02/ago	62,7	3.074,08	2.482,46	591,62
05/ago	29,6	2.280,31	2.575,50	-295,19
06/ago	5,6	1.704,77	2.294,50	-589,73
07/ago	23,6	2.136,43	2.397,75	-261,32
08/ago	41,7	2.570,48	2.121,75	448,73
09/ago	38	2.481,75	2.334,00	147,75
12/ago	75,6	3.383,43	2.508,25	875,18
13/ago	67,5	3.189,18	2.294,50	894,68
14/ago	56,5	2.925,40	2.377,25	548,15
15/ago	29,8	2.285,11	2.121,75	163,36
16/ago	21,7	2.090,86	2.334,00	-243,14
19/ago	90,2	3.733,55	3.203,01	530,54
20/ago	102	4.016,52	3.078,06	938,46
21/ago	89,4	3.714,36	3.414,06	300,30
22/ago	84,3	3.592,06	2.837,63	754,44
23/ago	84,9	3.606,45	2.849,87	756,58
26/ago	52,5	2.829,47	3.070,90	-241,42
27/ago	48,1	2.723,96	2.941,57	-217,61
28/ago	55,2	2.894,22	3.267,93	-373,71
29/ago	61,6	3.047,70	2.703,61	344,09
30/ago	74,9	3.366,64	2.723,90	642,74

- Cálculo de economia de energia: a Tabela 15 apresenta o resultado dos cálculos de economia de energia.

Tabela 15. Economia das ações de eficiência energética - Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

Dias de monitoramento	Consumo esperado do período (kWh)	Consumo registrado do período (kWh)	Economia (kWh)	Economia média diária (kWh)
50	132.773,38	119.214,59	13.558,79	271,18

- Cálculo de economia financeira: os resultados estão indicados na Tabela 16.
 - Avaliação das tarifas aplicáveis de acordo com o modelo tarifário do cliente e o perfil da ação de eficiência energética, se há impacto da ação no consumo no horário de ponta ou não, por exemplo. Neste estudo de caso, o cliente está enquadrado no subgrupo tarifário A4 Verde e o uso da CAG se encerra às 18 horas, ou seja, não há impacto direto no consumo na ponta, então somente as tarifas do horário fora ponta são importantes para essa análise.
 - i. Tarifa de energia fora ponta = 0,56 R\$/kWh.

Tabela 16. Economia Financeira do período analisado - Estudo de caso 2, opção B do PIMVP

Economia consumo Fora Ponta (kWh)	Economia Financeira (R\$)
13.558,8	7.593,00

5.3 Opção C – Aspectos Práticos

A opção C pode ser aplicada nas seguintes situações:

- o desempenho de energia de toda a instalação deve ser avaliado, e não apenas o das ações;
- há vários tipos diferentes de ações no prédio e não há interesse em quantificar o desempenho de cada um de forma isolada;
- a ação envolve atividades espalhadas que não podem ser facilmente isoladas do restante da instalação, tais como treinamento de conscientização do uso de equipamentos ou melhorias em paredes e janelas;
- as economias são grandes o bastante para serem separadas da interferência nos dados do ano-base durante o tempo de monitoramento;
- os efeitos interativos entre as ações ou com outros equipamentos da instalação são significativos, o que torna as técnicas de isolamento das opções A e B excessivamente complexas;
- as principais mudanças futuras na instalação não são esperadas durante o período de determinação das economias. Pode ser estabelecido um sistema para busca de condições de operação para facilitar futuros ajustamentos não rotineiros da base; e
- podem ser encontradas correlações razoáveis entre o uso de energia e outras variáveis independentes.

5.3.1 Estudo de caso 1

Este estudo de caso apresenta aspectos relacionados à desocupação de um pavimento em um edifício comercial. A aplicação da opção C consiste nos seguintes passos:

1 Abrangência

- Escolher a localização da fronteira de medição (local de instalação dos medidores para isolar a carga de interesse).
 - ▷ Neste caso, a medição ocorrerá através de dois medidores que estão instalados no quadro geral da edificação, sendo um medidor responsável por medir as cargas de tomada e iluminação; e outro medidor, para as cargas de climatização.
- Justificativa da opção PIMVP escolhida.
 - ▷ A ação de eficiência energética foi realizada antes de estabelecer uma linha de base, o que impossibilitou a utilização das opções A e B do PIMVP. Além disso, há medidores de energia instalados na edificação com histórico de um ciclo completo de medição e o cliente se sente confortável com essa opção de M&V.
- Estimar efeitos interativos da ação de eficiência energética.
 - ▷ Como será realizada a medição pela opção C, os efeitos interativos também serão contabilizados.
- Avaliar que variáveis afetam a economia anual de energia.
 - ▷ Consumo de energia da edificação.
 - ▷ Temperatura externa.
 - i. Como o sistema de climatização é responsável por aproximadamente 50% do consumo de energia da edificação, a temperatura externa será utilizada para avaliar qualitativamente a economia de energia, ou seja, não serão realizados cálculos correlacionando a temperatura ao consumo, mas graus horas de refrigeração mensal serão utilizados para justificar ao cliente variações de economia de energia de um período para o outro.
- Projetar o sistema de medição.
 - ▷ A medição ocorrerá através dos medidores de dois medidores de energia com memória de massa que estão instalados no quadro geral de distribuição da edificação. Um dos medidores monitora o consumo do sistema de climatização; e o outro medidor, a iluminação e cargas de tomada.
- Escolher o período de linha de base.
 - ▷ Será utilizado o histórico de um ciclo completo (um ano) de medição. Dessa forma, é possível quantificar a economia em diferentes estações do ano.
- Escolher o período de determinação da economia.
 - ▷ Será medido o consumo por um ciclo completo após a ação de eficiência energética.

2. Linha de base

- Verificar dados de calibração do medidor.
- Coletar informações operacionais do ambiente.

- ▷ Não houve alterações significativas na operação da edificação no período de linha de base e não se espera uma alteração, no período de determinação da economia, que possa influenciar nos resultados quantificados.
- Coletar informações do medidor.
 - ▷ Dados da linha de base: os dados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Linha de base – Estudo de caso 1, opção C do PIMVP

Ano	Mês	Consumo (kWh/mês)		GHR (20°) mensal
		Ar-condicionado	Iluminação e tomada	
2018	Janeiro	54.379	49.468	1.815
	Fevereiro	41.828	44.429	1.361
	Março	53.287	51.220	1.702
	Abril	40.661	49.773	960
	Maior	37.465	49.913	1.021
	Junho	32.469	47.539	1.032
	Julho	30.076	48.212	1.084
	Agosto	38.056	51.512	1.880
	Setembro	37.779	46.914	2.812
	Outubro	46.349	52.676	2.491
	Novembro	35.836	48.234	1.073
	Dezembro	38.195	46.004	1.682

3. Medição de determinação da economia

- Verificar dados de calibração do medidor.
 - ▷ Dados da determinação da economia: a Tabela 18 apresenta os dados para o período de determinação de economia.

Tabela 18. Determinação da economia – Estudo de caso 1, opção C do PIMVP

Ano	Mês	Consumo (kWh/mês)		GHR (20°) mensal
		Ar-condicionado	Iluminação e tomada	
2019	Abril	41.394	44.783	1.466
	Maior	39.964	48.025	1.550
	Junho	24.577	43.407	893
	Julho	25.078	48.689	984
	Agosto	34.665	39.090	1.836
	Setembro	39.307	42.201	3.494
	Outubro	42.860	41.744	3.380
	Novembro	39.580	39.939	2.257
	Dezembro	35.974	38.178	1.989
2020	Janeiro	40.630	40.741	1.870
	Fevereiro	31.146	39.475	1.455
	Março	25.906	37.031	1.475

► Considerações e ponderações importantes:

- i. a ação de eficiência energética foi realizada em abril de 2019, e o consumo foi monitorado até março de 2020. Em março, o edifício teve uma redução significativa da ocupação nas últimas duas semanas. Essa redução é resultado do período de quarentena por conta da pandemia de COVID-19, então a economia real de energia em março é um pouco menor do que apresentada. Entretanto, esse fato não influencia de maneira significativa o resultado anual da ação de eficiência energética;
 - ii. a economia será calculada através da subtração do consumo total do período de linha de base pelo consumo no período de determinação de economia; e
 - iii. avaliou-se a possibilidade de realizar uma regressão linear entre a temperatura externa e consumo do sistema de climatização. Entretanto, não se encontrou uma correlação forte o bastante para quantificar os ganhos energéticos deste sistema através deste método. Mesmo com a exclusão de *outliers*, o coeficiente de determinação (R^2) ficou abaixo de 0,65.
- Cálculo de economia de energia: a Figura 7 e a Figura 8 apresentam uma comparação entre consumo de energia. O cálculo está apresentado nas equações (16) e (17).

$$\text{Economia} = \text{Consumo\_linha\_de\_base} - \text{Consumo\_determinação\_da\_economia} \quad (16)$$

$$\text{Economia} = 1.072.274 - 924.386 = 147.888 \text{ kWh} \quad (17)$$

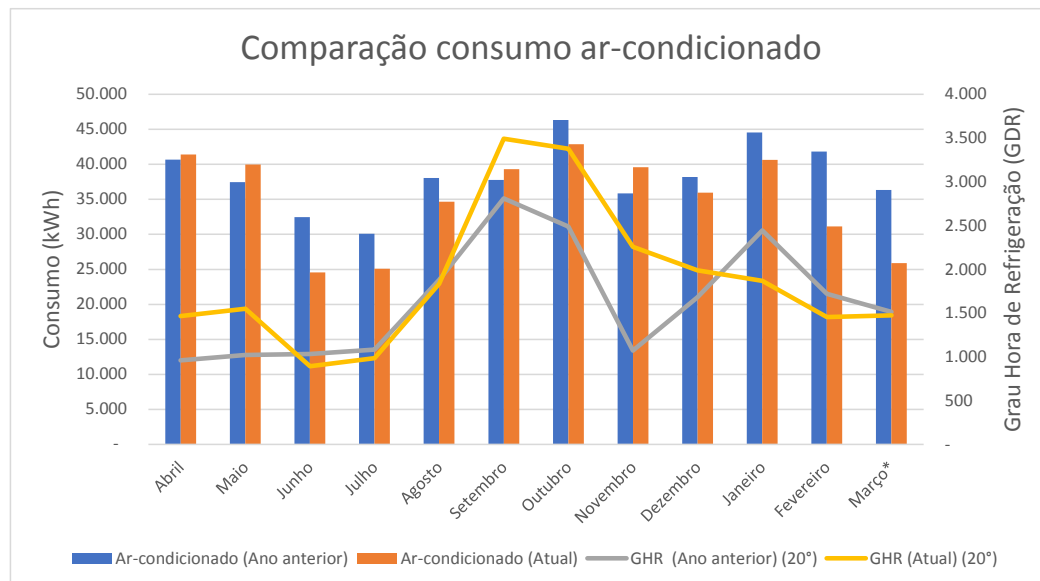


Figura 7. Comparação de consumo de energia no sistema de climatização –
 Estudo de caso 1, opção C do PIMVP

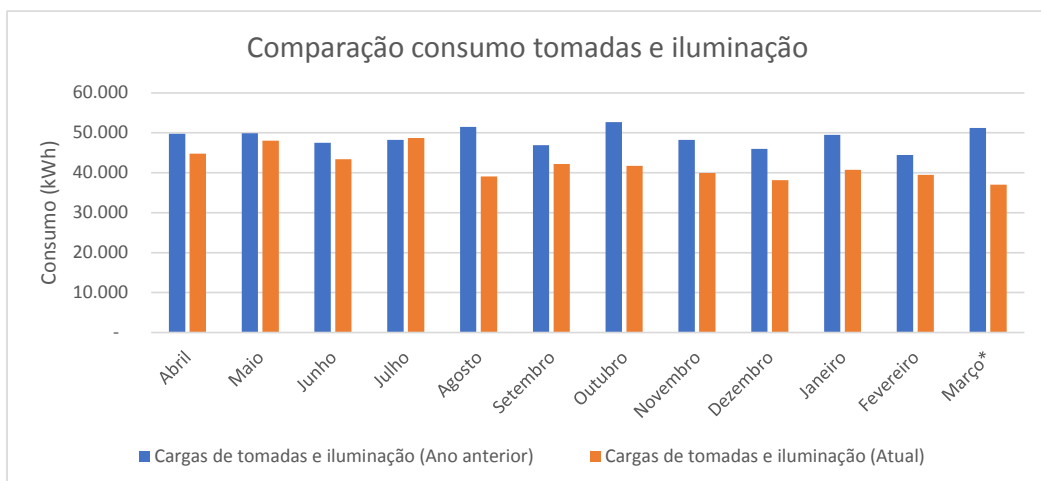


Figura 8. Comparação consumo de energia por cargas de tomada e iluminação –
Estudo de caso 1, opção C do PIMVP

- Cálculo de economia financeira: a Tabela 19 apresenta a economia financeira.
 - ▷ Avaliação das tarifas aplicáveis de acordo com o modelo tarifário do cliente e o perfil da ação de eficiência energética, se ela envolve horário de ponta ou não, por exemplo. Neste estudo de caso, o cliente está enquadrado na baixa tensão e só paga pelo consumo de energia, sem distinção de horário de ponta, fora ponta e demanda.
 - i. Tarifa de energia fora ponta = 0,68 R\$/kWh.

Tabela 19. Economia Financeira – Estudo de caso 1, opção C do PIMVP

Economia consumo (kWh)	Economia Financeira (R\$)
147.888	100.564

5.4 Opção D – Aspectos Práticos

A opção D pode ser aplicada nas seguintes situações:

- os dados do ano-base ou do período pós-*retrofit* não estão disponíveis ou não são confiáveis;
- há muitas ações, impossibilitando a opção A e B;
- as ações incluem atividades dispersas que não podem ser facilmente isoladas do restante da instalação, tais como treinamento de operadores ou melhorias em paredes e janelas;
- o impacto de cada ação sobre ela própria deve ser estimado dentro de um projeto múltiplo de ações, e os custos das opções A ou B são excessivos;
- Os efetivos interativos entre as ações ou com outros equipamentos da instalação são complexos, o que torna as técnicas de isolamentos das opções A e B excessivamente complexas;

- são esperadas mudanças futuras na instalação durante o período de determinação das economias e não podem ser encontrados meios realísticos para seguir ou considerar seu impacto na energia;
- há um profissional disponível com experiência em simulação de energia e com recursos para reunir os dados de entrada adequados para calibrar o modelo de simulação; e
- a instalação e as ações podem ser modeladas por *software* para simulação bem documentado, e pode ser alcançada uma calibragem razoável contra os dados medidos de energia e demanda.

Há diversos *softwares* de simulação no mercado capazes de realizar as análises necessárias para possibilitar o cálculo dos ganhos obtidos pela ação de eficiência energética. Na sequência, serão detalhados dois tipos de simulação, em que se mostram conceitos e procedimentos a serem empregados em qualquer ambiente de simulação.

5.4.1 Simulação termoenergética

O passo a passo a seguir apresenta o fluxo de trabalho para execução da modelagem:

- importar a planta da instalação: o processo de simulação se inicia com a importação da planta da instalação, a qual advém de algum programa de CAD;
- criar o modelo tridimensional: a partir da planta, realiza-se a modelagem tridimensional do sistema. As dimensões físicas do ambiente influenciam diretamente no cálculo termo energético e, nesse sentido, é extremamente importante seguir as dimensões exatas da planta e utilizar o pé direito correto;
- inserir o arquivo climático e demais dados de posicionamento geográfico: na sequência, é necessário configurar o arquivo climático de referência e o local onde o edifício será simulado. Estes fatores determinarão as temperaturas externas e demais variáveis utilizadas pelo programa;
- determinar as aberturas: é necessário configurar as aberturas de portas, janelas e vãos que possam existir, pois estas características representam pontos de maior transferência de calor com os ambientes vizinhos influenciando a simulação;
- definir o material das paredes e o vidro das janelas: após criar o modelo tridimensional, é necessário definir o material de paredes, o piso e o teto, ou seja, configurar a envoltória do sistema;
- definir a ocupação do ambiente: depois de finalizar a construção do ambiente físico, é necessário configurar a ocupação do ambiente, definindo sua utilização, número de ocupantes e tipos de equipamentos que geram calor. Os parâmetros de temperatura para controle do sistema de ar-condicionado, ou seja, qual a temperatura mínima que se deseja e qual a máxima que ele deve atingir. Essas informações devem ser obtidas por meio de visitas técnicas ao local e servirão de dados de entrada para o modelo;

- parametrizar os demais equipamentos: configurar outros equipamentos existentes no ambiente, de forma a reproduzir a produção de calor;
- criar os modelos de ocupação: na sequência, devem-se criar modelos de utilização dos ambientes. Esses modelos definem o tempo de utilização de cada recinto e dos equipamentos;
- parametrizar o ar-condicionado: após estas definições, é necessário configurar o sistema de ar-condicionado propriamente dito, determinando o equipamento utilizado e definindo suas características como potência, fluxo de ar, coeficiente de performance e demais parâmetros; e
- realizar as simulações.

Vale lembrar que o processo exposto consiste em nada mais nada menos do que criar um ambiente computacional e determinar os fatores que influenciam sua carga térmica, tal qual exposto no capítulo de sistemas de condicionamento ambiental.

5.4.2 Simulação luminotécnica

O procedimento de simulação começa com a construção do ambiente tridimensional que se deseja simular. Em seguida são definidas as aberturas, como portas e janelas da edificação e os elementos de fachada do edifício. Este procedimento é importante para simulação da influência da iluminação externa no ambiente, em projetos que visam ao seu aproveitamento.

Em seguida deve se adicionarem os elementos internos estruturais que influenciam na iluminação, como, por exemplo, forros rebaixados que reduzam o pé direito da sala, platôs e colunas que podem alterar o perfil de distribuição da iluminação. Com isto definido, adicionam-se os móveis presentes no ambiente e os materiais que compõem as paredes e o piso. Estas definições influenciam diretamente os resultados da simulação, pois a altura dos móveis definirá a altura do plano de trabalho da sala, e os materiais que compõem o ambiente alteram o nível de absorção e reflexão da luz influenciando a qualidade da iluminação.

Após a construção do ambiente físico, é necessário definir as características do sistema de iluminação determinando o modelo da luminária e das lâmpadas utilizadas. Nesta etapa serão configurados os principais fatores que serão usados para calcular o consumo de energia do sistema, como a potência das lâmpadas, fator de manutenção, tempo de utilização e definição de sensores de iluminação caso existam.

Segundo uma pesquisa realizada pelo IEA (*International Energy Agency*) em escritórios de arquitetura em todo o mundo, os *softwares* mais utilizados para realização de simulações luminotécnicas no mundo estão identificados na Figura 9.

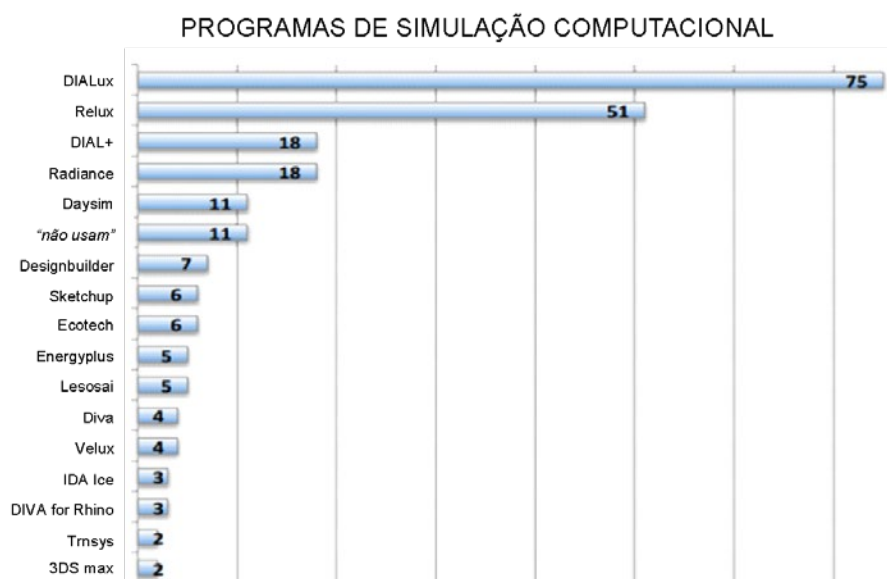


Figura 9. Principais *softwares* de simulação luminotécnica. Fonte: IEA (2016)

5.5 Correlação Entre o Consumo e Temperatura para M&V de Sistemas de Climatização

Na análise de medição de consumo de energia de sistemas de condicionamento ambiental, uma etapa importante é a obtenção dos Graus-Hora de Refrigeração (GHR). O grau-hora de refrigeração é usado para denominar a quantidade de graus que estava acima de uma temperatura de base em uma resolução horária.

A literatura aponta alguns métodos para obter a temperatura de base a ser usada no cálculo do GHR. Como exemplo, apresenta-se o método proposto por Kissock, Reddy e Clarisge (1998) o qual se baseia na realização de obter uma regressão linear entre o consumo de energia da edificação em relação à temperatura externa. A ideia é correlacionar o consumo de energia para resfriamento/aquecimento com a temperatura externa. Yoon, Lee e Clarisge (2005) utilizam este método em uma edificação, demonstrando a temperatura em que o consumo de energia deixa seu valor de base e passa a aumentar de forma proporcional à temperatura externa. Para o estudo de caso apresentado neste trabalho, pode-se perceber que a temperatura de base é de 13°C e a energia diária de base é de 37,1 MWh/dia.

Baseado nestes fatos, a metodologia se baseia em dois pontos fundamentais os quais podem não ser viáveis para o contexto de outras edificações:

- disponibilidade de dados de consumo diário ao longo de vários anos; e
- relação evidente entre o consumo de energia diário do sistema de climatização e a temperatura externa.

Para exemplificar estas condições, apresentam-se, na sequência, exemplos de aplicação destes métodos em três situações reais, as quais contêm dados do consumo de energia de um sistema de climatização.

5.5.1 Caso 1 – Central de Água Gelada (CAG) na região sul do Brasil

O primeiro estudo de caso consiste em uma central de água gelada localizada na cidade de Porto Alegre, na região sul do Brasil. A Figura 10 apresenta os resultados de medição de potência e temperatura externa ao longo de sete meses.

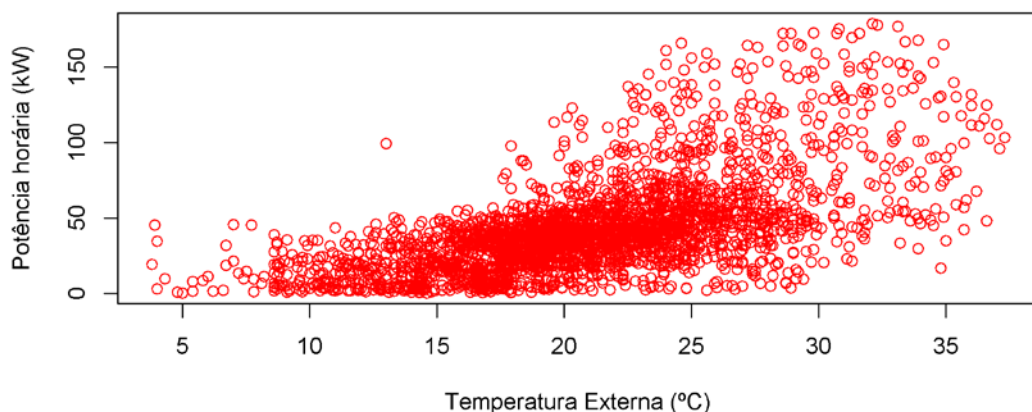


Figura 10. CAG Localizada em Porto Alegre – Relação entre a potência e a temperatura externa horária

Tais dados evidenciam uma forte correlação entre a potência da CAG com a temperatura externa medida. Assim como Yoon, Lee e Clarisge (2005), pode-se obter uma temperatura de base a ser utilizada no cálculo de GHR. Como pode observar na Figura 11, há pouca massa de dados para se identificar um padrão claro de energia de base e uma temperatura em que a energia medida passa a aumentar com a temperatura. De qualquer forma, as medições disponíveis apontam para uma temperatura de base de aproximadamente 19°C e um consumo de base abaixo de 1.500 kWh diários.

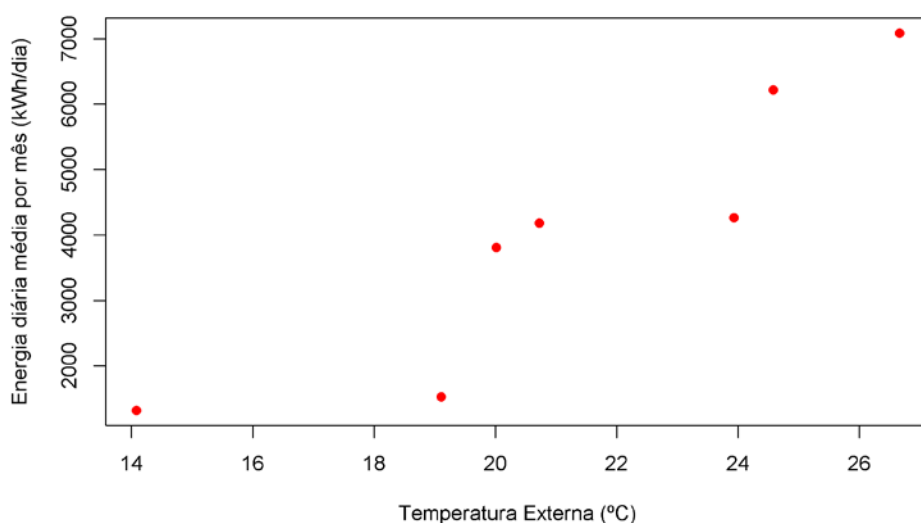


Figura 11. CAG Localizada em Porto Alegre – Relação entre o consumo médio e a temperatura média externa mensal, para cada mês de medição

A partir destes dados, procura-se identificar se a temperatura de base de 19°C é, de fato, aquela que melhor ajusta a reta de regressão do consumo de energia com os valores de GHR. Além de identificar a temperatura de base mais adequada, procura-se identificar em qual resolução de tempo o valor de GHR melhor representa os dados de energia: hora, dia ou mês. Os resultados do erro padrão dos resíduos da curva ajustada R^2 das diferentes regressões são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. CAG Porto Alegre – Coeficiente de determinação de regressão linear entre a energia e GHR

Temperatura de Base	Graus-hora por hora	Graus-hora por dia	Graus-hora por mês
24° C	0,3421	0,4508	0,4587
23° C	0,3764	0,4903	0,4577
22° C	0,4086	0,5283	0,4497
21° C	0,4362	0,5606	0,4326
20° C	0,4576	0,5882	0,4135
19° C	0,4749	0,6113	0,403
18° C	0,488	0,632	0,3934
17° C	0,497	0,6449	0,385
16° C	0,5023	0,6531	0,3777
15° C	0,5047	0,6572	0,3714

Como se pode constatar, a curva construída com os dados de GHR por dia possui maior evidência de representar o consumo de energia da CAG. Dentro da coluna com os valores de GHR agregados por dia, percebe-se uma tendência de aumento do valor de R^2 com a diminuição da temperatura de base. Apesar disso, procura-se selecionar um valor de temperatura que otimiza os valores de R^2 em todas as resoluções, uma vez que na resolução mensal, valores de temperatura de base menores 19°C tendem a piorar o R^2 .

5.5.2 Caso 2 – Central de Água Gelada (CAG) na região sudeste do Brasil

Este estudo de caso consiste em uma central de água gelada localizada na cidade de São Paulo, na região sudeste do Brasil. A Figura 12 apresenta os resultados de medição de potência e temperatura externa.

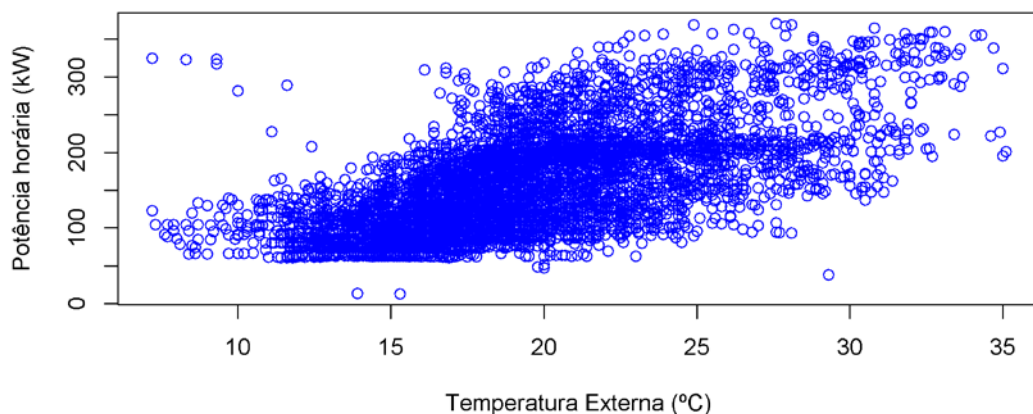


Figura 12. CAG Localizada em São Paulo – Relação entre a potência e a temperatura externa horária

Diferentemente da CAG de Porto Alegre, a CAG de São Paulo registra potência zero em apenas dois períodos ao longo de toda medição. A relação entre o consumo médio em cada mês de medição e a temperatura média mensal externa está apresentado na Figura 13. Novamente, pode-se inferir que a temperatura de base se situa entre 19°C e 20°C e a energia de base é cerca de 43 kWh diários.

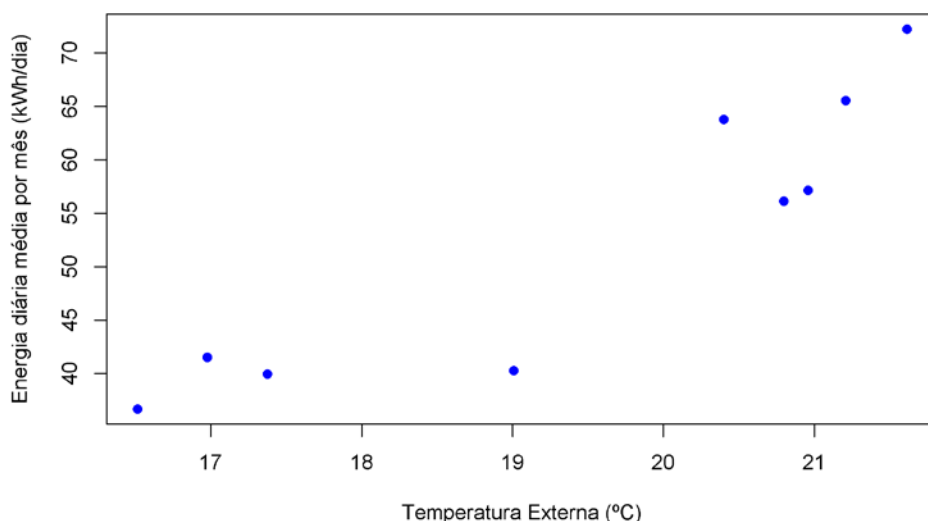


Figura 13. CAG Localizada em São Paulo – Relação entre o consumo médio e a temperatura média externa mensal, para cada mês de medição

A Tabela 21 apresenta os valores de R^2 da curva obtida pelo cruzamento dos dados de consumo de energia e GHR utilizando diferentes valores de temperatura de base e diferentes resoluções de GHR.

Tabela 21. CAG São Paulo – Coeficiente de determinação de regressão linear entre a energia e GHR

Temperatura de Base	Graus-hora por hora	Graus-hora por dia	Graus-hora por mês
24° C	0,1085	0,1784,	0,4418
23° C	0,1203	0,2143	0,4465
22° C	0,1212	0,2294	0,4491
21° C	0,1236	0,2463	0,4394
20° C	0,1318	0,2468	0,3339
19° C	0,1569	0,2989	0,3947
18° C	0,1834	0,3372	0,3704
17° C	0,2294	0,4017	0,2433
16° C	0,27	0,4496	0,303
15° C	0,3265	0,4661	0,2761

Diferente da CAG de Porto Alegre, observa-se que a CAG de São Paulo tem seus níveis de R^2 mais altos na escala mensal. Percebe-se que, na escala mensal, a temperatura base com o maior valor de R^2 é o valor de 19°C.

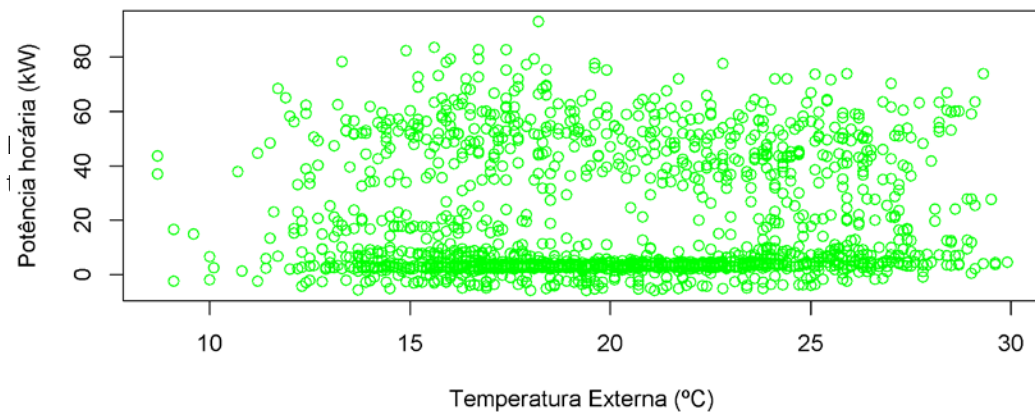


Figura 14. CAG Localizada em Brasília – Relação entre a potência e a temperatura externa horária

Obtendo a curva do consumo médio diário por mês, tem-se a Figura 15. Identifica-se que a massa de dados não é suficiente para observar um consumo de energia de base a partir de um valor de temperatura de base.

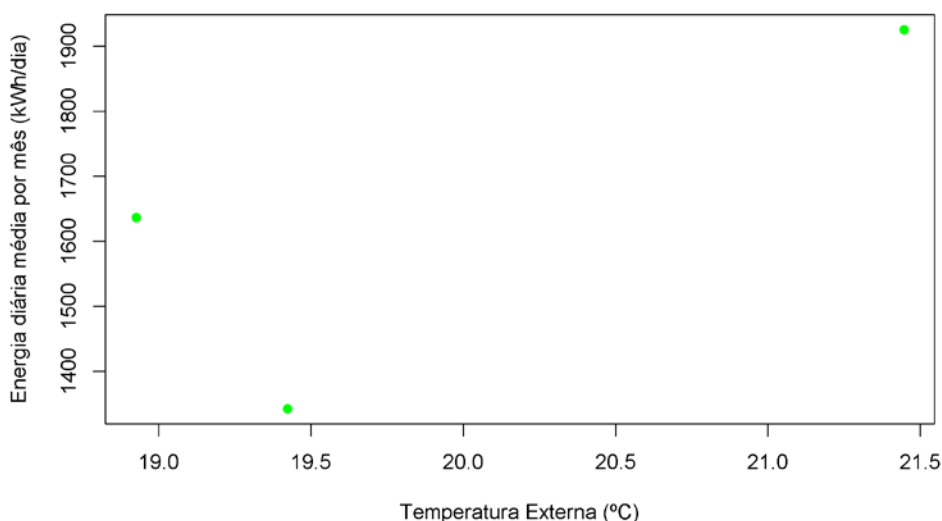


Figura 15. CAG Localizada em Brasília – Relação entre o consumo médio e a temperatura média externa mensal, para cada mês de medição

Mesmo assim, procura-se desenhar uma tabela com os coeficientes R^2 das curvas de regressão linear simples entre o consumo de energia e o GHR em diferentes valores de temperatura de base e resolução temporal. A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 22. CAG Brasília – Coeficiente de determinação de regressão linear entre a energia e GHR

Temperatura de Base	Graus-hora por hora	Graus-hora por dia	Graus-hora por mês
24° C	0,000165	0,002591	0,5865
23° C	0,004895	0,02718	0,5753
22° C	0,01294	0,05596	0,5477
21° C	0,01673	0,06376	0,528
20° C	0,02814	0,0656	0,5038
19° C	0,03014	0,06141	0,4787
18° C	0,01992	0,05694	0,453
17° C	0,013	0,0553	0,4303
16° C	0,009017	0,05707	0,4107
15° C	0,005047	0,05871	0,3818

Assim como a CAG de São Paulo, observa-se que as curvas que melhor representam os dados medidos estão na escala mensal. Os valores de temperatura de base são claros em evidenciar que, quanto maior a temperatura de base, maior o R^2 da curva. Assim, seleciona-se o valor da temperatura de base igual a 24 °C. Vale ressaltar que, mesmo que R^2 dos valores de GHR integrados por mês apresentarem os maiores valores, não se sugere utilizar esta reta já que possui apenas três observações, uma vez que tais dados não são capazes de representar todas as possíveis relações entre o sistema de condicionamento e a temperatura externa.

5.5.3 Considerações adicionais

Os exemplos anteriores evidenciam que, em condições reais de operação de edificações, é comum não encontrar um padrão claro de consumo de energia do sistema de climatização, a ponto de identificar uma temperatura de base, acima do qual o consumo do edifício cresce devido à influência do sistema de climatização. Em função destes fatos, podem-se estabelecer os seguintes procedimentos para a escolha da temperatura de base:

- situações que dispõem de dados de medição com duração superior a 24 meses (medição exclusiva do sistema de climatização): plotar o gráfico da média de consumo diário por mês *versus* a temperatura média mensal. O ponto no qual o consumo de energia diário deixa seus valores de base e passa a variar proporcionalmente com a temperatura é a “temperatura de base”;
- situações que dispõem de poucos dados de medição:
 - i. plotar o gráfico da temperatura externa *versus* potência do sistema de climatização. Este gráfico irá dar uma ideia se o consumo do sistema de climatização pode ser correlacionado com a temperatura externa;
 - ii. remover possíveis outliers da amostra. Muito dificilmente as amostras de medição de energia estarão prontas para serem correlacionadas com a temperatura externa. Possíveis outliers: medição de energia fora do horário de operação comum da edificação, períodos no qual as medições da potência do sistema são nulas, etc.; e
 - iii. identificar aquele valor no qual a curva de regressão possui o coeficiente R^2 mais alto.

6. RELATÓRIOS DE M&V

A Figura 16, Figura 17 e Figura 18 apresentam trechos de relatórios de M&V para as opções A, B e C, respectivamente. Estes relatórios devem ser complementados pelo plano de M&V e procedimentos de medição e cálculos, conforme apresentado nas seções anteriores.

Ficha Resumo de medição e verificação

Opção PIMVP	Período linha de Base		Período de determinação das economias	
	Data de Início	Data de Conclusão	Data de Início	Data de Conclusão
A	18/04/2019	18/04/2019	05/07/2019	05/07/2019

Substituição de lâmpadas fluorescentes por LED em uma sala de aula

Uso Final	Iluminação
Fronteira de medição	Interruptor das lâmpadas da sala de aula
Justificativa da escolha	Como todos as lâmpadas da sala serão trocadas por LED, ao medir a potência total do sistema antes e após a ação de eficiência energética, será possível determinar a redução de potência e consequentemente a redução do consumo de energia.
Efeito interativo	Há com o sistema de climatização da sala de aula. Assim, a troca das lâmpadas diminui a carga térmica de iluminação o que reduz o consumo dos equipamentos de ar-condicionado.
Foi avaliada? Qual a relação que será considerada?	Os efeitos interativos não serão avaliados para essa ação de eficiência energética.
Técnica de Amostragem	Não se aplicou técnica de amostragem, realizou a medição de todas as lâmpadas.
Dados estatísticos aplicados	Não aplicado.
Variável monitorada	Instrumentação ou método utilizado
Potência elétrica	Medição através de multímetro calibrado
Tempo de funcionamento	Estimativa através do perfil de utilização

Justificativa da escolha do PIMVP
O perfil de utilização da sala de aula é bem conhecido e não apresenta grandes variações ao longo dos meses, por esse motivo, é possível estimar o tempo de funcionamento com grande segurança, sendo assim, é necessário medir apenas a variação de potência do sistema. Por esses motivos a opção A do PIMVP se mostra mais interessante.

Tarifas aplicadas - Energia e Demanda			
Fora ponta (R\$/kWh)	F. Ponta (R\$/kW)	Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kW)
0,56	11,67	1,57	-

Descrição/Resumo da MEE / Observações

Substituição de 32 lâmpadas fluorescentes tubular T8 por lâmpadas tubular LED T8 em uma sala de aula. A sala funciona 8 horas por dia (8:00 às 12:00 - 13:00 às 17:00), e a escola tem 212 dias letivos por ano.
Observação: Para esse cliente não houve redução de consumo na ponta, devido ao perfil de uso.

Linha de Base de Consumo

Potência do sistema (W)	Horas de utilização por ano (h)	Linha de base (kWh/ano)
1100	1696	1865,6

Determinação da economia

Potência do sistema	Horas de utilização por	Consumo pós MEE
580	1696	983,7

Resultados da Ação de eficiência energética

Redução consumo (kWh/ano)	Redução demanda (kW)	Economia Financeira (R\$/ano)
881,9	0,52	566,68

Figura 16. Ficha resumo de M&V em substituição de lâmpadas pela opção A do PIMVP

Ficha Resumo de medição e verificação

Opção PIMVP	Período linha de Base		Período de determinação das economias	
	Data de Início	Data de Conclusão	Data de Início	Data de Conclusão
B	06/05/2019	21/06/2019	24/06/2019	30/08/2019

Alteração do tempo de funcionamento CAG + Free Cooling

Uso Final	Climatização
Fronteira de medição	Quadro de distribuição dos equipamentos de climatização
Justificativa da escolha	Como já havia o medidor instalado neste quadro de distribuição, que, além de alimentar eletricamente todos os componentes da central de água gelada (CAG) (80% das cargas medidas pelo quadro), alimenta outras cargas (20% das cargas medidas pelo quadro).
Efeito interativo	Nenhum efeito interativo será considerado para a realização desse análise.
Foi avaliada? Qual a relação que será considerada?	Os efeitos interativos não serão avaliados para essa ação de eficiência energética.
Técnica de Amostragem	Não se aplicou técnica de amostragem
Dados estatísticos aplicados	Não aplicado.
Variável monitorada	Instrumentação ou método utilizado
Energia elétrica	Medição através de medidor de energia com memória de massa
Temperatura externa	Dados climáticos da estação meteorológica de Brasília (INMET)

Justificativa da escolha do PIMVP

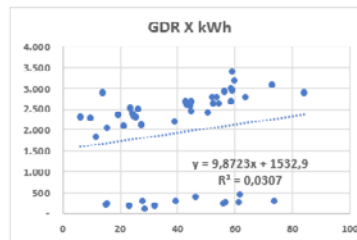
Como já havia um medidor de energia instalado em um lugar estratégico, onde todo o consumo da CAG era monitorado e representativo dentro do consumo total medido, escolheu-se utilizá-lo para o monitoramento dos ganhos energéticos das ações de eficiência energética. Considerando ações de climatização, o monitoramento da temperatura é de extrema importância, como há uma estação meteorológica próxima a edificação, podemos utilizar seus dados com segurança.

Tarifas aplicadas - Energia e Demanda			
Fora ponta (R\$/kWh)	F. Ponta (R\$/kW)	Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kW)
0,56	11,67	1,57	-

Descrição/Resumo da MEE / Observações

O sistema de climatização era ligado às 7h30min diariamente (segunda a sexta). Entretanto, a ocupação do edifício pelos usuários só ocorre a partir das 9h. Essa medida propõe o acionamento da CAG às 9h e a utilização de free cooling para reduzir a carga térmica da edificação através do frio da madrugada.

Linha de Base de Consumo



Consumo Estimado = 16,951xGDR+1864,8

Resultados da Ação de eficiência energética

Redução consumo do período monitorado (kWh)	Economia financeira no período (R\$)
13.558,80	7.593

Figura 17. Ficha Resumo de M&V em substituição de lâmpadas pela opção B do PIMVP

Ficha Resumo de medição e verificação

Opção PIMVP	Período linha de Base		Período de determinação das economias	
	Data de Início	Data de Conclusão	Data de Início	Data de Conclusão
C	01/01/2018	31/12/2018	01/03/2019	31/03/2020

Desocupação de um pavimento de um edifício comercial

Uso final Climatização, iluminação e cargas de tomada.

Fronteira de medição Quadro geral de distribuição.

Justificativa da escolha

Já havia medidores instalados neste quadro e histórico de consumo da edificação de mais de um ciclo completo (1 ano).

Efeito Interativo Como será realizada a medição pela opção C, os efeitos interativos também serão contabilizados.

Foi avaliada? Qual a relação que será considerada? Os efeitos interativos serão avaliados para essa ação de eficiência energética.

Técnica de Amostragem Não se aplicou técnica de amostragem.

Dados estatísticos aplicados Não aplicado.

Variável monitorada Instrumentação ou método utilizado

Energia elétrica Medição através de medidores de energia com memória de massa

Temperatura externa Dados climáticos da estação meteorológica de Brasília (INMET)

Justificativa da escolha do PIMVP A ação de eficiência energética foi realizada antes de estabelecer uma linha de base, o que impossibilitou a utilização das opções A e B do PIMVP. Além disso, há medidores de energia instalados na edificação com histórico de um ciclo completo de medição e o cliente se sente confortável com essa opção de M&V.

Resultados da Ação de eficiência energética

Consumo linha de base (kWh)	Consumo determinação da economia (kWh)	Economia (kWh)	Economia (R\$)
1.072.274	924.386	147.888	100.564

Tarifas aplicadas - Energia e Demanda			
Fora ponta (R\$/kWh)	F. Ponta (R\$/kW)	Ponta (R\$/kWh)	Ponta (R\$/kW)
-	0,68	-	-

Descrição/Resumo da MEE / Observações

Desocupação de um pavimento inteiro de um edifício comercial. A população e equipamentos desse pavimento foram distribuídos para os outros pavimentos, o que faz aumentar o consumo de energia de ar condicionado e carga de tomada dos outros pavimentos, mas, em contrapartida, zera o consumo de iluminação, cargas de tomada e ar-condicionado do pavimento desocupado.

Linha de Base de Consumo

Mês	Consumo (kWh/mês)		GHR (20°) mensal
	Ar cond.	Ilum. e Tomada	
2018			
Jan	54.379	49.468	1.815
Fev	41.828	44.429	1.361
Mar	53.287	51.220	1.702
Abr	40.661	49.773	960
Mai	37.465	49.913	1.021
Jun	32.469	47.339	1.032
Jul	30.076	48.212	1.084
Ago	38.056	51.212	1.880
Set	37.779	46.914	2.312
Out	46.349	52.616	2.491
Nov	35.836	48.744	1.073
Dez	38.195	46.004	1.687

Determinação da economia de energia

Mês	Consumo (kWh/mês)		GHR (20°) mensal
	Ar cond.	Ilum. e Tomada	
2019			
Abr	41.394	44.783	1.466
Mai	39.964	48.025	1.550
Jun	24.577	43.407	893
Jul	25.078	48.689	984
Ago	34.665	39.090	1.836
Set	39.307	42.201	3.494
Out	42.860	41.744	3.380
Nov	39.580	39.939	2.257
Dez	35.974	38.178	1.989
2020			
Jan	40.630	40.741	1.870
Fev	31.146	39.473	1.433
Mar	25.906	37.031	1.473

Figura 18. Ficha Resumo de M&V em substituição de lâmpadas pela opção C do PIMVP

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou as experiências associadas à execução de Processos de Medição e Verificação de performance de ações de eficiência energética. Conforme identificado, a M&V consiste na aplicação de mecanismos metodológicos para determinar, de modo seguro e confiável, a economia real de energia proveniente das ações de eficiência energética. Esta ferramenta tende a subsidiar a difusão da cultura da eficiência energética, uma vez que ela quantifica os benefícios das ações realizadas e, por meio de processos estatísticos, aumenta a confiabilidade dos resultados de um projeto.

Nesse contexto, diversos conceitos relacionados ao Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance foram apresentados e discutidos. Tais conceitos são complementados por um conjunto de exemplos práticos, de forma a indicar os procedimentos e cálculos necessários para a realização de um processo de M&V. Deve-se destacar que a compilação destes resultados advém de diversas experiências dos autores nesta temática, as quais foram obtidas por meio da execução de diversos projetos.

8. REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Guia de M&V*. 2013. Primeira revisão, Brasília, DF, Brasil.
- [2] EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION – EVO. *Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance Conceitos e Opções para Determinação de Economias de Energia e de Água*. 2012. V. 1. Canadá.
- [3] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Lighting retrofit in current practice: Evaluation of an international survey*. IEA, 2016.
- [4] INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – INEE. *Introdução ao Uso da Medição e Verificação de Economias de Energia no Brasil*. Rio de Janeiro, RJ, 1997.
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 50.015 – *Energy Management Systems – Measurement and Verification of Energy Performance of Organizations – General principles and guidance*. ISO, 2014.
- [6] KISSOCK, J. K.; REDDY, T. A.; CLARIDGE, D. E. Ambient-temperature regression analysis for estimating retrofit savings in commercial buildings. ASME. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 120 (3), pp. 168-176, 1998.
- [7] YOON, J. H.; LEE, E. J.; CLARIDGE, D. E. Calibration procedure of energy Performance simulation model for a commercial building. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 125, pp. 251–257, 2003.

CAPÍTULO 5

Aspectos da Implantação de Sistema de Gestão Energética (SIGE) da Universidade de Brasília (UnB)

Alex Reis

Loana Nunes Velasco

Renato Coral Sampaio

Francisco Assis Lima

Álax de Carvalho Alves

André de Sousa Costa Filho

Arthur José Benedito de Oliveira Assis

Ezequiel de Oliveira dos Reis

Gabriela Barrozo Guedes

Guilherme Augusto Nunes Silva

Lucas de Araújo Martins

Thalisson Barreto de Melo Silva

Jessé Barreto de Barros

João Pedro Alemonge Honorato

Rodrigo Maia Pereira

Faculdade De Planaltina

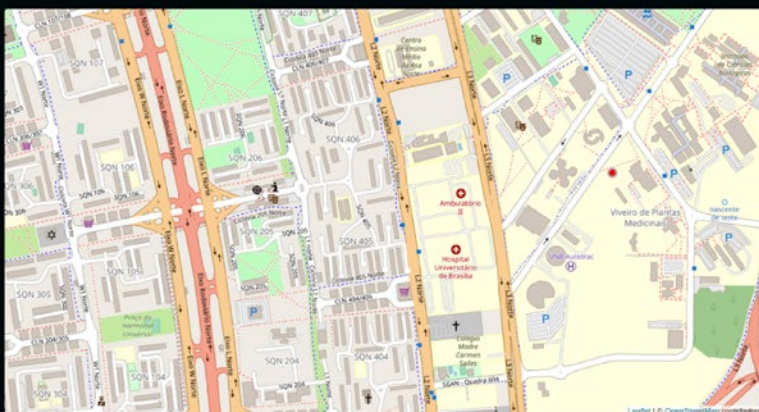
Faculdade Do Gama

Faculdade De Ceilândia

Darcy Ribeiro - Gleba A

Darcy Ribeiro - Gleba B

Darcy Ribeiro - Gleba C



Consumo

Não disponível

Geração mês

Não disponível

Últimas 72h

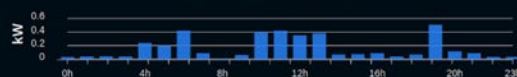
14

Graves

20

Leves

Carga no campus hoje



ICC Norte II

TENSÃO

A: 198V

B: 228V

C: 207V

CORRENTE

A: 52A

B: 65A

C: 51A

POTÊNCIA

Ativa: -4220W

Reativa: -2123kVar

Total: -1kVa

ÚLTIMAS 72h

0

0

1 Tensão Crítica

CPD1 (Darcy Ribeiro) - A,B,C
ICC Norte I (Darcy Ribeiro) - A
ICC Sul II (Darcy Ribeiro) - C
UED1 (FGA) - A,B,C

2 Queda de Fase

CPD1 (Darcy Ribeiro) - A,B,C
ICC Norte I (Darcy Ribeiro) - A,B,C
UED1 (FGA) - A,B,C
ICC Norte II (Darcy Ribeiro) - A
FT I (Darcy Ribeiro) -
ICC Sul III (Darcy Ribeiro) -
PAT (Darcy Ribeiro) -
ICC Norte I (Darcy Ribeiro) -
E mais 2 outro(s)

3 Tensão Precária

FT I (Darcy Ribeiro) - B
CPD1 (Darcy Ribeiro) - B
CPD2 (Darcy Ribeiro) - A,B,C
ICC Sul III (Darcy Ribeiro) - C
ICC Norte I (Darcy Ribeiro) - A
ICC Norte II (Darcy Ribeiro) - B
UED1 (FGA) - A,B,C

4 Falha de Comunicação

UED1 (FGA)
UED2 (FGA)
PAT (DARCY RIBEIRO)
ICC Sul III (DARCY RIBEIRO)
ICC Sul II (DARCY RIBEIRO)
ICC Sul I (DARCY RIBEIRO)
ICC Norte I (DARCY RIBEIRO)
FT I (DARCY RIBEIRO)
E mais 5 outro(s)

Máximo Consumo

Nenhum ponto

OBJETIVO

Apresentar aspectos da implantação do Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília. Este sistema é caracterizado pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e desenvolvimento de *software* supervisor, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações da Universidade.

1. INTRODUÇÃO

De forma a apresentar a problemática que norteia o assunto em pauta, a Tabela 1 evidencia o histórico de consumo e demanda do Campus Darcy Ribeiro da UnB, entre novembro de 2015 e outubro de 2016. Conforme apresentado, foram gastos cerca de R\$ 12,7 milhões para pagamento da fatura de energia elétrica, o que se caracteriza como uma vultosa quantia de recursos públicos. Nesse contexto, o Poder Público está entre os maiores consumidores de energia elétrica, representando 8,33% do consumo total pelas edificações. A iluminação e o sistema de ar-condicionado são os responsáveis por cerca de 70% do grande consumo nesses prédios (LAMBERTS, 2014).

Tabela 1. Histórico de consumo e demanda – Campus Darcy Ribeiro – UnB

Mês	Consumo fora de ponta [kwh]	Consumo ponta [kwh]	Demanda medida ponta (kW)	Demanda medida fora de ponta (kW)	Valor da conta de energia (R\$)
nov/15	1.966.915,00	207.507,00	4.155,00	5.887,00	1.338.607,05
dez/15	1.892.597,00	189.684,00	3.875,00	5.568,00	1.251.423,70
jan/16	1.546.991,00	148.971,00	3.276,00	4.873,00	1.176.161,05
fev/16	1.568.283,00	151.115,00	2.850,00	4.109,00	1.021.364,82
mar/16	1.596.896,00	149.642,00	3.187,00	4.635,00	R983.322,41
abr/16	1.920.420,00	224.220,00	4.097,00	5.384,00	1.211.139,45
mai/16	1.835.509,00	214.562,00	4.074,00	5.211,00	1.563.437,43
jun/16	1.785.214,00	197.078,00	3.982,00	4.869,00	1.022.631,37
jul/16	1.611.462,00	200.241,00	4.036,00	4.750,00	1.000.487,55
ago/16	1.508.012,00	168.232,00	3.072,00	4.000,00	880.484,34
set/16	1.792.193,00	215.478,00	3.940,00	4.988,00	1.133.119,42
out/16	1.795.956,00	206.427,00	4.205,00	5.341,00	1.104.629,39

Com a intenção de diminuir os consumos energéticos e tornar os edifícios mais sustentáveis, os segmentos da construção civil e arquitetura têm adotado o conceito de "*Green Building*" (Edifício Verde). O conceito de Edifício Verde é utilizado para denominar edifícios construídos ou modificados, dentro dos padrões sustentáveis, e que atendem a desempenhos ambientais relativos a cinco grandes temas: local sustentável, eficiência de água, eficiência de energia, conservação dos materiais e dos recursos e qualidade ambiental interna (PINHEIRO, 2006). Estudo promovido pela empresa EY e pelo Green Building Council (2013) mostra que as edificações verdes reduzem até 30% de energia e liberam 35% a menos de gás carbônico, e o custo de construção desses edifícios é em torno de 1% a 7% maior.

De forma a se criar um protocolo padronizado e impessoal para a avaliação de edificações, em 1990, no Reino Unido, iniciou-se o desenvolvimento de uma primeira metodologia de avaliação ambiental de edifícios, conhecida como *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM). Até o momento, o BREEAM foi usado para certificar mais de 530.000 edifícios, ao longo do ciclo de vida, e é aplicado em mais de 70 países (BREEAM, 2017). Este protocolo serviu de base para outras metodologias de avaliação de ambientes construídos existentes no mercado, tais como o HK-BEAM, em Hong Kong, o LEED, nos Estados Unidos, o DGNB, na Alemanha, e o *Green Star*, na Austrália, dentre outros. Um requisito comum a todas estas metodologias consiste na necessidade de se estabelecerem mecanismos para o monitoramento energético, por meio de submedições de consumo de energia. Esta premissa é essencial para o estabelecimento de políticas duradouras de eficiência energética, uma vez que é viabilizado o conhecimento das características de consumo da instalação e o desenvolvimento de ações pontuais.

Nesse cenário, se insere a proposta e implantação do Sistema de Gestão Energética na Universidade de Brasília: tal sistema é caracterizado pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e desenvolvimento de *software* supervisor, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações da Universidade.

A instalação deste sistema é particularmente importante, tendo em vista que, atualmente, a UnB e outras instituições de ensino superior do país somente possuem o medidor geral de consumo de energia e, portanto, impedem qualquer avaliação localizada. Outros desdobramentos advindos da implantação de um centro de monitoramento energético são: caracterização de perfis de consumo de cada edifício; aplicação de metodologia de gestão de consumo individualizada; melhorias na continuidade do fornecimento de energia na rede interna da UnB, tendo em vista a observabilidade implantada nos campi; definição de metas de redução de consumo e demanda, por unidade acadêmica.

Esta ação se reveste de originalidade e inovação, uma vez que as redes elétricas internas de instituições públicas de ensino do Brasil, bem como prédios administrativos do Governo Federal, usualmente não contemplam tal tipo de monitoramento. Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado algumas soluções de monitoramento energético voltadas para ambientes industriais, os quais, todavia, possuem características bem diferentes daquelas encontradas em prédios públicos. Além do mais, deve-se destacar que o Sistema de Gestão Energética foi desenvolvido como um *Software Livre*, o que garante a reprodutibilidade e distribuição deste sistema para outras instituições; a abertura para adaptações na arquitetura deste sistema, para atender a condições particulares de outros locais; a possibilidade de aperfeiçoamento e evolução do sistema ao longo dos anos, por meio de cooperação ativa e contribuições de outros desenvolvedores. Todas estas características viabilizam sua adoção por outros órgãos públicos, bem como a criação de uma comunidade em torno de seu desenvolvimento que ajude a aprimorar cada vez mais suas funcionalidades.

Por fim, além dos aspectos anteriores, esta ação estabelece um ponto de convergência entre o Projeto Prioritário de Eficiência Energética (PEE) e Projeto Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), de forma que os resultados obtidos no âmbito do PEE pudessem subsidiar ações de P&D e vice-versa. Nesse contexto, as ações previstas no Programa de Eficiência Energética regulamentado pela Aneel e contempladas no PEE se caracterizam por troca de equipamentos existentes na edificação por outros mais eficientes (*retrofitting*), instalação de sistemas de geração própria de energia, tais como a solar fotovoltaica e outras ações de racionalização de consumo, no médio e longo prazos, na Universidade de Brasília.

Nesse contexto, este capítulo tem por objetivo descrever as atividades associadas ao desenvolvimento e implantação do Sistema de Gestão Energética da Universidade de Brasília e está estruturado pelas seguintes seções:

- a seção 2 apresenta uma fundamentação teórica acerca da temática deste capítulo;
- a seção 3 descreve a arquitetura do Sistema de Gestão Energética desenvolvido no âmbito deste projeto;
- a seção 4 mostra indicadores de desempenho energético, os quais podem ser empregados para acompanhar as edificações;
- a seção 5 detalha o módulo para obtenção de curvas típicas de consumo; e
- por fim, a seção 6 apresenta considerações finais sobre o sistema.

Este sistema pode ser acessado pelo seguinte endereço: *sige.unb.br*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os mecanismos de gestão de energia começam a ser desenvolvidos em paralelo com a ideia de eficiência energética que surgiu após as crises do petróleo. Estas crises promoveram o aumento do preço do petróleo e consequentemente da energia, fazendo com que seus gastos se tornassem maiores e necessitassem de maior controle (TONIM, 2009).

A gestão de energia consiste em um processo contínuo e estruturado para acompanhar o consumo de energia de uma instalação, sempre monitorando suas variações e observando oportunidades para aplicação de medidas de eficiência energéticas. Assim, a criação de um Sistema de Gestão Energética (SIGE) é o primeiro passo para o estabelecimento de uma política energética durável e efetiva para a instituição.

Muito mais do que conferir mensalmente a fatura de energia, esse sistema serve para traçar o perfil de consumo da edificação e as características deste em relação à sua produção, ocupação e demais variáveis que sejam pertinentes, fomentando dados que podem ser utilizados pela alta administração para implementar medidas de racionalização de custos ou para compor o valor de venda da mercadoria. Além disso, a gestão energética não se restringe apenas ao uso de energia elétrica, embora este seja o mais comum, abrangendo todas as formas de energia sendo estas térmicas, combustíveis ou potenciais.

Além disso, a gestão energética é essencial para manter os ganhos obtidos por uma ação de eficiência energética ou pela implementação de alguma forma de geração de energia distribuída. Após realizar qualquer um destes projetos, é observada uma queda na fatura de energia, podendo criar uma falsa sensação de que os novos sistemas são tão eficientes que não é mais preciso se atentar para o consumo de energia, o que pode implicar um aumento expressivo do consumo no período posterior. Este fato se chama efeito rebote e pode ser observado em diversos setores não só em relação ao consumo de energia, porém sempre ocorrem de forma similar.

Além deste aumento, é possível que os ganhos obtidos durante a ação de eficiência se percam ao longo do tempo pela deterioração do sistema que só será percebida tempos depois. Com um plano de monitoramento constante, é possível identificar alterações nesse sistema e adotar medidas que venham a manter os ganhos conquistados.

A principal norma que orienta o processo de gestão energética é a ISO 50001:2011, Sistema de Gestão de Energia, que foi posteriormente atualizada em 2018. A ISO (*International Organization for Standardization*) é uma federação internacional de organismos nacionais de normatização com o objetivo de criar normas que sejam adotadas por todos os países participantes e, desse modo, sejam mundialmente aplicadas.

Assim, essa norma tem o objetivo de permitir que as organizações estabeleçam sistemas e processos de melhoria do desempenho energético de suas atividades incluindo ações de monitoramento, eficiência energética e geração de energia a partir de fontes sustentáveis. A implantação dessa norma se destina à redução nas emissões de gases estufa e os impactos ambientais associados ao uso de energia elétrica. Além disso, pode ser implementada por qualquer tipo de organização de qualquer tamanho.

Essa norma não determina qual o tipo de sistema de gestão a instituição deve ter ou quais ações deve realizar, mas especifica os requisitos mínimos que o sistema deve apresentar sobre os quais a organização deve desenvolver seus projetos, estabelecer objetivos e pautar seus planos de ação. Sendo assim, esta é uma norma orientativa que servirá de base para que a organização crie seu próprio sistema de gestão. Ainda, essa norma é baseada no sistema de melhoria contínua já testado, aceitado e utilizado para embasar as normas ISO 9001 e ISO 14001, facilitando, assim, sua integração com os demais sistemas de gestão da empresa.

Vale ressaltar que um sistema de gestão de energia deve permear todos os níveis da organização tal qual qualquer outro sistema de gestão. Ou seja, para que funcione, ele deve ter o apoio da diretoria da instituição que o desenvolverá e o colocará em funcionamento através dos gerentes de cada área que serão os responsáveis por efetivamente aplicá-lo. Por fim, é necessário que os demais usuários saibam do sistema e de sua importância, de modo a engajá-los e conseguir seu apoio.

Há diversas outras metodologias de gestão, porém se escolheu abordar com mais detalhes a apresentada na ISO 50001, pois esta é reconhecida no mundo todo e influenciou a criação das demais, de modo que em geral todas as metodologias são bastante semelhantes.

2.1 Objetivos da Gestão de Energia

A gestão de energia foi criada com o objetivo de aumentar a informação a respeito do consumo energético do empreendimento e estruturar planos de mudança para otimizar esse gasto sendo um pré-requisito para toda instituição que deseja reduzir, de forma sustentável, seu consumo energético ou que pretende obter alguma certificação de eficiência energética.

Os principais objetivos de um sistema de gestão energética são:

- desenvolver uma política institucional de racionalização do consumo de recursos energéticos;
- fixar metas e objetivos para essa política;
- consolidar a obtenção, o tratamento e o armazenamento de dados;
- usar o histórico de dados obtidos para embasar a tomada de decisões;
- medir resultados; e
- rever a política e melhorar continuamente a gestão da energia.

2.2 Métodos de Implementação

Nesta seção, será abordada a metodologia de implementação de um sistema de gestão de energia determinada pela ISO 50001. Essa norma está baseada no processo de melhoria contínua chamado de PDCA (*Plan, Do, Check and Act*), de maneira que o processo de implementação da norma também estará dividido em quatro etapas.

2.3 Contexto da Organização

O primeiro passo para qualquer mecanismo de gestão de energia é avaliar a organização na qual será implementada para conhecer os processos realizados, sua demanda de energia e os fatores que a influenciam. Estes dados são usados para determinar o estado atual da organização e traçar de onde o programa de gestão de energia irá começar (FOSSA e SGARBI, 2015).

Depois de determinar o estado inicial, deve-se criar a política energética da instituição, ou seja, a declaração feita pela organização determinando suas intenções gerais, ações e compromissos em relação ao desempenho energético. Essa declaração deve ser feita pela alta direção e estar alinhada com o planejamento estratégico da organização para que tenha reconhecimento e seja cumprida (FOSSA e SGARBI, 2015).

Assim, o sistema de gestão de energia é o mecanismo empregado para executar a política energética estipulada determinando as ações que serão realizadas para que as metas propostas sejam cumpridas, assim como realizando todas as medições necessárias para acompanhar o consumo de energia. Geralmente é definida uma equipe multidisciplinar que formará uma comissão para compor o sistema de gestão de energia.

A comissão definida para executar o sistema de gestão de energia deve ter o apoio da alta administração. Além disso, deve possuir autonomia e poder para implementar as medidas aprovadas no sistema de gestão. Como em todo processo de melhoria, será necessário reestruturar atividades já existentes, o que pode implicar resistência a mudança, de modo que o apoio da gerência é extremamente importante.

Para ilustrar o processo de contextualização da organização, podem-se seguir os passos abaixo:

- identificar os processos realizados na organização;
- determinar as demandas energéticas;
- determinar os fatores que influenciam tais processos;
- determinar as intenções gerais da organização em relação ao seu desempenho energético;
- determinar as metas da organização;
- criar a Política Energética;
- verificar se a Política Energética está alinhada com o planejamento estratégico da empresa;
- formar a comissão que criará e aplicará o sistema de gestão de energia;
- criar o sistema de gestão de energia; e
- utilizar a metodologia PDCA para melhor continuidade do processo.

Por fim, vale pautar que o projeto de criação e aplicação de um sistema de gestão de energia segue os mesmos requisitos da realização de um projeto de medição e verificação, já que esta é uma fase essencial do sistema de gestão. Assim, a transparência, confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos devem ser levadas em consideração.

2.4 Planejar

O planejamento é a fase na qual são determinados os objetivos e as metas do sistema de gestão. Assim, é necessário detalhar o processo interno da organização e determinar o uso específico de energia realizando um grande diagnóstico energético da instalação. Primeiramente, busca-se conhecer o histórico de consumo da unidade para identificar os tipos de energia utilizados e sua distribuição permitindo determinar as bases que sustentarão a medição sistemática do desempenho energético e permitindo traçar as linhas de base do sistema (FOSSA e SGARBI, 2015).

O processo de planejamento se interliga com a fase inicial de qualquer projeto de eficiência energética que consiste na realização do diagnóstico energético da instalação levantando os dados de consumo, variáveis relevantes, desempenho dos equipamentos e potenciais para economia de energia. Em seguida inicia-se um projeto de criação da linha de base, tal como é feito no processo de medição e verificação para que se possam comparar os resultados que serão obtidos e, então, mensurar seus ganhos.

A grande entrega desta fase é o planejamento estratégico do sistema de gestão de energia contendo a lista dos sistemas consumidores de energia, o balanço energético e padrão de uso da edificação, assim como os objetivos, metas e planos de ação.

Neste ponto também serão determinados os indicadores, porém, devido a suas particularidades, foi escolhido abordá-los em um tópico distinto.

Por fim, vale salientar que um sistema de gestão de energia consiste em um projeto de eficiência energética permanente da instalação, ou seja, ele estará sempre realizando a medição e verificação dos sistemas para traçar sua linha de base e estará sempre propondo medidas para reduzir ou manter seu consumo de energia.

2.5 Agir

Esta etapa consiste na execução das medidas planejadas na seção anterior, assim como na operação diária do sistema de gestão. De maneira geral, são determinados os recursos humanos necessários para implementar as mudanças, além dos responsáveis por gerir os recursos energéticos. Ainda nessa fase, são determinados os recursos financeiros para o sistema de gestão, sua estrutura física, aparelhos de medição, estrutura de comunicação e como será realizada a documentação de suas atividades (FOSSA e SGARBI, 2015).

Vale ressaltar que existe flexibilidade durante a execução dos planejamentos, já que as organizações são dinâmicas e pode haver mudanças na produção, aquisição de novos equipamentos ou alteração de equipes entre a fase anterior e a execução dos projetos. Desse modo, assim como no caso da medição e verificação, é possível realizar ajustes tanto nos projetos quanto na linha de base, porém toda mudança deve ser documentada e justificada tecnicamente para manter a confiabilidade e transparência do projeto.

Mas do que executar os planos de ação propostos, esta fase visa consolidar o sistema de gestão e difundir seus conhecimentos para os demais funcionários da empresa, de forma que sejam engajados nos projetos e reconheçam a competência técnica e autoridade da equipe que compõe o sistema de gestão. Ainda, a própria equipe do sistema deve ser capacitada e dominar as bases práticas e teóricas que influenciam seu trabalho (FOSSA e SGARBI, 2015).

Ademais, esta fase pode ser diretamente integrada ao planejamento estratégico da organização, de modo a aliar as trocas de programas de equipamentos com os objetivos de gestão energética da empresa sempre visando atingir suas metas.

2.6 Checar

A fase de checagem consiste em avaliar a efetividade da execução do sistema de gestão visando avaliar se as metas e objetivos estão sendo cumpridos e verificar se está havendo uma melhoria contínua no desempenho energético da instalação (FOSSA e SGARBI, 2015).

Para que essa fase ocorra, é necessário realizar medições periódicas do desempenho e do consumo de energia da organização, de modo a realizar o processo de medição e verificação dos projetos executados e, assim, quantificar seus ganhos.

Ainda, essa fase utiliza intensamente os indicadores desenvolvidos anteriormente como métrica quantitativa de avaliação da efetividade das ações realizadas.

Vale ressaltar que, se não se sabe em qual patamar a organização se encontra, não há como planejar nenhum tipo de melhoria coerente já que não será possível analisar se essa meta é adequada. Ainda, não será possível identificar se a meta foi de fato alcançada ou como foi alcançada. Desse modo, se não houver um monitoramento constante da instalação e a medição de suas grandezas relevantes, todo o processo falhará.

2.7 Avaliar

Esta fase é a chave para o processo de melhoria contínua, pois cria as bases para que o planejamento seja refinado e para que o próprio sistema de gestão de energia seja revisto. Diferente da fase anterior que tem como objetivo medir se os projetos e ações realizados surtiram o efeito planejado, esta fase visa verificar como o sistema de gestão operou e quais os gargalos e dificuldades encontrados.

Assim, é realizada uma autoavaliação do trabalho realizado e são determinados os pontos que devem ser alterados, sejam eles adaptações no planejamento criado, gestão dos recursos humanos ou melhoria nas comunicações internas. Dessa forma, serão propostas soluções para os erros ocorridos que serão implementadas no próximo ciclo de trabalho, e tais mudanças corrigirão alguns erros tornando o processo melhor.

Além disso, este é o momento de consolidar as informações geradas nas demais fases, de modo a apresentar para a alta gerência da organização o trabalho realizado levando os ganhos quantitativos e qualitativos alcançados. Esta comunicação é de suma importância para que a gestão da empresa entenda a importância do trabalho realizado e apoie o sistema, já que este está trazendo benefícios para a instituição, continuando com o projeto e podendo ampliar suas responsabilidades e ações.

Outro ponto importante dessa fase é divulgar os dados consolidados para o restante da empresa visando conscientizar todos sobre o trabalho realizado e engajá-los no processo, difundindo a importância da gestão de energia.

2.8 Ciclo PDCA

O processo apresentado consiste, como exposto, no planejamento das ações a serem adotadas e dos objetivos que se deseja alcançar. Na sequência são executadas as ações previstas e medem-se seus resultados visando verificar se as metas foram cumpridas. Por fim, ocorre a consolidação dos dados gerados identificando os erros e desafios encontrados para que estes sejam solucionados no próximo planejamento e, assim, tornem o processo melhor.

Vale ressaltar que em nenhum momento foram estipulados prazos para as etapas apresentadas. Isso ocorreu pelo fato de que cada projeto apresenta suas particularidades, e o sistema de gestão será específico em cada organização. Desse modo, cabe à equipe técnica responsável determinar seus prazos de acordo com os objetivos da instituição e de maneira condizente com as tarefas a serem implementadas.

Como comentário adicional sobre o tema, há três fatores que devem impactar diretamente na efetividade que um sistema de gestão de energia terá. O primeiro deles é a importância dada ao sistema pela alta direção da organização, pois se esta apoiar o projeto serão disponibilizados recursos e autoridade para os membros do sistema de gestão. Caso contrário, a equipe não terá condições efetivas de desempenhar seu papel e os resultados obtidos podem ser pequenos.

Outro fator importante é o processo de documentação, de forma a criar um registro completo dos projetos realizados, estudos desenvolvidos e erros observados. Estas informações serão importantes para impulsionar a melhoria contínua do processo, além de servirem de memorial, já que, com o passar do tempo, os membros da equipe podem ser trocados e o conhecimento obtido precisa ser mantido.

Por último, há o processo de medição e verificação que deve ser implementado em todas as fases do projeto. Como já ressaltado, sem medições não há como propor medidas de melhoria, de como acompanhar o andamento dos projetos, de modo que todo o sistema de gestão perca o sentido caso esse processo não seja realizado.

2.9 Indicadores

Indicadores são métricas utilizadas para se avaliar algum tipo de processo, ou seja, eles condensam as informações obtidas em um número e estabelecem limites para este valor, facilitando, assim, o monitoramento deste fator. Como exemplo, imagine a quantidade de quilômetros percorridos por litro de combustível de um automóvel. Este valor pode ser usado como medida de eficiência de consumo do veículo, já que apresenta uma informação normalizada que pode ser monitorada e comparada servindo para identificar aumentos ou decréscimos na eficiência do aparelho.

Os indicadores podem ser divididos em duas categorias de acordo com seus objetivos (SAIDEL, FAVATO e MORALES, 2005):

- indicadores descritivos: caracterizam o processo sem justificar causas para seus desvios. Geralmente são macroindicadores, do ponto de vista que analisam o processo como um todo; e
- indicadores explicativos: explicam os desvios dos indicadores descritivos, ou seja, são indicadores referentes a processos menores e determinam as contribuições para as variações dos demais indicadores.

Para exemplificar os conceitos acima referidos, imagine que uma indústria utiliza um indicador descritivo para medir a sua eficiência energética total e que este seja calculado a partir da comparação da energia consumida no mês com a média de consumo da empresa. Este indicador não conseguiria identificar as causas que acarretariam seu aumento ou sua redução. Portanto, seria necessário utilizar indicadores explicativos que auxiliariam na análise, como, por exemplo, energia consumida por unidade de produto ou energia mensal por número de funcionários.

Desse modo, é possível criar novos indicadores que correlacionem o consumo de energia a uma variável do processo produtivo normatizando essa variável. Por exemplo, se uma indústria produzir uma quantidade x de peças, ela gastará uma quantidade determinada de energia, e, caso a produção dobre, ela inevitavelmente gastará mais energia. Caso fosse utilizado apenas o indicador descritivo, poderia se chegar à conclusão de que a eficiência do processo foi reduzida, já que houve um aumento expressivo do consumo, o que não seria correto, pois as condições do processo foram alteradas. Assim, utilizando o indicador explicativo que correlaciona a produção com o consumo de energia, pode se observar se o aumento da produção compensou o aumento do consumo e verificar se a eficiência do processo se manteve, justificando, então, a variação do macroindicador.

Assim, os indicadores devem ser determinados na fase de planejamento do sistema de gestão de energia, de modo a refletir as variáveis que influenciaram nas ações a serem adotadas. Além disso, deve determinar limites que eles podem assumir e planos de ação caso atinjam estes limites. Em seguida, na fase de execução, os indicadores devem ser monitorados para determinar como anda o projeto e para servirem de dados para a fase de checagem. Na etapa final de análise, os indicadores podem ser revistos e melhorados, além de servirem de importante informação para apresentar a alta gerência da empresa e para divulgar os projetos.

2.10 Benefícios

Um sistema de gestão de energia bem implantado proporciona diversos benefícios para a instalação, sendo estes apresentados a seguir:

- redução de custos com energia e combustíveis: ao aplicar um sistema de gestão, é possível acompanhar os gastos de energia e combustíveis da instalação identificando consumos atípicos e possibilidades de melhoria. Ademais, o acompanhamento auxilia na manutenção de custos;
- existência de dados do consumo de energia e demais grandezas: como consequência direta do monitoramento do consumo de energia, haverá um histórico detalhado dos dados de consumo, de forma a embasar qualquer análise futura e auxiliar em processos de medição e verificação das ações de eficiência que venham a ser implementadas;
- criação de metas para redução do consumo energético: como a gestão é um processo estruturado e contínuo, ele pode traçar metas de longo prazo para redução do consumo;
- redução da emissão de gases poluentes: todo gasto energético, seja este de energia elétrica ou através de combustíveis, implica emissões de gases estufas para a atmosfera. Portanto, se o consumo for reduzido haverá também uma redução deste tipo de poluição;
- integração com outros sistemas de gestão existentes: pode ser integrado ao programa geral de gestão da empresa otimizando o processo como um todo e auxiliando na redução de custos; e
- vantagens competitivas: a gestão energética traz benefícios econômicos diretos para a instituição, pois o custo dos combustíveis e da energia elétrica apresenta tendência de crescimento ao longo do tempo. Assim, uma empresa que consome menos irá ter menor custo operacional fixo e, assim, apresentará vantagem competitiva sobre suas concorrentes.

Dessa forma, esses projetos alinham vantagens econômicas e ambientais e de melhoria de gestão, integrando diversos setores da organização.

2.11 Medidores e Controladores de Consumo

Como exposto anteriormente, a medição de energia é um fator determinante para o sistema de gestão fornecendo os dados que embasaram todas as análises do projeto. Desse modo, esta seção tem o objetivo de discutir os aspectos das variáveis a serem medidas e dos equipamentos de medição propriamente dito. Além disso, será abordado o uso de controladores de consumo para gerenciamento ativo da demanda e consumo de uma instalação.

2.12 Variáveis de Interesse

As variáveis de interesse são aquelas que influenciam diretamente o consumo de energia. Estas serão utilizadas para caracterizar o estado atual da instalação e serão utilizadas como métrica para criação de indicadores explicativos para os processos, de modo a permitirem uma análise mais precisa dos ganhos obtidos pela gestão de energia.

Cada organização apresenta suas peculiaridades assim como seus processos distintos, de forma que não é possível discriminar um conjunto de variáveis que se aplique a todas as situações, sendo responsabilidade da equipe técnica determinar quais são as variáveis para o seu projeto.

Para facilitar a escolha, pode-se utilizar o mesmo procedimento de identificação de variáveis independentes e dependentes apresentado na seção de medição e verificação. Além disso, o sistema de gestão de energia pode ser integrado aos demais sistemas de gestão da empresa. Assim, dados de produtividade, tempo de produção e número de unidades produzidas obtidos pelo sistema de gestão poderiam ser dados de entrada.

O passo a passo a seguir apresenta os itens a serem considerados para a medição das variáveis de interesse:

- determinação dos processos da organização;
- quais as variáveis influenciam no consumo de energia desses processos;
- quais variáveis já são medidas;
- quais as variáveis menos onerosas de serem medidas; e
- quais são as variáveis mais fáceis tecnicamente de medir;

Assim, deve-se sempre verificar quais os parâmetros do processo que já estão sendo medidos, pois estes dados já estarão disponíveis sem custos adicionais ou necessidade de novos medidores. Caso os dados disponíveis não sejam suficientes, devem-se avaliar quais os parâmetros que podem ser obtidos ao menor custo e com menor impacto no processo produtivo.

2.13 Medidores de Energia

Os medidores são aparelhos que possuem a função de medir grandezas do processo produtivo. Em geral, é medido o consumo de energia de equipamentos e sistemas para utilizar suas informações no sistema de gestão de energia, porém há casos nos quais é necessário medir outras variáveis como demanda, fator de potência, geração de harmônicos e outras grandezas elétricas.

Atualmente há uma gama de aparelhos de medição que podem ser utilizados e devem ser escolhidos, dependendo da precisão desejada ao projeto. Podem-se utilizar os conceitos de fronteira de medição para determinar a posição dos medidores tal qual no processo de medição e verificação.

2.14 Controladores de Consumo

Estes equipamentos são utilizados para realizar a gestão da energia na instalação, integrando o sistema de medição com o sistema de acionamento das cargas. Um controlador de consumo ou gerenciador de energia, como também é chamado, consiste em um microcomputador com *software* embarcado capaz de centralizar as informações dos medidores de energia e tomar decisões de acordo com sua programação. Ademais, ele pode ser integrado com dispositivos de memória de massa para armazenar dados e criar um histórico ou pode ser integrado a um dispositivo de comunicação para exportar seus dados para uma plataforma de gestão *online*.

Inicialmente os medidores de energia são conectados ao controlador de consumo, de modo que ele receba os dados medidos. Podem ser utilizados equipamentos específicos de medição ou até os próprios medidores da concessionária para fornecer esses dados.

Em seguida o controlador avalia se os valores de consumo, demanda e fator de potência estão de acordo com sua programação. Caso haja uma tendência abrupta de aumento destas variáveis, o sistema ativa alarmes para sinalizar a situação atípica para seus operadores e seus dispositivos de acionamento, de maneira a manobrar as cargas em funcionamento.

Esse sistema pode ser utilizado para evitar picos de demanda, manobrar bancos de capacitores para corrigir o fator de potência e acionar geradores para substituir o consumo no horário de ponta. Além disso, ele pode ser usado para centralizar as informações emitidas por diversos medidores e enviá-las à rede.

2.15 Softwares de Gestão de Energia

Seguindo a tendência de interligação de processos e de modernização das indústrias, os quais caracterizam a chamada “Indústria 4.0”, vem se tornando mais comum a utilização de recursos computacionais para monitorar e analisar os parâmetros de produção.

Assim, foram desenvolvidos *softwares* específicos de gestão de energia que podem ser utilizados pela equipe de gestão para consolidar e tratar os dados obtidos em suas medições.

Tais *softwares* recebem os dados diretamente dos medidores ou de centrais de dados e são capazes de tratá-los, gerando relatórios de consumo e criando indicadores que podem ser acompanhados, podendo, então, ser utilizado para automatizar o monitoramento do sistema e otimizar o trabalho da equipe de gestão de energia.

Além disso, essas ferramentas apresentam a vantagem de possibilitar o monitoramento remoto dos sistemas e de gerarem alertas de irregularidades em tempo real, reduzindo o tempo de resposta da equipe a qualquer desvio observado.

3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE GESTÃO ENERGÉTICA

Usualmente, as redes elétricas internas de instituições públicas de ensino do Brasil, bem como prédios da Administração Pública, não possuem mecanismos para monitoramento contínuo de consumo. De fato, em diversos locais, consta-se apenas a presença do medidor dedicado ao faturamento de consumo de energia e demanda, fato este que limita o conhecimento das características de consumo da instalação e o desenvolvimento de ações pontuais de eficiência energética.

Nesse sentido, esta seção apresenta aspectos relacionados ao desenvolvimento do Sistema de Gestão Energética da Universidade de Brasília.

3.1 Metodologia de Desenvolvimento

Para o desenvolvimento do sistema, foram adotadas as técnicas de Engenharia de *Software* baseadas nas metodologias ágeis. Os métodos ágeis exaltam a simplicidade, o *feedback* contínuo e a adaptação às mudanças, que podem ser obtidos a partir de comunicação direta entre a equipe de desenvolvimento e os usuários finais, gerando maior qualidade de código e entrega contínua de *software*. Dentre as metodologias ágeis adotadas neste sistema, destacam-se o *Scrum* (SCHWABER e SUTHERLAND, 2017) e o *Extreme Programming* (XP) (BECK, 2000). O *Scrum* auxilia na organização da equipe e das tarefas, priorização e organização do desenvolvimento ao longo do tempo dividindo ações em *sprints* com reuniões periódicas de avaliação, planejamento e correção de rotas. A metodologia *Extreme Programming* auxilia na tomada de decisões rápidas e tem como principais características o *feedback* constante, o desenvolvimento incremental e o incentivo à comunicação constante entre as pessoas envolvidas. Além disso, adotou-se a técnica do *Kanban* para classificar e organizar a execução das tarefas (VACANTI, 2019).

O desenvolvimento do código foi todo realizado utilizando a ferramenta *Git* (git-scm.com) para o controle de versão e a plataforma *Gitlab* (gitlab.com) para a hospedagem dos repositórios de código na nuvem, bem como a gerência das tarefas (*issues*) do projeto e *boards* para o controle das *sprints* e aplicação das metodologias ágeis adotadas. Todos os repositórios podem ser acessados em <https://gitlab.com/lappis-unb/projects/SMI>. A página inicial de hospedagem dos repositórios na plataforma Gitlab pode ser visualizada na Figura 1.

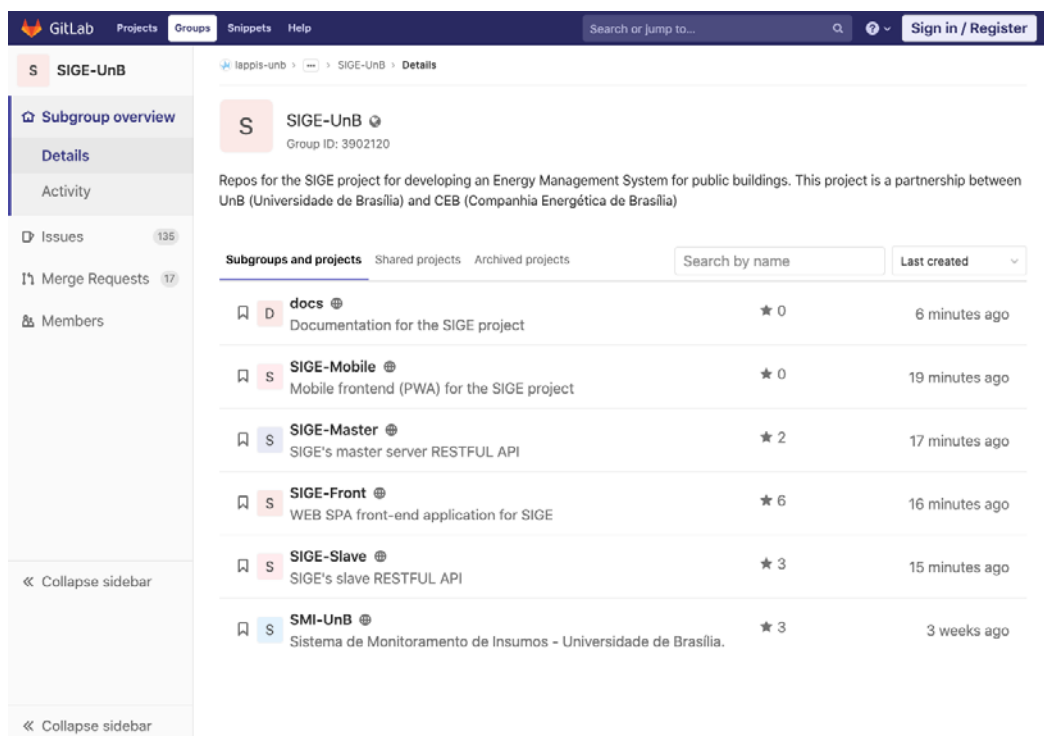


Figura 1. Repositórios do Projeto SIGE

Além destes recursos fundamentais ao desenvolvimento e providos pelos ambientes de controle de versão e repositório, foram adotadas ainda diversas outras técnicas complementares que visam aumentar a qualidade do código, a integração entre os desenvolvedores e a facilidade destes em trabalhar de maneira colaborativa. Dentre estas técnicas estão a criação de testes automatizados, a configuração de um ambiente de Integração Contínua e *Deploy* Contínuo, a Automação de Configuração de Ambiente e o Isolamento do Ambiente. Mais detalhes sobre estas técnicas estão descritos nas seções subsequentes.

3.2 Licenciamento e Uso do Sistema (*Software Livre*)

Conforme descrito anteriormente, o sistema foi todo concebido dentro dos paradigmas de *Software Livre* e está sob a licença GNU General Public License Versão 3 (GPL v3). Isso garante não só o acesso ao código fonte como as quatro liberdades básicas do *Software Livre* (GNU, 2020).

Esta abordagem facilita a adoção do sistema por outros órgãos governamentais e possibilita a criação de uma comunidade de desenvolvimento de novas funcionalidades, mesmo após o término do acordo de cooperação UnB-CEB-Finatec. Ou seja, esta forma de licenciamento garante que toda a evolução possa ser feita tanto no âmbito da UnB quanto de outras instituições que venham a adotar o sistema e sejam disponibilizadas livremente. Como exemplo de resultado desta ação, ainda no período de desenvolvimento da ferramenta, diversos alunos do curso de Engenharia de *Software* da Universidade de Brasília já se envolveram de maneira voluntária com o projeto, submetendo melhorias e novas funcionalidades ao código fonte do sistema.

3.3 Levantamento de Requisitos

A etapa inicial do desenvolvimento consistiu no levantamento preliminar e a sistematização dos requisitos do projeto, os quais foram definidos a partir de diversas rodadas de entrevistas com pesquisadores, gestores da prefeitura da Universidade e futuros usuários do sistema.

Em primeiro lugar, foram levantados os *perfis de usuários* que teriam acesso ao sistema, fato este que implicou a definição das seguintes categorias:

- **gestores:** esta categoria engloba funcionários da Universidade que trabalham diretamente na operação e manutenção das instalações elétricas e necessitam saber, em tempo real, o estado de funcionamento do sistema, ter acesso a histórico de dados de perfil de consumo, variações de tensão de fornecimento, carregamentos de cabos e transformadores, dentre outros que possam indicar a necessidade de manutenção e o planejamento de expansão dos sistema;
- **pesquisadores:** pesquisadores em geral que desejam ter acesso a todos os tipos de dados elétricos para a realização de pesquisas; e
- **público em geral:** informações gerais públicas de perfil de consumo, as quais podem ser utilizadas em campanhas educativas voltadas para eficiência energética na instituição.

Em seguida, foram listados os requisitos gerais do sistema e as funcionalidades para cada perfil de usuário.

Tabela 2. Requisitos Gerais (REQ-G) para Sistema de Gestão Energética

REQ-G	Requisitos Gerais	Descrição
1	Monitoramento e coleta de grandezas elétricas instantâneas e agregadas a partir das instalações elétricas de todos os campi da Universidade de Brasília.	Coleta periódica de grandezas elétricas instantâneas como tensão, corrente, consumo, geração, fator de potência, potência ativa/reativa/aparente. E grandezas agregadas como o consumo e geração de energia por períodos.
2	Armazenamento permanente das grandezas elétricas coletadas para consulta posterior.	Armazenamento de todas as grandezas coletadas em um banco de dados permanente para consulta posterior.
3	Manutenção do cadastro de medidores, campi e agrupamentos (prédios, faculdades etc), usuários e seus respectivos perfis.	Realização do cadastramento das entidades.
4	Geração de gráficos para grandezas instantâneas.	Visualização dos dados elétricos instantâneos coletados em forma de gráficos por tipo de grandeza e por medidor.
5	Geração de gráficos para grandezas agregadas.	Visualização dos dados elétricos agregados em forma de gráficos acumulados por medidor, prédio, campus etc.
6	Exportação de dados brutos coletados.	Possibilidade da exportação de dados coletados em formato CSV para pesquisa.
7	Geração de relatórios.	Geração de relatórios dos dados coletados por período e acumulados por medidor, prédio, campus etc.
8	Geração de notificações sobre o mau funcionamento do sistema.	Identificação e classificação de situações de anormalidade da rede elétrica (sobretensão, subtensão, queda de fase etc) e geração de alertas notificando os gestores.

3.4 Arquitetura do Sistema

Sendo o propósito geral do sistema monitorar as grandezas elétricas de edificações para auxiliar na sua gestão, sua arquitetura deve contemplar desde os dispositivos de medição em contato direto com a instalação elétrica dos prédios, passando pela agregação e transformação dos dados básicos em informações relevantes que serão disponibilizadas aos gestores e usuários do sistema.

Uma das características observadas nos campi da Universidade de Brasília é que estes são distribuídos, geograficamente, em cidades distintas no Distrito Federal, com distâncias de até 40 km a partir do campus central. Somente o campus central (Darcy Ribeiro) possui uma área total de 400 hectares, nos quais se distribuem cerca de 500 mil metros quadrados de área construída, sendo composto por mais de 80 edificações, algumas delas com instalações elétricas de alta complexidade como é o caso do prédio do Instituto Central de Ciências (ICC) com aproximadamente 800 metros de extensão. Além da complexidade da rede elétrica, há uma grande diversidade na infraestrutura da rede de dados, incluindo redes cabeadas, *wi-fi* e transmissões via rádio, as quais precisam ser consideradas no processo de coleta das medidas. Estas são características que tornam desafiador um sistema de monitoramento geral que possa garantir consistência na coleta de dados.

Considerando a topologia das instalações elétricas, o Sistema de Gestão Energética da Universidade de Brasília foi concebido incluindo cinco subsistemas ou camadas:

1. **Dispositivos de medição:** estes elementos se caracterizam por medidores de grandezas elétricas, os quais foram instalados nos quadros gerais de baixa tensão de edificações da Universidade de Brasília;
2. **Servidores de coleta de dados:** responsáveis por coletar periodicamente as medidas de tensão, corrente, consumo e geração de energia, potência ativa/reactiva/total, dentre outros, de múltiplos dispositivos de medição de energia instalados no campus da Universidade. Além disso, monitoram o estado (ligado, desligado, sem conexão etc.) de cada medidor;
3. **Servidor central:** responsável por centralizar, armazenar e gerenciar todas as medidas coletadas pelos servidores de coletas de dados e tornar as informações disponíveis para serem apresentados pelas camadas de interface gráfica;
4. **Interface gráfica *web*:** responsável por apresentar aos usuários os dados das medições coletadas em formatos de gráficos, relatórios e painéis informativos para auxiliar a gestão do sistema de distribuição de energia da Universidade; e
5. **Interface gráfica *mobile*:** responsável por apresentar aos usuários gestores uma interface simplificada de gestão, com informações resumidas e notificações para auxiliar na gestão do sistema.

A Figura 2 apresenta uma visão geral do Sistema de Gestão Energética implantado na Universidade de Brasília.

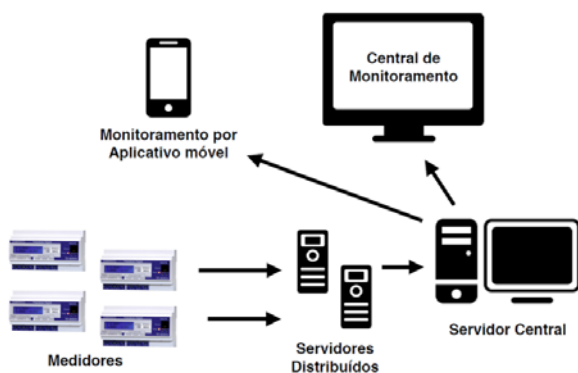


Figura 2. Arquitetura geral do Sistema de Gestão Energética

As próximas seções apresentam detalhes dos subsistemas e as características de integração entre eles.

3.5 Integração entre Subsistemas, Tecnologias e Protocolos de Comunicação

Tomando-se por base os aspectos apresentados na seção anterior, a Figura 3 apresenta o diagrama de integração entre os diversos módulos que compõem o sistema, as respectivas tecnologias e protocolos que viabilizam a intercomunicação.

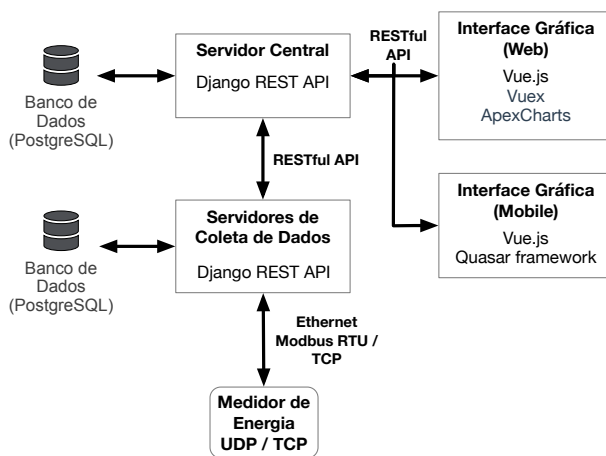


Figura 3. Diagrama de Integração

Nesse contexto, vale destacar que as tecnologias empregadas para o desenvolvimento do sistema são:

- **Servidor Central e servidor de dados:** desenvolvimentos realizados em linguagem Python, por meio do *framework* Django REST;
- **Banco de dados:** a modelagem de banco de dados é realizada por meio da plataforma PostgreSQL; e
- **Interface gráfica:** estas camadas usam HTML/CSS como linguagens de *layout* e JavaScript como linguagem dinâmica associada aos *frameworks* Vue.js e Quasar.

3.6 Subsistema de Medição

A primeira camada do Sistema de Gestão Energética se compõe de medidores de grandezas elétricas, os quais foram instalados nos quadros gerais de baixa tensão de edificações sob monitoramento. Para a definição do subsistema de medição, procede-se à realização de estudos para a determinação e avaliação do tipo de medidor que poderia ser empregado em sistemas de monitoramento energético. De fato, tendo em vista as tecnologias disponíveis no mercado e levando-se em consideração a minimização de custos para a implantação e distribuição destes dispositivos na Universidade de Brasília ou em outra instituição, os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento resultaram no estabelecimento de um conjunto de requisitos mínimos a que estes dispositivos devem atender. Tais requisitos têm por objetivo nortear a escolha dentre uma vasta gama de equipamentos e fabricantes existentes no mercado e estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Requisitos para medidores (REQ-M) de grandezas elétricas

REQ-M	Requisito
1	Grandezas medidas: tensão; corrente; potência ativa, reativa e aparente; fator de potência; Demanda Ativa Total, Demanda Reativa Total.
2	Esquemas de medição monofásico, bifásico e trifásico.
3	Compatibilidade com sensores de tensão e corrente externos, de forma a permitir alteração na faixa de medição.
4	Compatibilidade para fixação em painel elétrico, por meio de trilho padrão DIN.
5	Invólucro com grau de proteção IP 20 ou superior.
6	Disponibilidade de recursos de <i>hardware</i> para monitoramento de outras grandezas físicas, tais como temperatura, vazão de água, dentre outros.
7	Comunicação – Camada física: <i>ethernet</i> e disponibilidade de recursos de <i>hardware</i> para conectividade com redes <i>wi-fi</i> (IEEE 802.11 b/g/n), 3G e 4G.
8	Comunicação – Camada de transporte: suporte ao protocolo TCP/IP e/ou UDP.
9	Comunicação – Camada de aplicação: suporte ao protocolo MODBUS.
10	Disponibilidade de relógio de tempo real interno ao medidor.
11	Protocolo aberto: disponibilização de mapa de memória ou sistema padronizado para troca de mensagens, para integração com <i>software</i> de Gestão de Energia.
12	Disponibilidade de memória de massa, de forma a armazenar informações no próprio medidor para resgate posterior por sistema de gestão, no caso de falha da rede de comunicação.
13	Certificado de calibração emitido por órgão acreditado pelo Inmetro.

Com base nas informações anteriores, os medidores de grandezas elétricas selecionados para este projeto estão apresentados na Figura 4, consistindo nos modelos TR4020 e MD30 fabricados pela empresa Embrasul. Ambos atendem aos requisitos listados na Tabela 3, sendo capazes de medir as grandezas desejadas, ter capacidade de armazenar dados em sua memória e possuir protocolo aberto com suporte à comunicação via *ethernet*. No caso do modelo TR4020, somente o protocolo Modbus RTU (MODBUS, 2012) via UDP é suportado, enquanto o modelo MD30 também suporta o protocolo Modbus TCP/IP (MODBUS, 2006).

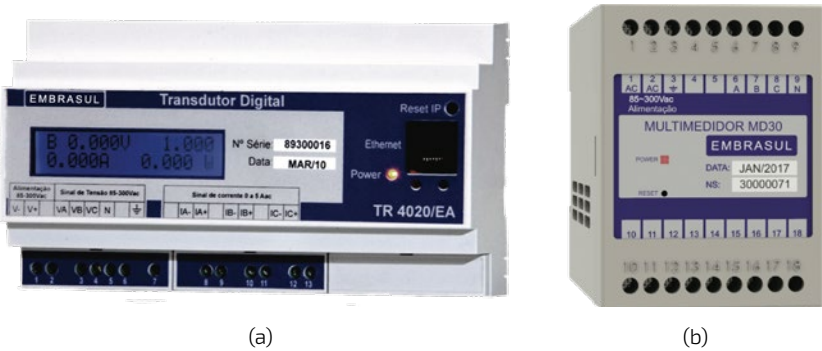


Figura 4. Medidores da Embrasul. (a) TR4020; (b) MD30

A Tabela 4 lista os prédios de cada campus onde foram instalados os medidores, enquanto a Figura 5 apresenta o mapa com a alocação dos mesmos medidores nos campi da UnB. No total, o projeto contemplou a instalação de 29 unidades.

Tabela 4. Lista de prédios com medidores

Campus	Prédio	Quantidade de medidores
Darcy Ribeiro	Biblioteca Central (BCE)	1
	Bloco de Salas de Aulas Norte (BSAN)	1
	Casa do Estudante (CEU)	2
	Centro de Processamento de Dados (CPD)	2
	Faculdade de Administração, Contabilidade e Economia (FACE)	1
	Faculdade de Tecnologia (FT)	3
	Laboratório de Estudos Geodinâmicos e Ambientais	1
	Hospital Veterinário (HVET)	1
	Instituto de Biologia (IB)	3
	Instituto Central de Ciências (ICC)	6
	Pavilhão Anísio Teixeira (PAT)	1
	Pavilhão João Calmon (PJC)	1
	Reitoria	1
	SG-11	1
Faculdade do Gama	Unidade de Ensino e Docência (UED)	2
	Unidade Acadêmica (UAC)	1
	Laboratório de Desenvolvimento de Transportes e Energias Alternativas (LDTEA)	1
Total		29

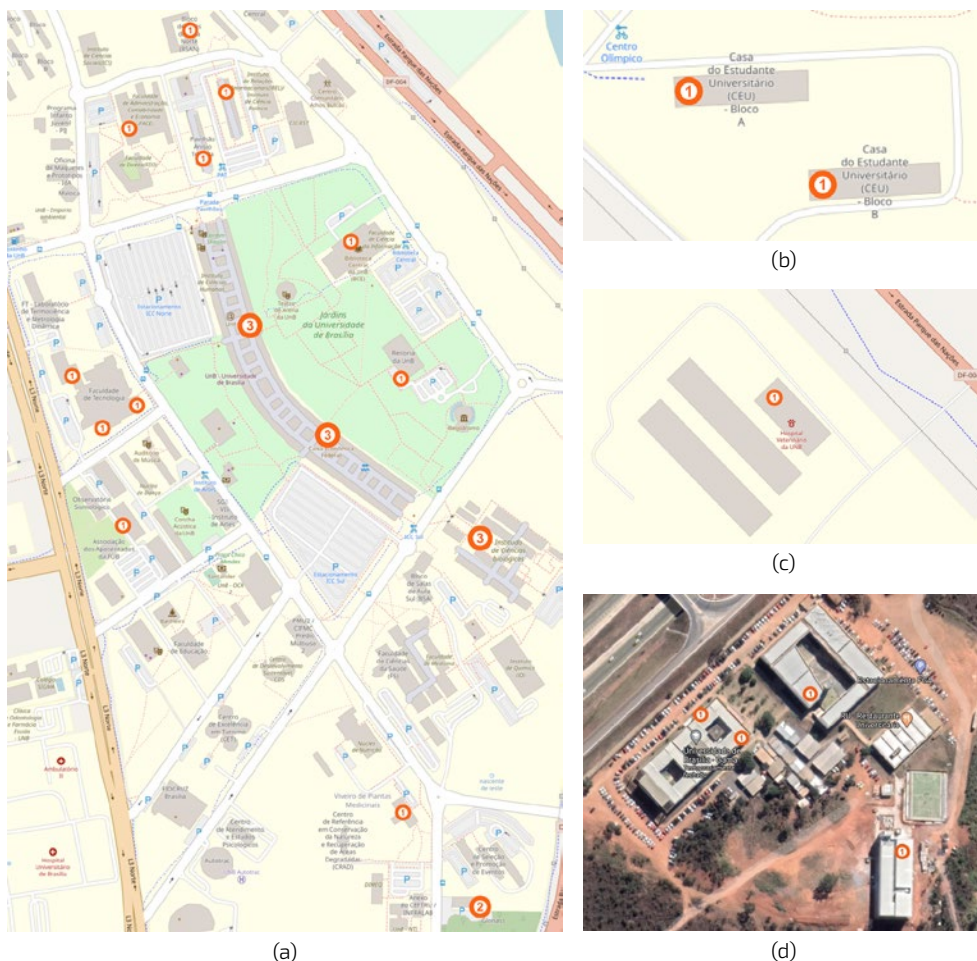


Figura 5. Distribuição de medidores nos campi da UnB. (a) Campus Darcy Ribeiro; (b) Casa do estudante; (c) Hospital Veterinário; (d) Faculdade UnB Gama

A Figura 6 apresenta o registro fotográfico da montagem dos medidores em quadros de baixa tensão da Universidade de Brasília.



Figura 6. Exemplo de instalação dos medidores no Campus Darcy Ribeiro

3.7 Servidor de Coleta de Dados

Conforme apontado anteriormente, a complexidade da topologia das edificações a serem monitoradas levou à decisão de dividir o sistema de coleta e armazenamento de medidas em duas camadas: o Servidor de Coleta de Dados e o Servidor Central. A primeira delas é tratada nesta seção e tem o papel de realizar a comunicação direta com os medidores, realizando seu armazenamento em memória local para posteriormente enviar os dados ao Servidor Central.

A necessidade desta camada seu deu pelo fato de serem observados constantes problemas de comunicação de rede de dados entre os medidores dos campi. Mesmo selecionando no mercado medidores com capacidade de armazenamento de dados em sua memória local, estes são capazes de registrar somente uma parcela dos dados medidos. Neste caso, foi definido que, em cada campus, fosse instalado um servidor de coleta local, evitando, assim, a perda de dados por falhas de comunicação entre os campi. Deve-se ressaltar que a inserção desta camada de coleta de dados implica um aumento da redundância do sistema e tende a reduzir a probabilidade de falhas de comunicação entre medidores e Servidor Central.

Os requisitos de *software* para esta camada do sistema estão definidos na Tabela 5 e detalhados na sequência.

Tabela 5. Requisitos de *software* para Servidor de Coleta (REQ-S-SCD) de Dados

REQ-S-SCD	Requisitos Gerais	Descrição
1	Comunicação com os medidores	Implementar comunicação <i>ethernet</i> via protocolos Modbus RTU e Modbus TCP com os medidores.
2	Listagem de medidores	Manter lista de medidores aos quais se conecta.
3	Coleta de dados	Realizar a coleta de dados periódica dos medidores, incluindo um procedimento de resgate de dados armazenados na memória do medidor após quedas de energia e/ou interrupção na comunicação).
4	Armazenamento	Manter medidas em Banco de Dados interno para armazenamento local das medidas.
5	Sincronia de relógios	Manter seu relógio e os relógios dos medidores de energia sincronizados com o Servidor Central.
6	Gerenciamento de eventos	Avaliar as grandezas medidas para detecção e criação de eventos em situações de anormalidade.
7	Disponibilização de dados	Fornecer os dados de medições e evento para o Servidor Central.

A **comunicação com os medidores** foi implementada utilizando os protocolos Modbus RTU (MODBUS, 2012) e Modbus TCP/IP (MODBUS, 2006). Para agilizar a coleta de dados, o processo de leitura é realizado utilizando múltiplas *threads*, uma para cada medidor e de forma simultânea. Para evitar uma grande quantidade de acessos simultâneos a um único medidor vindos de diferentes serviços, foi criada uma camada independente no Servidor de Coleta de dados que é um *broker* que gerencia as requisições. O papel do *broker* é o de criar uma fila de requisições independente para cada medidor e gerenciar a realização destas mesmas requisições em sequência.

A **listagem de medidores** é criada e gerenciada a partir do Servidor Central. Cada medidor é individualmente cadastrado com seu respectivo *endereço IP* e *modelo* que indica o protocolo a ser utilizado. Além disso, mantém-se o registro se o medidor está em modo ativo ou não, indicando a necessidade ou não de coletar seus dados.

O processo de **coleta de dados** é realizado periodicamente, de acordo com cada tipo de grandeza a ser lida. A cada coleta, há um processo de persistência que tenta realizar a coleta até três vezes antes de considerar o medidor fora de alcance. Neste caso, no próximo momento de coleta, o mecanismo de *resgate de dados históricos* é acionado para acessar a memória interna de histórico de medidas do medidor. Um dado só é considerado “perdido” quando o próprio medidor não mais o possui em sua memória histórica, provavelmente decorrente de uma falta de energia.

As grandezas lidas estão divididas em quatro grupos, os quais estão apresentados na Tabela 6 e se enquadram nos seguintes grupos:

- **Grupo 1:** composto por medidas integralizadas em uma janela de 1 minuto de medição. Ressalta-se que o medidor permite a configuração deste intervalo de integralização, conforme definições do usuário;
- **Grupo 2:** grandezas resultantes da agregação de medições durante um período de 15 minutos. Tais dados estão em consonância com as informações verificadas em “memórias de massa” de sistemas de faturamento de energia elétrica de consumidores do grupo A;
- **Grupo 3:** representa a agregação das medições realizadas durante um mês em um único valor; e
- **Grupo 4:** grandezas que contemplam os *maiores valores* observados ao longo de um mês de monitoramento.

Tabela 6. Grandezas elétricas monitoradas pelo Sistema de Gestão Energética

Grupo 1 Integralização de medições de 1 minuto	Grupo 2 Integralização de medições de 15 minutos	Grupo 3 Integralização de medições de 30 dias	Grupo 4 Maiores valores observados ao longo de 30 dias de medição
Corrente	Energia Ativa Consumida	Energia Ativa Consumida	Quatro maiores potências acumuladas ativas
Tensão	Energia Ativa Gerada	Energia Ativa Gerada	
Potência Ativa	Energia Reativa Indutiva	Energia Reativa Indutiva	
Potência Reativa	Energia Reativa Capacitiva	Energia Reativa Capacitiva	Quatro maiores potências acumuladas reativas
Potência Aparente	Máxima Potência Ativa acumulada (15 min)	Máxima Potência Ativa acumulada (15 min)	
Fator de Potência	Máxima Potência Reativa acumulada (15 min)	Máxima Potência Reativa acumulada (15 min)	
DHT Tensão	–	–	–
DHT Corrente	–	–	–

O **armazenamento dos dados** é feito em um banco de dados PostgreSQL localmente no Servidor de Coleta. São armazenados todos os dados coletados conforme a Tabela 7 para cada um dos medidores cadastrados. Estes dados são guardados localmente por um período máximo de 30 dias para oferecer a oportunidade de resgate de histórico de dados pelo Servidor Central no caso de perda de comunicação com este.

A **sincronia de relógios** é realizada durante o processo de coleta de dados, em que data e hora de cada medidor são comparadas com o relógio local. A data e hora dos medidores precisam estar sempre em sincronia para garantir a consistência nas coletas, principalmente quando há perda na comunicação com os medidores e se deve confiar na data e hora armazenadas no medidor para os dados históricos. Além disso, neste processo se identifica a necessidade de troca das baterias internas dos medidores.

O **gerenciamento de eventos** é avaliado a cada momento de coleta de dados com o intuito de gerar alertas aos gestores sobre a necessidade de intervenção no sistema, uma vez que um dado indicador apresentou uma situação de anormalidade. Cada evento é avaliado individualmente, por fase do sistema, e um filtro de média móvel com histerese é implementado com o intuito de somente gerar notificações após a situação de anormalidade estar confirmada. Atualmente está implementada a identificação de quatro tipos de eventos:

- **Tensão precária:** quando a tensão lida (TL) estiver nas seguintes faixas $191\text{ V} \leq \text{TL} < 202\text{ V}$ ou $231\text{ V} < \text{TL} \leq 233\text{ V}$;
- **Tensão crítica:** quando a tensão lida (TL) estiver nas seguintes faixas $\text{TL} < 191\text{ V}$ ou $\text{TL} > 233\text{ V}$;
- **Falta de fase:** quando uma ou mais fases se encontra desligada; e
- **Falha de comunicação:** quando não é possível estabelecer comunicação com um medidor.

Por fim, a **disponibilização de dados** é realizada a partir de uma API REST para a conexão do Servidor Central com os *endpoints* que podem ser vistos na Figura 7.

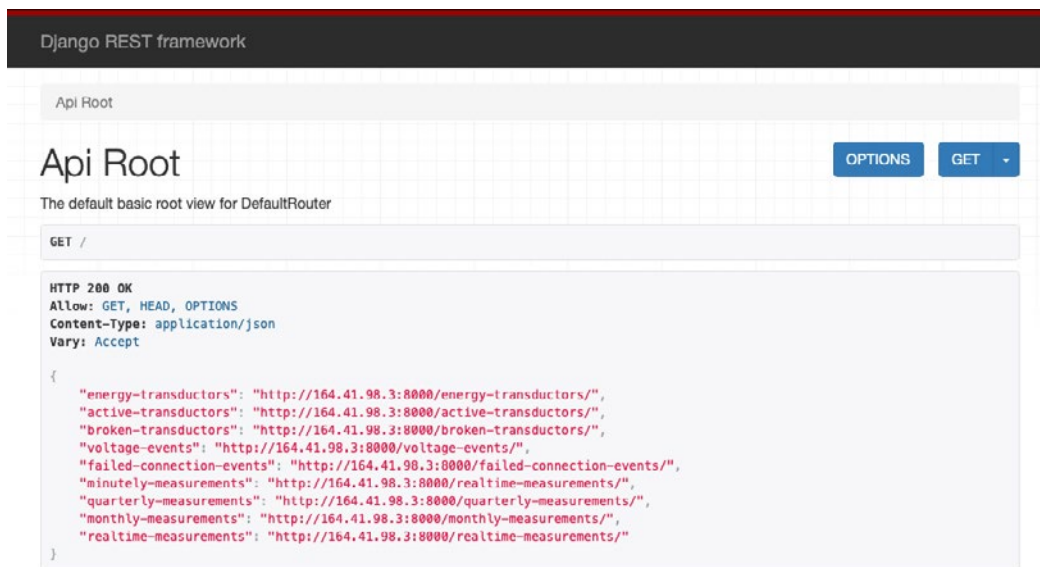


Figura 7. Endpoints API REST – Servidor de Coleta de Dados

A escolha do *hardware* para a implementação do Servidor de Coleta de Dados implicou o estudo e definição de uma série de requisitos, os quais estão especificados na Tabela 7.

Tabela 7. Requisitos de *hardware* do Servidor de Coleta (REQ-H-SCD) de Dados

REQ-H-SCD	Requisitos Gerais	Descrição
1	Comunicação	Implementação de comunicação <i>ethernet</i> via protocolos Modbus RTU e Modbus TCP com os medidores.
2	Armazenamento	Disponibilidade de recursos de <i>hardware</i> para armazenamento de dados de pelo menos 16GB para guardar até um mês de medidas instantâneas para até 30 medidores.
3	Processamento	Pelo menos 1GHz de processamento com suporte a <i>multithreading</i> para coletas em paralelo.
4	Memória	Pelo menos 1 GB de memória RAM.
5	Periféricos	<i>ethernet</i> , SDCard.

Neste projeto, o *hardware* escolhido para a implementação dos Servidores de Coleta de Dados se baseia nos microcomputadores conhecidos como Raspberry Pi na versão 4b. A Figura 8 apresenta o modelo utilizado no SIGE. Esta placa possui um processador ARM de quatro núcleos rodando a 1.5 GHz e 2 GB de memória RAM atendendo a todos os requisitos e sendo ainda uma plataforma de baixo custo.

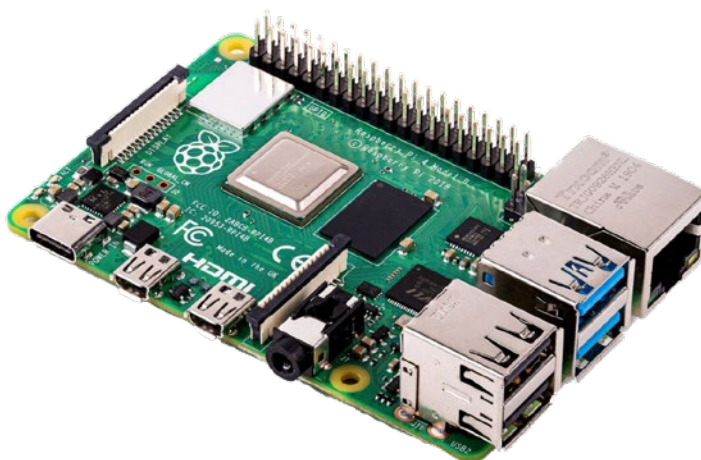


Figura 8. Raspberry Pi 4, Modelo B

3.8 Servidor Central

O Servidor Central tem o objetivo de agregar os dados de todos os medidores em um único local e servir de base para os diversos meios de apresentação das informações pelas camadas de interfaces gráficas, bem como viabilizar a execução de algoritmos de tratamento de dados. Os requisitos para esta camada do SIGE estão apresentados na Tabela 8 e detalhados na sequência. Para atender as estas características, o Servidor Central foi desenvolvido utilizando o *framework* Django REST ([django-rest-framework.org](https://www.djangoproject.com/)) em conjunto com um banco de dados PostgreSQL ([postgresql.org](https://www.postgresql.org/)).

Tabela 8. Requisitos de *software* do Servidor de Central (REQ-S-SC)

REQ-S-SC	Requisitos Gerais	Descrição
1	Cadastro	Manter cadastro dos Servidores de Coleta de Dados, medidores, campi e agrupamentos, usuários e seus respectivos perfis.
2	Comunicação e coleta de dados	Implementar comunicação TCP/IP via API REST com os Servidores de Coleta de Dados e a respectiva rotina periódica de coleta de dados e eventos dos Servidores de Coleta de Dados.
3	Eventos	Monitorar o estado dos Servidores de Coleta de Dados, gerando eventos de falha de comunicação com estes.
4	Sincronia de relógios	Manter sincronia com os relógios dos Servidores de Coleta de Dados.
5	Armazenamento	Armazenar todas as informações em um banco de dados central.
6	Disponibilização de API para o <i>front-end</i>	Fornecer todos os dados através de API REST para as camadas de interface gráfica.

O **sistema de cadastro** é estruturado por meio dos seguintes itens:

- **Campus:** nome e localização de cada campus da Universidade;
- **Servidores de Coleta de Dados:** registrando sua localização, o campus associado, seu endereço IP e porta de acesso;
- **Medidores:** medidores associados aos Servidores de Coleta de Dados;
- **Agrupamentos:** entidade genérica para criação de grupos de medidores e combinação de suas medições. Ex: prédios, faculdades etc.; e
- **Usuários:** usuários de cada um dos perfis que terão acesso ao sistema.

A **comunicação e coleta de dados** são realizadas com os Servidores de Coleta de Dados e ocorrem em dois momentos distintos. O primeiro a cada 1 minuto para verificar a ocorrência de novos eventos e registrar dados resumidos (tensão, corrente e potência) de cada medidor para apresentar em tempo real nas visualizações do *front-end*. A segunda etapa de coleta ocorre a cada hora e copia todos os dados armazenados nos Servidores de Coleta para o Servidor Central. Cada coleta é repetida até três vezes em caso de falha de comunicação. Em caso de falhas após estas tentativas de conexão com os Servidores de Coleta, a data do último dado coletado de cada medidor é utilizada como referência para poder acionar o processo de resgate de coleta histórico no próximo ciclo de coletas.

Os **eventos** são coletados a cada 1 minuto a partir dos Servidores de Coleta de Dados e, em seguida, enviados para as camadas de interface gráfica para notificações. Além dos eventos já descritos na seção anterior, há ainda nesta camada o registro do evento de falha de comunicação com os próprios Servidores de Coleta de Dados.

Conforme realizado na camada anterior, a **sincronia de relógios** entre o Servidor Central e os Servidores de Coleta de Dados é realizada aqui a cada comunicação. A necessidade de implementar esta sincronia se deu pelo fato de os Servidores de Coleta de Dados poderem ser implementados em dispositivos embarcados Raspberry Pi que não possuem relógios RTC internos que podem fazer com que estes colem dados com horário errado caso não sejam ligados e não tenham comunicação com a internet.

O **armazenamento dos dados** é feito de maneira similar à camada anterior em um banco de dados PostgreSQL. Este é o repositório central de todos os dados coletados e os cadastros mantidos nesta camada.

A disponibilização de API para o *front-end* é realizada no padrão REST para dar acessos às camadas de visualização *web* e *mobile*. São disponibilizados *endpoints* conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Lista de *endpoints* da API

Item	Detalhes	Modos de Acesso
Objetos do sistema	Campi (campi)	Criar, ler, editar e deletar
	Servidores de Coleta de Dados (<i>slave</i>)	Criar, ler (individual e lista), editar e deletar
	Medidores (<i>energy transducers</i>)	Criar, ler (individual e lista), editar e deletar
	Agrupamentos	Criar, ler (individual e lista), editar e deletar
	Usuários (<i>users</i>)	Criar, ler, editar e deletar
Medidas	Medidas instantâneas (a cada 1 minuto)	
	Medidas agregadas (a cada 15 minutos)	
	Medidas agregadas (a cada mês)	
	Medidas resumidas em tempo real	
Gráficos	Tensão trifásica instantânea	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Corrente trifásica instantânea	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Frequência	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Potência Ativa	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Potência Reativa	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Potência Aparente	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Fator de Potência	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	DHT de tensão	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	DHT de corrente	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Potência Ativa Total	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Potência Reativa Total	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Potência Aparente Total	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Fator de Potência Total	Lista de medidas por período a cada 1 minuto
	Energia Consumo Fora de Ponta	Lista de medidas agregadas a cada 15 minutos
	Energia Consumo em horário de Ponta	Lista de medidas agregadas a cada 15 minutos
	Energia Gerada Fora de Ponta	Lista de medidas agregadas a cada 15 minutos
	Energia Gerada em horário de Ponta	Lista de medidas agregadas a cada 15 minutos
Eventos	Eventos de tensão (tensão precária, tensão crítica, queda de fase)	Lista de eventos de tensão por medidor
	Falta de comunicação com medidores	Lista geral de ocorrências
	Falta de comunicação com Servidores de Coleta	Lista geral de ocorrências

Mais detalhes sobre os *endpoints* podem ser encontrados na documentação em: <https://gitlab.com/lappis-unb/projects/SMI/SMI-UnB/-/wikis/master/endpoints>.

Por fim, a Figura 9 e a Figura 10 mostram a interface gráfica básica de administração para a configuração inicial da topologia do sistema, em que são configurados os campi, Servidores de Coleta e Medidores.

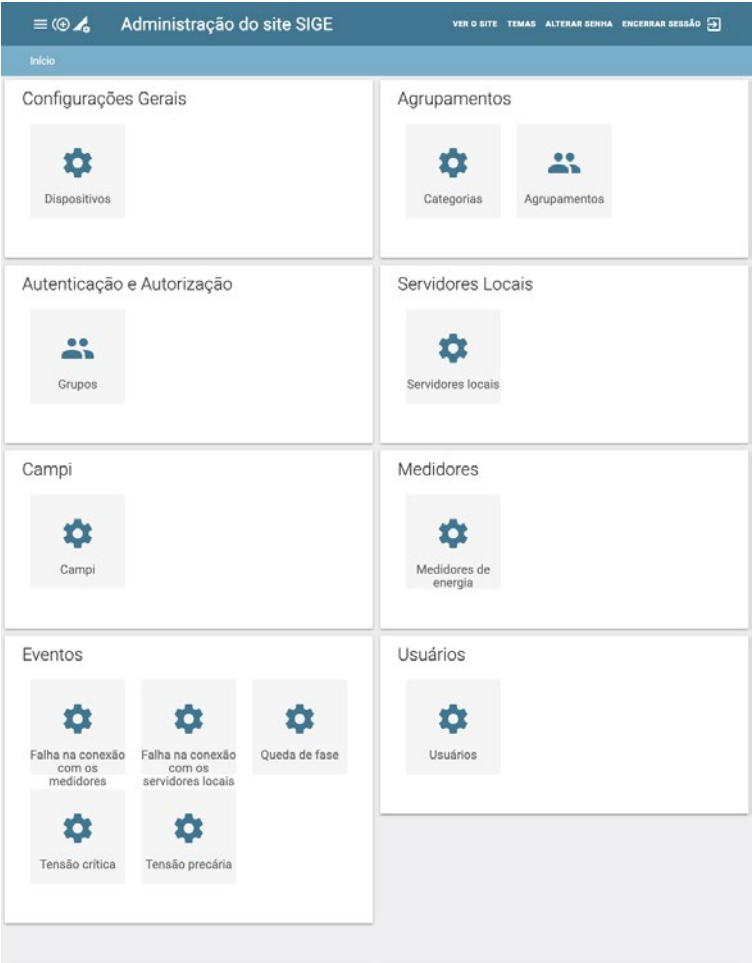


Figura 9. Interface de administração do Servidor Central

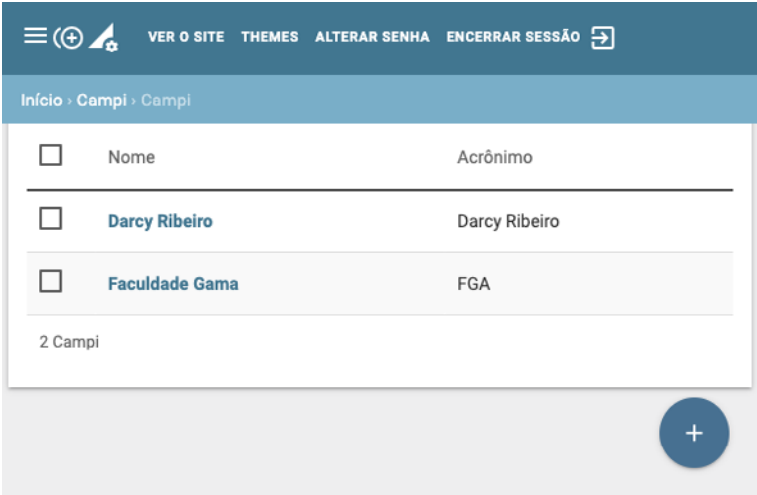


Figura 10. Exemplo de interface de administração para edição dos campi

3.9 Camada de Visualização (*front-end*)

A última camada do Sistema de Gestão de Energia é composta pelo *front-end* ou interface gráfica. Esta camada permite que os usuários visualizem as informações de medição, bem como os resultados de execução de algoritmos para tratamentos e análises de dados. Nesse contexto, vale destacar que a área de “Visualização da Informação” tem apresentado grande crescimento nos últimos anos, tendo em vista a necessidade de se transformar uma crescente e complexa massa de dados em representações visuais que facilitem a compreensão e inferência das informações. Exemplos de visualizações de informações são muito comuns principalmente na forma de gráficos de linhas, de barras ou pizza. Outras técnicas de visualizações de informações mais complexas foram desenvolvidas e têm sido empregadas em uma gama de aplicações práticas, tais como: no monitoramento de bolsas de valores, na consulta às bases de dados, e no desenho de diagramas como organogramas e árvores genealógicas.

Nesse projeto, o *front-end* tem o objetivo de viabilizar o acesso às informações coletadas bem como prover o acompanhamento em tempo real das edificações da UnB e subsidiar a tomada de decisão por gestores da instituição. Os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento conduziram ao desenvolvimento de dois subsistemas, os quais estão descritos a seguir:

- **Interface gráfica *web*:** responsável por apresentar aos usuários os dados das medições coletadas em formatos de gráficos, relatórios e painéis informativos para auxiliar a gestão do sistema de distribuição de energia da Universidade;
- **Interface gráfica *mobile*:** destinado aos usuários enquadrados na categoria “gestores”. Esta se configura como uma interface simplificada de gestão customizada para telefones celulares com informações resumidas e alertas para auxiliar na gestão do sistema.

3.9.1 Interface gráfica *web*

A camada de interface gráfica *web* é ainda subdividida em duas versões. A primeira é um *dashboard* específico para ser usado como painel de monitoramento do sistema em tempo real. A segunda versão é de propósito mais geral e provê acesso a gestores e pesquisadores para realização de análises de ocorrências ou avaliações de médio ou longo prazo, a partir dos diversos modos de visualização dos dados em gráficos e relatórios.

Dashboard

Iniciando pelo *dashboard*, este foi concebido em conjunto com os gestores do sistema de instalações elétricas e tem como objetivo oferecer uma visualização rápida e ampla de todos os campi. O *dashboard* aponta em um só painel as ocorrências mais importantes em ordem de prioridade e data, bem como um resumo das principais grandezas instantâneas que estão sendo medidas de modo dinâmico.

Uma versão estática da tela do *dashboard* pode ser visualizada na Figura 11. Porém é importante ressaltar que o grande valor desta versão está em sua dinamicidade e suas regras de apresentação que procuram priorizar a cada instante as informações mais relevantes para os gestores.

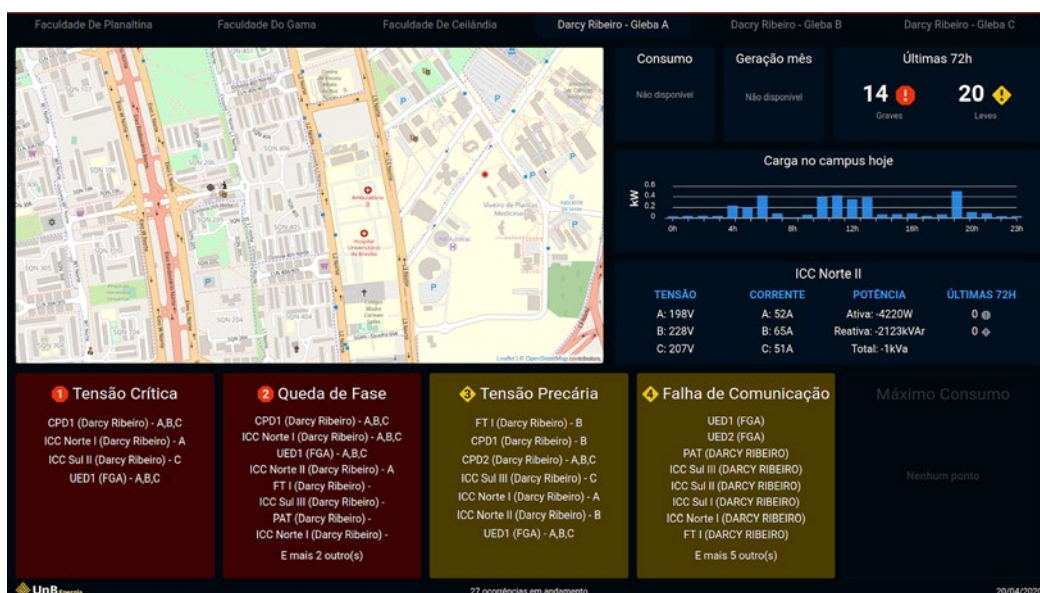


Figura 11. Dashboard de monitoramento

A organização das informações se baseia nas seguintes premissas:

- **Tela inicial:** a tela inicial apresenta um conjunto de informações que permitem visualizar o *status* momentâneo:
 - mapa do campus em destaque;
 - consumo agregado de todos os medidores do campus em destaque;
 - geração agregada de energia no último mês. Esta informação viabiliza a integração de dados de gerações fotovoltaicas existentes na Universidade de Brasília;
 - resumo numérico da quantidade de ocorrências “Graves” e “Leves” nas últimas 72 horas (este período foi definido como importante em conversa com os gestores por possibilitar o histórico de ocorrências, principalmente no início da semana após um final de semana sem monitoramento direto);
 - demanda da instalação, por hora, para o dia corrente. Esta informação é apresentada no formato de gráficos de barras;
 - dados de tensão, corrente e potência advindas da última leitura instantânea do Servidor de Coleta de Dados. No exemplo anterior, esta informação é apresentada para o medidor localizado na edificação “ICC Norte 2”. Todavia, deve-se destacar que este *card* é dinâmico e se atualiza para mostrar todos os medidores do campus; e
 - painel inferior: mostra cinco *cards* com os grupos a lista das ocorrências mais recentes por categoria de gravidade. No exemplo da Figura 11, apresentam-se as ocorrências relacionadas a níveis de tensão críticos, falta de fase, níveis de tensão precários e falha de comunicação do medidor.
- **Segmentação de setores (abas):** de forma a facilitar o monitoramento e o acesso a medidores específicos, as instalações foram segmentadas em seis áreas, a saber: Faculdade de Planaltina, Faculdade de Ceilândia, Faculdade do Gama, Darcy Ribeiro – Gleba A, Darcy Ribeiro – Gleba B e Darcy Ribeiro – Gleba C.

Interface web de propósito geral

Em seguida, apresenta-se a interface gráfica de propósito geral. Inicia-se pela tela de *login*, a qual está apresentada na Figura 12, sendo possível ver uma página com a breve apresentação do sistema juntamente com os campos para acesso dos usuários e a opção de cadastro.

UnB Energia Medidores

Entre com seus dados para acessar

Email

Senha

ENTRAR

Não possui uma conta? [Cadastre-se](#)

Sistema de monitoramento e gestão energética de edificações da Universidade de Brasília

Monitora, em tempo real, mais de 30 pontos da rede elétrica de UnB. Incluindo a produção de energia dos sistemas de geração fotovoltaica implantados na Universidade.

Fornece informações de consumo, nível de tensão, fator de potência, demanda, dentre outros.

Universidade de Brasília CEB DISTRIBUIÇÃO ANEEL FINATEC

Figura 12. Tela de login do sistema

Logo após o *login*, o usuário é encaminhado para a tela inicial (Figura 13) onde encontra as quatro categorias principais de acesso às informações do sistema, sendo elas o Custo Total, os Medidores, a Curva de Carga e os Relatórios. Além disso, pode ser observada a barra de *menu* rápido na lateral esquerda que provê acesso a estas quatro categorias, dentre outros *menus* em todos os locais do sistema para agilizar a navegação.



Figura 13. Tela inicial

A tela de Custo Total, representada na Figura 14, apresenta as opções para visualizar a representação do custo do consumo de energia agregado por campus ou agrupamento específico. A partir do *menu* de seleção no topo da área do gráfico, é possível selecionar:

- **Campus:** o campus a ser analisado;
- **Filtro:** definição do agrupamento de interesse. Ex: consumo geral do campus, um prédio específico, uma faculdade ou outro grupo que seja criado no sistema. Neste caso, um grupo/agrupamento representa a combinação de um ou mais medidores cujos dados são agregados;
- **Visão:** nível de agregação dos dados que podem ser acumulados e apresentados por dia, mês ou por ano; e
- **Período:** data de início e fim do período a ser visualizado.

No centro da tela, é apresentado o gráfico de barras com os custos de acordo com as opções selecionadas no *menu* de seleção.

É importante ressaltar a base de cálculo usada para chegar aos valores agregados:

$$\text{Custo por medidor} = \sum_{t=\text{data\_início}}^{\text{data\_final}} (EC_{\text{ponta}} \times \text{Tarifa}_{\text{ponta}}) + (EC_{\text{fora\_de\_ponta}} \times \text{Tarifa}_{\text{fora\_de\_ponta}}),$$

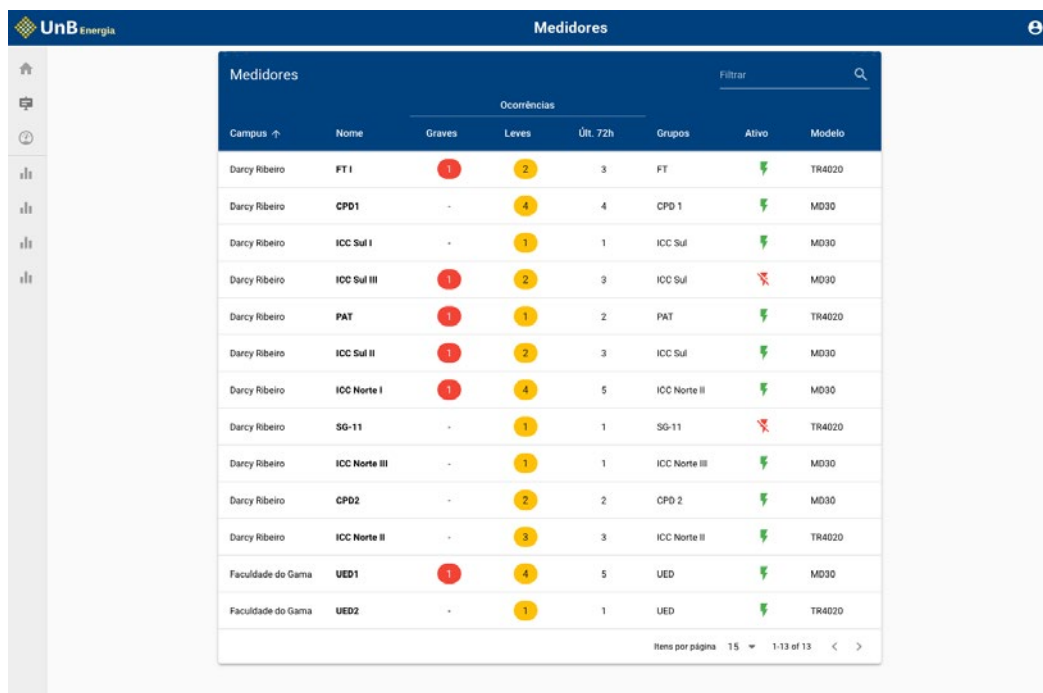
em que EC_{ponta} e $EC_{\text{fora\_de\_ponta}}$ são respectivamente a Energia Consumida em Horário de Ponta e Fora de Ponta em kWh agregadas pelo medidor a cada 15 minutos, $\text{Tarifa}_{\text{ponta}}$ e $\text{Tarifa}_{\text{fora\_de\_ponta}}$ são as tarifas aplicadas em Horário de Ponta e Fora de Ponta em unidades de R\$ / kWh relativas ao período em questão.



Figura 14. Tela de acesso ao Custo Total

A tela seguinte, apresentada na Figura 15, lista os medidores cadastrados e organizados por campus. Todas as colunas apresentadas podem ser ordenadas, bem como filtradas para facilitar o acesso rápido ao medidor a ser consultado. Neste nível de acesso, é possível clicar em qualquer um dos medidores para ter acesso à sua tela mais detalhada, como será mostrado a partir da Figura 16.

Nesta visão geral da tabela, são mostradas as colunas de ocorrências graves e leves com suas respectivas quantidades, um contador com o número total de ocorrências nas últimas 72 horas, o grupo ao qual o medidor pertence, bem como seu estado de funcionamento (ativo ou não) e seu modelo.



Campus ↑	Nome	Ocorrências			Grupos	Ativo	Modelo
		Graves	Leves	Últ. 72h			
Darcy Ribeiro	FT I	1	2	3	FT	Ativo	TR4020
Darcy Ribeiro	CPD1	-	4	4	CPD 1	Ativo	MD30
Darcy Ribeiro	ICC Sul I	-	1	1	ICC Sul	Ativo	MD30
Darcy Ribeiro	ICC Sul III	1	2	3	ICC Sul	Inativo	MD30
Darcy Ribeiro	PAT	1	1	2	PAT	Ativo	TR4020
Darcy Ribeiro	ICC Sul II	1	2	3	ICC Sul	Ativo	MD30
Darcy Ribeiro	ICC Norte I	1	4	5	ICC Norte II	Ativo	MD30
Darcy Ribeiro	SG-11	-	1	1	SG-11	Inativo	TR4020
Darcy Ribeiro	ICC Norte III	-	1	1	ICC Norte III	Ativo	MD30
Darcy Ribeiro	CPD2	-	2	2	CPD 2	Ativo	MD30
Darcy Ribeiro	ICC Norte II	-	3	3	ICC Norte II	Ativo	TR4020
Faculdade do Gama	UED1	1	4	5	UED	Ativo	MD30
Faculdade do Gama	UED2	-	1	1	UED	Ativo	TR4020

Items por página: 15 1-13 of 13 < >

Figura 15. Tela com a lista de medidores ordenados por campus

Ao clicar em qualquer um dos medidores na lista da tela apresentada na Figura 15, o usuário é redirecionado para a tela de detalhes do medidor apresentada na Figura 16. Nesta tela, é possível observar no topo esquerdo o valor das últimas medidas instantâneas coletadas a cada 1 minuto. Logo em seguida, é apresentado o estado atual da conexão com o medidor (no caso da figura se encontra “Ativo”) com um [link](#) para o mapa que mostra sua localização geográfica. A lateral direita da tela apresenta uma lista com todas as ocorrências mais recentes e que ainda estão em andamento (No caso da Figura 16 estão sendo listadas as últimas ocorrências de cada tipo a título de exemplo). Na parte inferior da tela, são mostrados os dados de cadastro do medidor com o número de série, modelo, os grupos ao qual pertence e o histórico de registros (manutenção).

A parte central da tela mostra o navegador de gráficos de todas as grandezas associadas ao medidor. Neste caso, é possível observar o [menu](#) seletor onde é possível selecionar a “Dimensão” desejada, ou seja, a grandeza elétrica a ser visualizada, o modo de “Visão” para o caso de dados agregados e o período de interesse para a apresentação do gráfico. O exemplo mostrado na Figura 16 mostra os dados de tensão das três fases associadas ao medidor do “CPD1” localizado no Campus Darcy Ribeiro, no período de 5 a 6/5/2020.

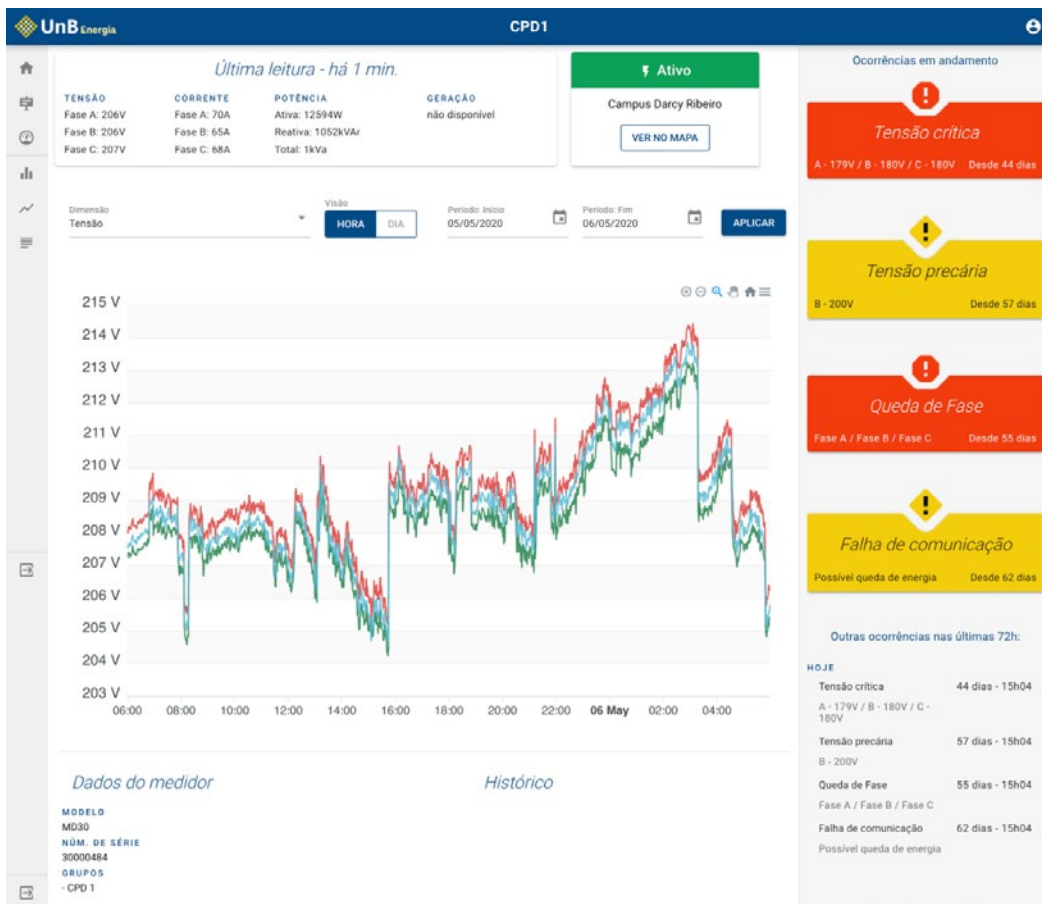


Figura 16. Tela de um medidor específico apresentando os detalhes com o gráfico de tensão

A seguir, são mostrados os detalhes da área de apresentação dos gráficos. A Figura 17 mostra o detalhe da área central da mesma tela anterior com foco na apresentação do gráfico da corrente trifásica do mesmo medidor. Neste caso, se destacou ainda o período de 9h00 as 17h00. Adicionalmente, a Figura 18 mostra três detalhes do gráfico: o seletor da grandeza elétrica a ser mostrada, identificado pelo campo “Dimensão”, no canto esquerdo superior; os valores pontuais no local onde o *mouse* se encontra acima da curva dos dados; e, no canto direito superior, a funcionalidade de exportação, em que é possível salvar a imagem atual do gráfico bem como exportar um arquivo CSV com os dados brutos dos gráficos para estudo posterior.

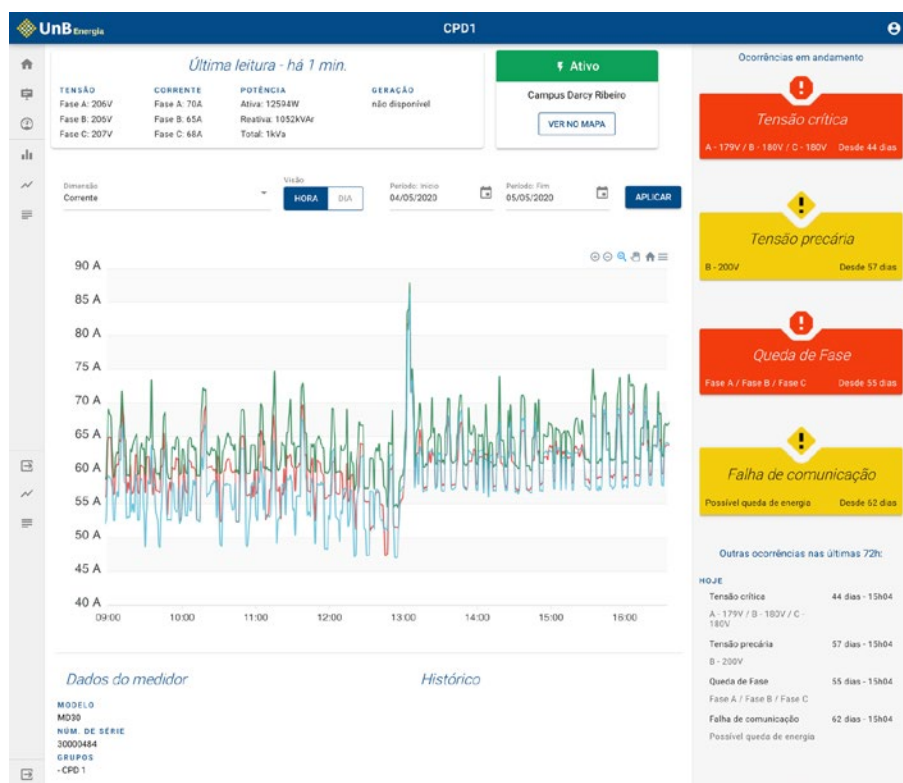


Figura 17. Tela de um medidor específico apresentando os detalhes com o gráfico de corrente



Figura 18. Gráfico de tensão mostrando o menu seletor das grandezas, os detalhes das grandezas com a posição do mouse e as opções de exportação de dados do gráfico

Um aspecto importante na apresentação dos gráficos foi a utilização de técnicas de filtragem. Isto foi necessário, principalmente para a apresentação dos dados instantâneos, para aumentar consideravelmente a performance do sistema e manter o perfil das curvas semelhantes ao original. Como exemplo, os dados de tensão amostrados a cada 1 minuto geram ao total de 1.440 amostras por fase, por dia. Para plotar o gráfico de tensão de um dia inteiro seria necessário plotar 4.320 pontos, e se expandirmos o período para uma semana seriam 30.240 pontos, o que tornaria o sistema bastante lento nas requisições ao servidor e na renderização das curvas.

Para resolver isto, algoritmos de *downsampling* foram pesquisados, e o que mais preservou os perfis das curvas foi o algoritmo *Largest-Triangle-Three-Buckets* (LTTB) (STEINARSSON, 2013). Neste caso, estudos práticos foram conduzidos visando a um melhor tempo de resposta, e o número de pontos a serem plotados por fase para cada gráfico ficou limitado em 600 no gráfico. É importante ressaltar que os dados exportados em formato CSV não são filtrados para que os pesquisadores possam trabalhar com a fonte original coletada.

A seguir, apresentamos na Figura 19 a tela onde é possível obter as curvas de carga. De modo semelhante à tela de Custo Total, o filtro no topo da página permite selecionar o campus para o qual se deseja visualizar os dados. Além disso, dentro de cada campus ainda é possível filtrar a seleção pelos grupos (prédio, faculdade etc). É possível ainda selecionar a granularidade de agregação (dia, mês, ano) e as datas de início e fim do período a ser visualizado.

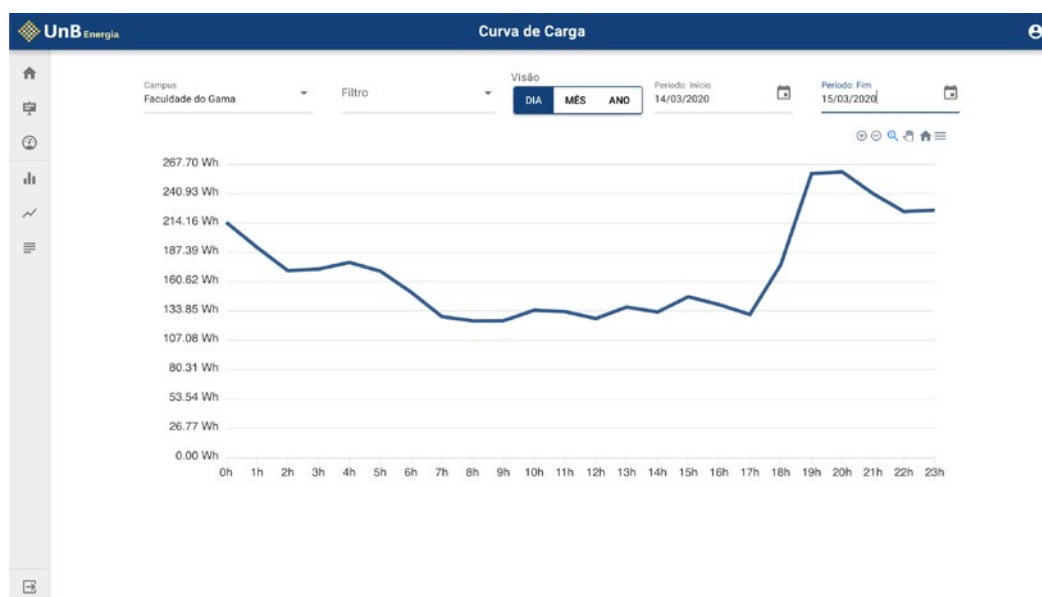
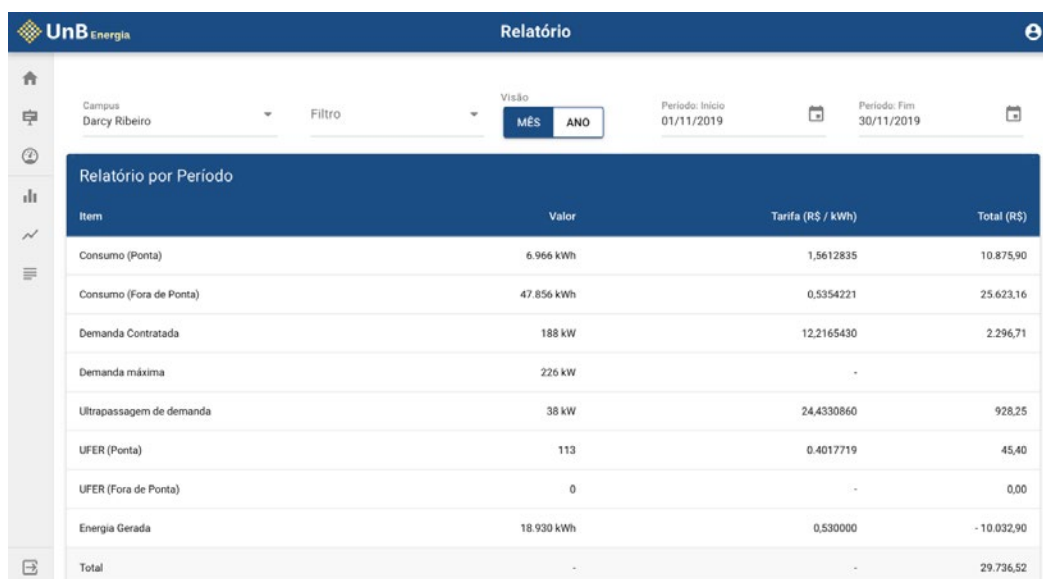


Figura 19. Tela da Curva de Carga

A última tela a ser explorada é a visualização de relatórios de consumo, apresentada na Figura 20. O mesmo filtro da tela de Curva de Carga se aplica aqui, permitindo selecionar o campus, grupos e o período em questão (mês ou ano). O relatório gera um resumo com os dados de Consumo, Demanda, Geração, dentre outras variáveis e utiliza as taxas definidas no contrato com a companhia de energia para calcular os custos associados a cada grandeza.



The screenshot shows the 'UnB Energia' web interface. At the top, there's a header with the logo and the word 'Relatório'. Below the header, there are filters for 'Campus' (set to 'Darcy Ribeiro'), 'Filtro', and 'Visão' (with buttons for 'MÊS' and 'ANO'). There are also date pickers for 'Período: Início' (01/11/2019) and 'Período: Fim' (30/11/2019). The main content area is titled 'Relatório por Período' and contains a table with the following data:

Item	Valor	Tarifa (R\$ / kWh)	Total (R\$)
Consumo (Ponta)	6.966 kWh	1,5612835	10.875,90
Consumo (Fora de Ponta)	47.856 kWh	0,5354221	25.623,16
Demanda Contratada	188 kW	12,2165430	2.296,71
Demanda máxima	226 kW	-	-
Ultrapassagem de demanda	38 kW	24,4330860	928,25
UFER (Ponta)	113	0,4017719	45,40
UFER (Fora de Ponta)	0	-	0,00
Energia Gerada	18.930 kWh	0,530000	- 10.032,90
Total	-	-	29.736,52

Figura 20. Tela dos Relatórios

3.9.2 Interface gráfica mobile

A interface gráfica *mobile* foi concebida e direcionada aos usuários gestores do sistema de monitoramento energético. Este sistema tende a apresentar um resumo das informações encontradas no *dashboard web*, de forma a facilitar o acompanhamento de ocorrências e a verificação das medições em uma determinada edificação. Ressalta-se que esta aplicação incluiu o desenvolvimento de um sistema de notificação e alarmes, de modo que os gestores de equipes de operação e manutenção de instalações da instituição possam receber informações das ocorrências em tempo real. Conforme informado anteriormente, esta ação implica um grande avanço na gestão energética da instituição, uma vez que permite a observabilidade da rede interna de instituições públicas de ensino do Brasil e uma maior agilidade na realização de ações corretivas para reduzir a frequência e duração de interrupções de energia.

A estrutura do aplicativo é organizada em três abas principais (Ocorrências, Medidores e Configurações). A primeira aba é detalhada na Figura 21 (a) e (b), em que se observam exemplos de *ocorrências graves* (Tensão Crítica e Queda de Fase) e *ocorrências leves* (Falha de Comunicação e Tensão Precária). Além destas ocorrências em andamento, no topo direito da mesma tela é possível acessar o histórico das ocorrências das últimas 72 horas, de acordo com a Figura 21 (c).

A aba Medidores (Figura 21 (d)) mostra a lista geral de todos os medidores cadastrados no sistema e pode ser filtrada por campus. Além da descrição do medidor, à direita do nome são apresentados os símbolos de ocorrências graves e leves para cada medidor que tenha alguma ocorrência em andamento. Ao clicar em um medidor da lista, o usuário é encaminhado para a página de detalhes do medidor apresentada na Figura 21 (e), na qual são apresentadas as medidas instantâneas resumidas, um mapa com a localização do medidor e a lista de últimas ocorrências.

Finalmente, a Figura 21 (f) apresenta a tela de configurações onde é possível habilitar ou desabilitar as notificações que são enviadas para o celular a cada nova ocorrência.

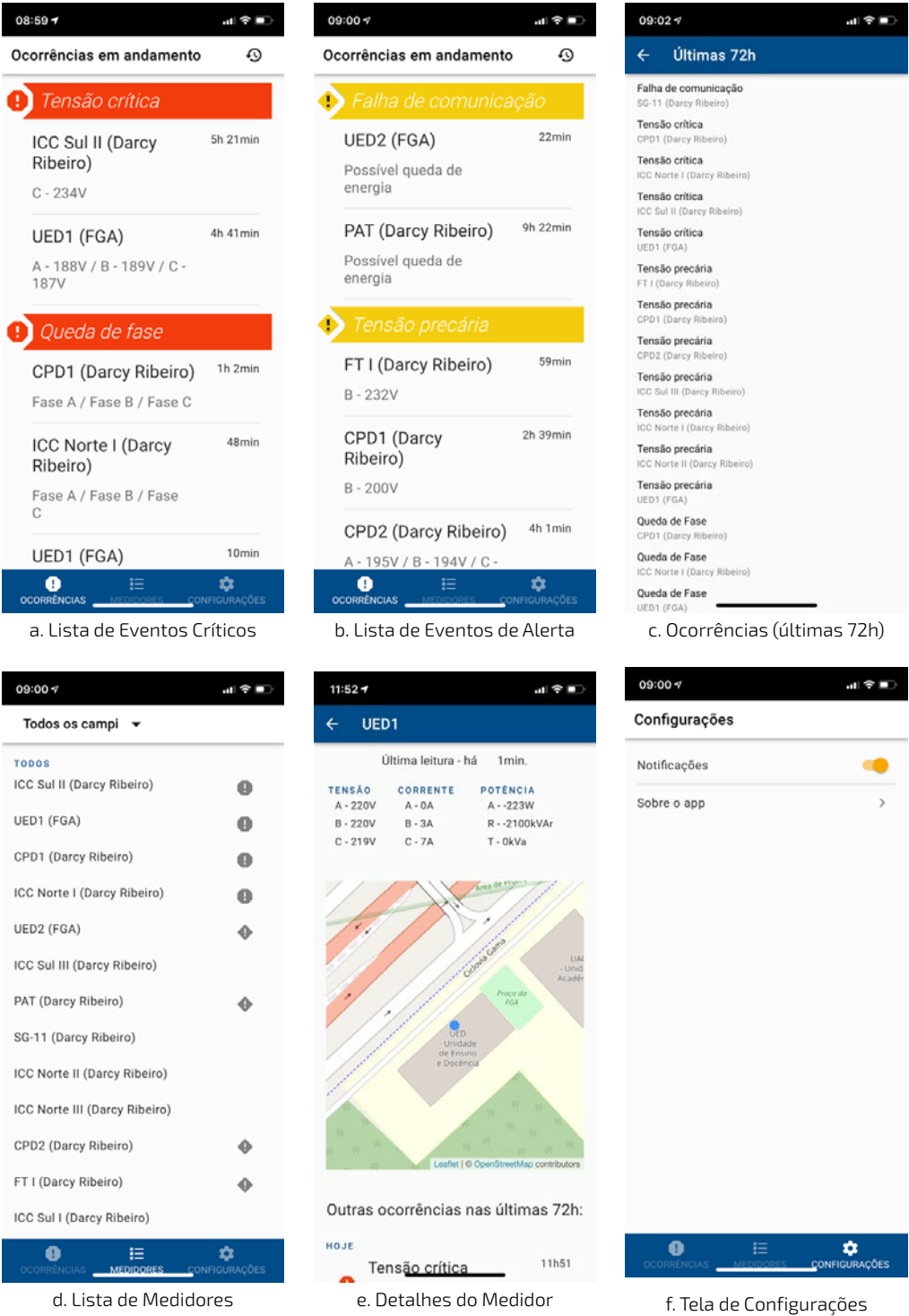


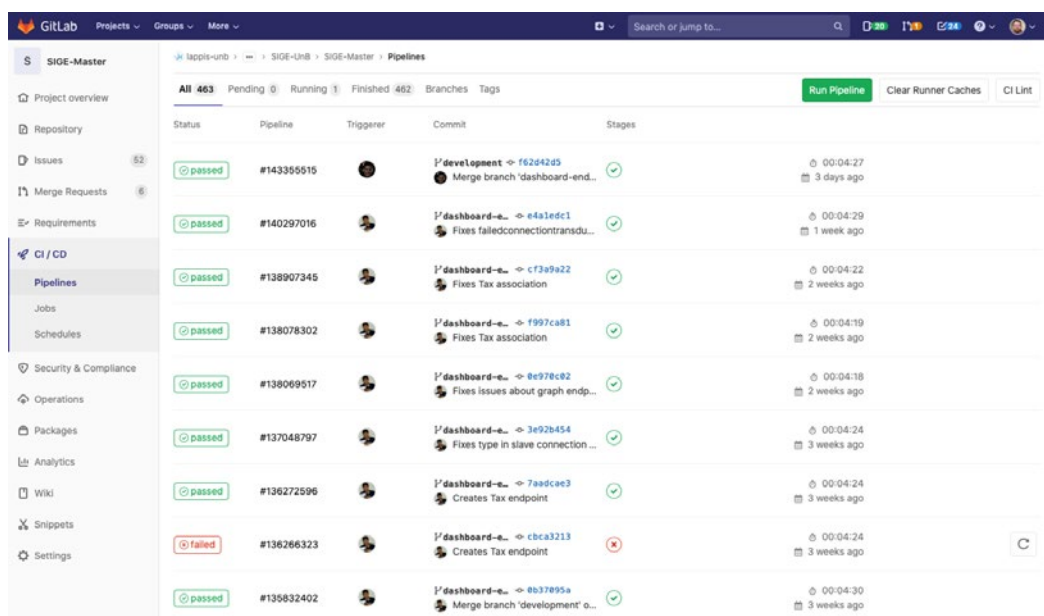
Figura 21. Telas do aplicativo mobile

Conforme descrito anteriormente, o aplicativo *mobile* foi desenvolvido utilizando os *frameworks* Vue.js (vuejs.org) e Quasar (quasar.dev). Além disso, o aplicativo foi concebido em formato Progressive Web App (PWA), o que lhe permite funcionar simultaneamente nas plataformas Android e iOS, podendo ainda ser instalado diretamente pelo *link*.

3.10 Tecnologias Utilizadas no Desenvolvimento do Centro de Monitoramento

Conforme descrito no início do capítulo, no desenvolvimento do sistema foram adotadas várias técnicas avançadas de Engenharia de *Software* como testes automatizados, Integração Contínua e *Deploy* Contínuo (CI/CD), Automação de Configuração de Ambiente e Isolamento de Ambiente.

Os **testes automatizados** seguiram os padrões dos *frameworks* usados (Django e Vue.js/Quasar) e foram integrados com o *pipeline* de CI/CD em cada um dos respectivos repositórios. Cada um destes *pipelines* foi configurado para fazer a *build* do *software*, executar os testes e ferramentas que verificam a qualidade do código. Além disso, os *pipelines* foram configurados para serem executados automaticamente a cada envio de novas submissões de versões atualizadas de código (*commits*) para o repositório remoto no Gitlab. Um exemplo da lista de *commits* com os respectivos resultados de cada *pipeline* pode ser visto na Figura 22.



Status	Pipeline	Triggerer	Commit	Stages
passed	#143355515	👤	!development → f62642d5 Merge branch 'dashboard-end...	00:04:27 3 days ago
passed	#140297016	👤	!dashboard-e... → e4a1edc1 Fixes failedconnectiontransdu...	00:04:29 1 week ago
passed	#138907345	👤	!dashboard-e... → cf3a9a22 Fixes Tax association	00:04:22 2 weeks ago
passed	#138078302	👤	!dashboard-e... → f997ca81 Fixes Tax association	00:04:19 2 weeks ago
passed	#138069517	👤	!dashboard-e... → 8e978c02 Fixes issues about graph endp...	00:04:18 2 weeks ago
passed	#137048797	👤	!dashboard-e... → 3e92b454 Fixes type in slave connection...	00:04:24 3 weeks ago
passed	#136272596	👤	!dashboard-e... → 7a0dcae3 Creates Tax endpoint	00:04:24 3 weeks ago
failed	#136266323	👤	!dashboard-e... → cbca3213 Creates Tax endpoint	00:04:24 3 weeks ago
passed	#135832402	👤	!dashboard-e... → 8b37895a Merge branch 'development' o...	00:04:30 3 weeks ago

Figura 22. Pipeline de CI/CD do Servidor Central

Para a **Automação de Configuração de Ambiente e Isolamento de Ambiente**, utilizou-se a ferramenta *Docker* (docker.com) onde foram criados *containers* a cada um dos serviços individualmente. Para cada uma das camadas do sistema, utilizou-se ainda a ferramenta *docker-compose* para a integração de cada um dos *containers* pertencentes ao mesmo contexto.

A adoção de todas estas práticas facilitou o trabalho em equipe e favoreceu a inclusão de novos colaboradores ao projeto ao longo de seu desenvolvimento.

4. INDICADORES DE DESEMPENHO DAS EDIFICAÇÕES

Além de monitoramento das instalações, se faz necessário o uso de indicadores de eficiência energética para que se possa ter o conhecimento da real eficiência da instalação. Os indicadores energéticos segundo FERREIRA, J., et FERREIRA, T., (1994), podem ser definidos como macroindicadores (quando caracterizam a eficiência de um país ou região) e microindicadores (quando caracterizam a eficiência de uma empresa, edifício ou habitação). Esses indicadores podem ser divididos em duas categorias em função dos seus objetivos:

- indicadores descritivos: quando caracterizam a situação de eficiência energética sem procurar justificativa para as causas ou desvios; e
- indicadores explicativos: quando explicam as razões pelas quais se deram variações ou desvios nos indicadores descritivos, ou seja, ajudam a identificar a contribuição dos vários efeitos, sejam eles tecnológicos, estruturais ou de comportamento nas variações da eficiência energética.

Os indicadores descritivos e explicativos podem ser estabelecidos tendo em consideração dois critérios básicos:

- critério econômico: quando a eficiência energética é medida em um nível elevado de agregação, não sendo possível caracterizar a atividade com indicadores técnicos ou físicos; e
- critério técnico-econômico: utilizado quando a eficiência é medida em um nível desagregado, ou seja, subsetor, ramo de atividade ou utilização final, relacionando o consumo de energia com um indicador de atividade medido em unidades físicas como: toneladas de aço, número de ocupantes etc.

Para a instrumentação do Sistema de Gestão Energética, foram definidas primeiramente edificações como apresentado na Figura 5, em que são consideradas atividades diversas da Universidade, podendo, assim, estabelecer perfil de consumo de diferentes instalações. À luz dos fatos, serão utilizados indicadores considerando os critérios técnicos-econômicos. Sendo assim, os indicadores selecionados e aplicados considerando as atividades desenvolvidas, tais como ensino, pesquisa, extensão e administrativo, assim como a diversidade de cursos e perfil de usuário existentes, são apresentados na sequência:

Os indicadores de desempenho aplicados às edificações, conforme Morales, C. (2007), são:

- Consumo Médio Mensal por m².

Indicador expresso pela razão entre o consumo médio mensal pela área construída em m², e é dado por:

$$CMM = \frac{\text{Energia Medida Mensal (kWh)}}{\text{Área Construída (m}^2\text{)}}$$

Com este indicador, podem-se efetuar comparações entre as diversas unidades de utilização semelhante e verificar o melhor valor de consumo por m².

- Consumo Médio Mensal por Funcionários

Indicador expresso pela razão entre o consumo médio mensal pelo número de funcionários, e é dado por:

$$CMF = \frac{\text{Energia Medida Mensal (kWh)}}{\text{Número de Funcionários}}$$

Este indicador é importante para estabelecer relações entre as unidades, a fim de efetuar a caracterização peculiar dos perfis de consumo destas.

- Consumo Médio Mensal por Alunos

Indicador expresso pela razão entre o consumo médio mensal pelo número de alunos, e é dado por:

$$CMA = \frac{\text{Energia Medida Mensal (kWh)}}{\text{Número de Alunos}}$$

Do mesmo modo que o CMF, este indicador pretende estabelecer relações entre as unidades, a fim de efetuar a caracterização dos perfis de consumo destas.

As mesmas considerações realizadas para definir os indicadores de consumo são aplicadas para os indicadores de Demanda, sendo assim considerada as Demandas Máximas Mensais por m², por número de funcionários e por número de alunos. É importante ressaltar que esses indicadores foram adotados para que se pudesse conhecer o perfil de consumo das instalações, levando-se em consideração as atividades desenvolvidas e as particularidades de cada instalação.

Esses indicadores posteriormente serão confrontados, levando-se em consideração as atividades desenvolvidas, assim como as áreas de conhecimento.

- Demanda Máxima Mensal por m²

$$DMM = \frac{\text{Demanda Máxima Mensal (kW)}}{\text{Área Construída (m}^2\text{)}}$$

- Demanda Máxima Mensal por Funcionários

$$DMF = \frac{\text{Demanda Máxima Mensal (kW)}}{\text{Número de Funcionários}}$$

- Demanda Máxima Mensal por Alunos

$$DMA = \frac{\text{Demanda Máxima Mensal (kW)}}{\text{Número de Alunos}}$$

5. MÓDULO PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE CARGA

Além dos aspectos anteriores, o Sistema de Gestão Energética da UnB contempla a implementação de metodologias para definição das Curvas de Carga. Esta funcionalidade permite a representação gráfica da demanda de um sistema ou edificação ao longo de um determinado período, sendo usualmente definida para um dia. Estas ferramentas são úteis por permitirem às empresas do setor elétrico ou aos sistemas de gerenciamento energético a representação dos padrões de consumo de edificações residenciais, comerciais ou industriais, subsidiando a definição de estratégias de planejamento.

Nesse contexto, deve-se destacar que uma série de fatores influenciam o comportamento diário de uma edificação e, por consequência, podem afetar a definição de um perfil de carga. Dentre os principais, pode-se citar: o dia da semana, a estação do ano, a ocorrência ou não de feriados e outras ocasiões esporádicas, tais como eventos esportivos, acontecimentos políticos, acidentes etc. Em Francisquini (2006), pode-se observar como o perfil de carga de uma determinada unidade consumidora varia conforme o dia da semana. Portanto, é de grande utilidade que os dados resultantes sejam facilmente manipuláveis, de modo a permitir a utilização daqueles cujos fatores característicos sejam mais similares aos previstos no dia a ser analisado.

A Universidade de Brasília, objeto de estudo deste trabalho, possui características específicas que a diferenciam dos perfis clássicos de consumo. A presença de laboratórios, com equipamentos de alto consumo e intervalos específicos de funcionamento, a realização de aulas nos períodos matutino, vespertino e noturno, o número elevado de computadores e equipamentos de ar-condicionado e a diferenciação entre períodos letivos e férias são apenas alguns dos fatores que segregam o comportamento da UnB como unidade consumidora em relação aos demais integrantes do sistema. Tendo em vista esse comportamento, é de importância que o gerenciamento energético da UnB tenha como subsídio os perfis típicos de consumo das edificações.

5.1 Fundamentação Teórica

Para a obtenção de perfis de consumo, diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos anos, sejam eles baseados em estatística descritiva ou em aprendizado de máquina. Nesta última categoria, têm-se os processos supervisionados em que os padrões, ou "rótulos", são previamente definidos, e o algoritmo tem a função de determinar a melhor correspondência para os valores de entrada. Ou seja, o algoritmo é treinado para reconhecer os padrões e identificar quando os dados de entrada se assemelham a eles. Por sua vez, os processos não supervisionados são aqueles em que os resultados esperados, ou padrões de saída, não são conhecidos. Nesta categoria, o algoritmo tem como responsabilidade identificar os rótulos mais adequados, de acordo com sua entrada. Em suma, os processos não supervisionados tomam uma das variáveis como dado de entrada e tentam identificar padrões, enquanto os processos supervisionados tomam ambas as variáveis e mapeiam a função que as relacionam.

Nesse contexto, McLoughlin, Duffy e Colon (2015) oferecem uma explicação para as vantagens da adoção dos métodos em aprendizado de máquina, em detrimento dos métodos estatísticos convencionais. Segundo estes autores, a aplicação dos métodos estatísticos para detecção de padrões – sendo o caso abordado no estudo em questão a construção de perfis de carga residenciais – esbarra na perda de informações consideradas importantes, como a relação temporal entre os valores, quando da análise de um conjunto consideravelmente grande de dados. Tal problema pode ser evitado agrupando os dados a partir de algoritmos de inteligência artificial, preservando a integridade dos valores obtidos pelos medidores e facilitando a alternância entre os diversos tipos de padrão a serem estudados.

Em análise semelhante, Francisquini (2006) realiza um levantamento das metodologias para a construção de curvas de carga em unidades de consumo e em transformadores de distribuição. O referencial bibliográfico levantado pelo autor abrange uma série de estudos, os quais fazem uso de métodos puramente estatísticos ou de redes neurais não supervisionadas e processos de clusterização. Dentre os principais trabalhos resumidos pelo autor, são relevantes neste contexto as observações realizadas por Srinivasan, Liew e Chang (1994) e Senjyu, Higa e Uezato (1998).

Srinivasan, Liew e Chang (1994) apontam para o fato de que a utilização de algoritmos não supervisionados possui a vantagem de facilitar a atualização frequente dos dados, conforme novas medições são realizadas. Em comparação, as metodologias estatísticas de cálculo normalmente fazem uso de dados aferidos anteriormente ao cálculo, podendo estes estarem defasados ou não representarem a realidade para uma determinada situação específica não abrangida pela base de dados.

Senjyu, Higa e Uezato (1998), por sua vez, ressaltam a vantagem da utilização de algoritmos de inteligência artificial, como a clusterização, por meio da ótica da previsibilidade dos dados. A utilização desses algoritmos facilita a criação de modelos preditivos de perfis de carga para o dia seguinte, dadas as condições determinadas.

Ponderadas as observações realizadas no referencial citado, optou-se por focar, na sequência, na apresentação de métodos baseados em aprendizado de máquina. Na busca pela compreensão dos diferentes métodos e pelo algoritmo mais adequado para o problema de construção das curvas de carga para a UnB, métodos não supervisionados, como os algoritmos de clusterização, e métodos supervisionados, como os algoritmos de máquina de vetores de suporte (SVM - *Support Vector Machine*), foram considerados.

5.1.1 Clusterização

O processo de clusterização consiste da “divisão de um conjunto de dados em grupos de objetos similares” (ABBAS, 2008). Assim, pode-se entender a clusterização como um processo de quantização de vetores com objetivo de identificar padrões similares, quando provido de um conjunto de dados, e catalogar esses dados de modo a prover significado a eles, facilitando sua interpretação e utilização para outros fins. Os principais métodos de clusterização tendem a se encaixar dentre os não supervisionados. Na sequência, é apresentada uma breve explanação de quatro métodos: k-médias, clusterização hierárquica espacial, mapas auto-organizáveis de Kohonen (SOM) e maximização de expectativas.

5.1.2 k-médias

O método k-médias é um algoritmo de clusterização baseado no princípio de agrupamento de dados a partir de valores iniciais arbitrários. Foi introduzido inicialmente nos anos 70 e é uma das técnicas de clusterização mais difundidas atualmente, devido à sua simplicidade matemática, fácil implementação e flexibilidade (SANGALLI *et al.*, 2010).

O algoritmo k-médias consiste na classificação de um conjunto de dados em k grupos (*clusters*) que dividem o conjunto. A afiliação de cada ponto ao seu respectivo grupo é determinada pela distância entre o centro do *cluster* e o ponto, a qual deve ser mínima (ABBAS, 2008). O processo de determinação dos pontos pertencentes a cada grupo é iterativo, se repetindo até que o critério de parada preestabelecido seja alcançado. Usualmente, o critério de parada do algoritmo k-médias é alcançado quando nenhum ponto muda de *cluster*.

A implementação do algoritmo k-médias parte, inicialmente, da determinação do número de *clusters*, definido pela variável k . O valor de k é um parâmetro de entrada do algoritmo, sendo definido pelo usuário. A determinação do parâmetro k é uma das maiores dificuldades em algumas aplicações desse algoritmo, uma vez que, em certas ocasiões, não se possui nenhum conhecimento prévio sobre o número de conjuntos de dados que devem ser definidos como similares. Uma outra dificuldade na aplicação dessa técnica advém da determinação dos centroides iniciais. Um mau posicionamento dos centroides pode acarretar resultados insatisfatórios. A necessidade de conhecimento das tendências decorrentes do conjunto de dados apresentado ao programa, de modo a determinar um conjunto de centroides iniciais não prejudiciais ao tratamento estatístico, torna o algoritmo de difícil execução, quando da análise de um conjunto de dados suficientemente grande (SHAMEEM; FERDOUS, 2009).

5.1.3 Clusterização hierárquica espacial

O algoritmo k-médias descrito anteriormente se caracteriza por um método de clusterização por particionamento. Tais métodos exigem a determinação de um número de *clusters* k previamente à segregação dos dados. Em contraste, a clusterização hierárquica não exige a determinação do número de *clusters*, trabalhando com a agregação ou divisão de grupos, conforme a distância entre seus pontos (ABBAS, 2008).

A clusterização hierárquica parte, inicialmente, da definição de uma “função-custo”. Essa função representa a distância entre dois *clusters*, podendo ser estabelecida de diversas maneiras: pode-se utilizar a distância entre o centro de dois diferentes grupos, a maior ou menor distância entre dois pontos de cada grupo, ou qualquer outra medida representativa de sua separação.

Em um primeiro momento, a clusterização hierárquica trata cada dado de entrada como um *cluster*. A partir de então, utiliza-se a função-custo para determinar qual agregação entre dois *clusters* proporciona uma otimização, ou seja, a função-custo proporciona a fusão de dois grupos. O algoritmo segue, então, este procedimento, até que todos os pontos estejam incluídos em um só *cluster*. Ao final de execução desse procedimento, cada *cluster* pode ser representado através da medida estatística considerada mais apropriada para a aplicação, seja ela a média dos pontos, mediana ou qualquer outra escolhida previamente.

5.1.4 Mapas auto-organizáveis de Kohonen

O mapa auto-organizável de Kohonen, conhecido por seu acrônimo SOM (Self-Organizing Maps), é algoritmo baseado em redes neurais que faz uso do aprendizado de máquina não supervisionado. Os algoritmos SOM fazem uso do princípio de competição entre neurônios em seu treinamento, de modo a encontrar o padrão mais próximo dos dados de entrada e atualizar os valores de suas componentes (ALVES, 2011).

5.1.5 Maximização de expectativas

Abbas (2008) define o processo do algoritmo de maximização de expectativas em duas etapas: na etapa inicial, conhecida como expectativa, o programa assume que o *dataset* pode ser modelado por meio de uma combinação linear de múltiplas distribuições normais, e define uma variável que indica a qualidade dessas distribuições em classificar dados semelhantes no mesmo grupo, conhecida como verossimilhança logarítmica (*log-likelihood*). Na segunda etapa, intitulada maximização, o algoritmo ajusta os parâmetros da distribuição, de modo a maximizar o valor da função de verossimilhança logarítmica.

Nesse sentido, o algoritmo de maximização de expectativas infere valores iniciais para a distribuição de probabilidades de um determinado ponto estar classificado em cada *cluster*, e atribui tal ponto ao *cluster* cuja probabilidade seja maior. Feito isso, a qualidade da distribuição aplicada é avaliada através das distâncias, considerando alguma medida estatística como referência (como o desvio padrão ou a variância dos pontos de cada *cluster*), e os parâmetros da distribuição de probabilidade são rearranjados de modo a minimizar essa medida ou maximizar a verossimilhança logarítmica.

5.1.6 Aplicabilidade dos algoritmos de clusterização

Abbas (2008) apresenta uma comparação dos quatro algoritmos de clusterização aqui explicados, avaliando sua performance quando da alteração de diferentes fatores e subsidiando a determinação das vantagens da aplicação de cada tipo de algoritmo. Os critérios avaliados nesta referência são:

- tamanho do *dataset*;
- número de *clusters*;
- tipo de *dataset*; e
- tipo de *software* utilizado para implementação dos algoritmos.

Variando esses parâmetros, Abbas (2008) atingiu uma série de conclusões sobre o comportamento dos quatro métodos de clusterização analisados, dentre as quais podem-se destacar:

- os métodos k-médias e maximização de expectativas possuem melhores desempenhos ao se tratar *datasets* grandes, enquanto os algoritmos de clusterização hierárquica e SOM são usualmente melhores para *datasets* pequenos;
- os algoritmos de clusterização hierárquica e SOM apresentam melhores resultados quando trabalhando com dados aleatórios, enquanto k-médias e maximização de expectativas funcionam melhor com dados ideais; e
- os algoritmos k-médias e maximização de expectativas são muito sensíveis a ruídos e anomalias no conjunto de dados, tendo sua performance altamente comprometida pela ausência de um tratamento de dados qualificado na fase prévia à implementação. Já o método SOM é o mais resiliente a anomalias e ruídos.

5.1.7 Support Vector Machine

O modelo de aprendizado conhecido como *Support Vector Machine* (SVM) se caracteriza como um algoritmo que usa vetores de suporte para a classificação ou regressão de dados. A primeira versão do algoritmo SVM foi elaborada por Vapnik e Lerner, em 1963. A publicação mais completa do seu modelo de funcionamento, incluindo o uso de kernels, se encontra em Cortes e Vapnik (1995).

Quando da aplicação do algoritmo para problemas de classificação, este busca, inicialmente, rotular os dados de entrada em duas classes, conforme exemplificado na Figura 23(a). Na sequência, procede-se à criação de um plano que separe os dados da melhor maneira possível, de modo que, quando da apresentação de novos dados não rotulados ao algoritmo, este seja capaz de indicar a qual classe tal dado deve pertencer, apenas observando em que lado do plano se encontra. Como pode-se observar na Figura 23(b), podem existir diversos planos capazes de separar os dados de maneira adequada, conforme o padrão de entrada. A problemática está em como otimizar esse plano de separação.

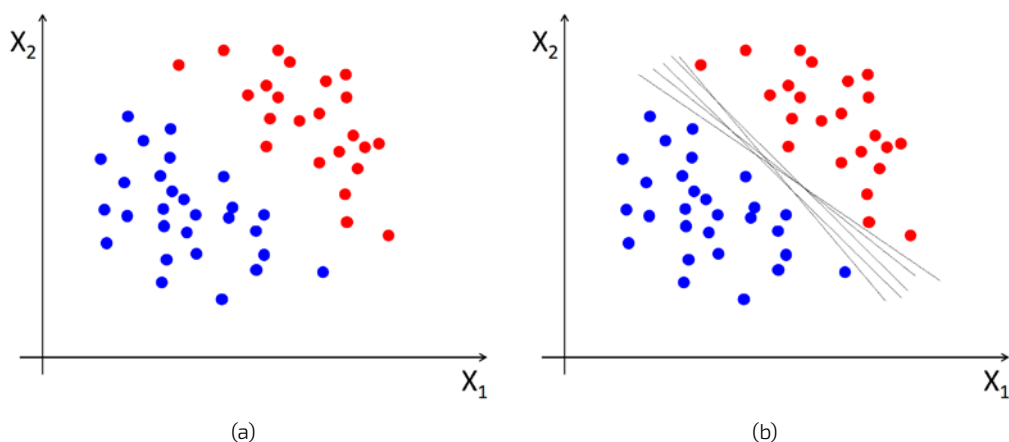


Figura 23. Algoritmo SVM – (a) Dados de entrada; (b) Plano de separação de dados (Filgueiras, 2014)

O plano de separação entre as classes pode ser escrito através da equação $f(x)=w \cdot x + b$, em que w é um vetor de pesos.

O próximo passo da solução do problema via o algoritmo de classificação SVM implica a definição de duas novas variáveis, conforme evidenciado na Figura 23:

- a “margem” representa a distância entre o plano de separação e os pontos da amostra que se encontram mais próximos; e
- os “vetores de suporte” representam os pontos que estão sobre a margem.

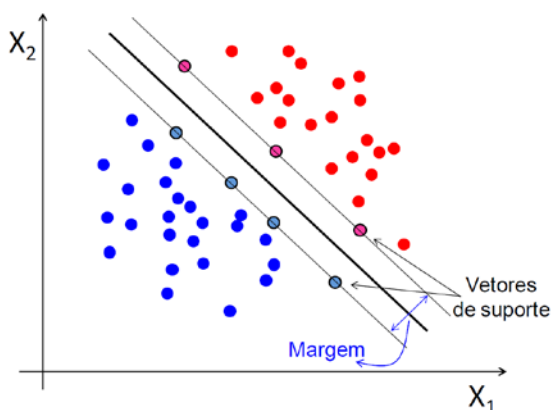


Figura 24. Algoritmo SVM – Otimização do plano de separação dos dados. Fonte: Filgueiras (2014)

Nesse contexto, o objetivo da SVM é definir o plano que garanta a maior separação entre as amostras limitantes, ou vetores de suportes: ou seja, a maior margem. A solução da SVM, então, pode ser apresentada com base nas seguintes equações:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar: } \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ &\text{sujeito a: } \begin{cases} w \cdot x + b \geq +1 \quad \forall y \in \{+1\} \\ w \cdot x + b \leq -1 \quad \forall y \in \{-1\} \end{cases} \end{aligned}$$

A SVM leva em consideração somente a separação correta dos vetores de suporte, partindo da inferência de que, uma vez separados os vetores mais próximos, os demais estarão também separados corretamente. Entretanto, ao trabalhar com *datasets* reais, esse nem sempre é o caso. Nesse sentido, para contornar a situação em que não é possível separar linearmente todos os dados de maneira correta usando um plano, Cortes e Vapnik (1995) introduziram o conceito de margem suave. Nessa consideração, é inserido nas equações um fator ξ a fim de computar o erro resultante da classificação incorreta de alguns pontos. Esse erro é diretamente proporcional à distância da amostra para a margem referente à sua classe correta, conforme indicado na Figura 25 (FILGUEIRAS, 2014). Além disso, uma constante C é inserida para ponderar o erro, de modo a garantir que a presença de anomalias na amostra não distorça os resultados do algoritmo. A solução para o problema de classificação com margem suave, então, pode ser nas equações a seguir:

$$\text{Minimizar: } \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i$$

$$\text{sujeito a: } \begin{cases} w \cdot x + b \geq +1 - \xi_i \\ w \cdot x + b \geq -1 + \xi_i \\ \xi_i \geq 0 \end{cases}$$

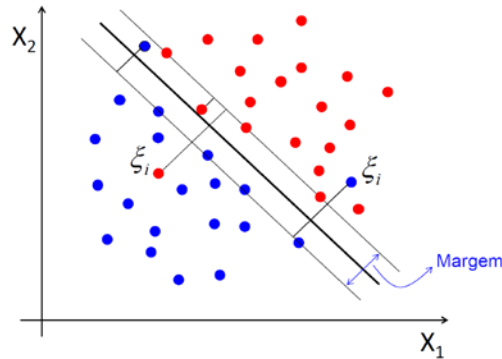


Figura 25. Algoritmo SVM – Aplicação da margem suave. Fonte: Filgueiras (2014)

Alguns *datasets*, entretanto, não são linearmente separáveis. O uso de um plano linear, mesmo com a consideração das margens suaves, não permite que o comportamento da amostra de dados seja devidamente representado. Para resolver esse problema, são introduzidas funções “kernel”. A aplicação de uma função kernel não linear $\varphi(x_1, x_2)$ resulta no mapeamento dos dados em uma dimensão superior à original, conhecida como espaço de características, em que a separação por um plano é possível. Feita essa separação, o plano é transportado de volta ao espaço original de dimensão inferior. A Figura 26 demonstra a utilização de um kernel RBF (*Radial Basis Function*) na separação de um conjunto de dados, e a Figura 27 apresenta os tipos de kernel mais utilizados em SVM, e suas descrições matemáticas.

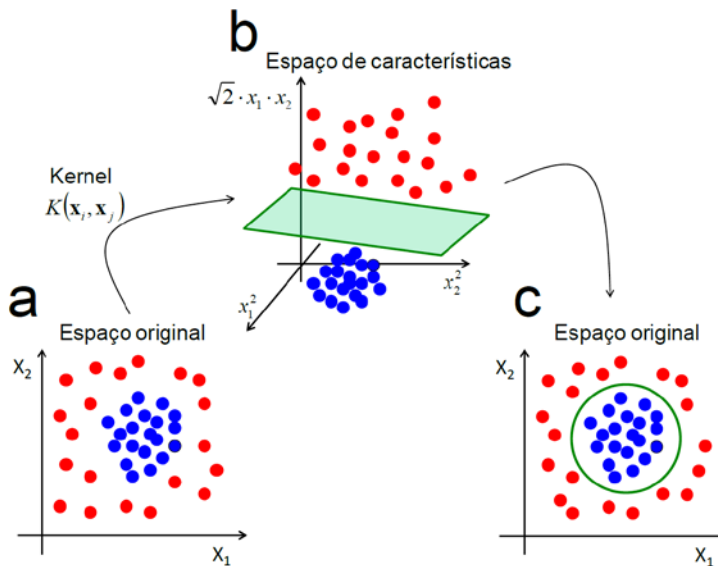


Figura 26. Algoritmo SVM – Aplicação da função Kernel RBF para separação de dados. Fonte: Filgueiras (2014)

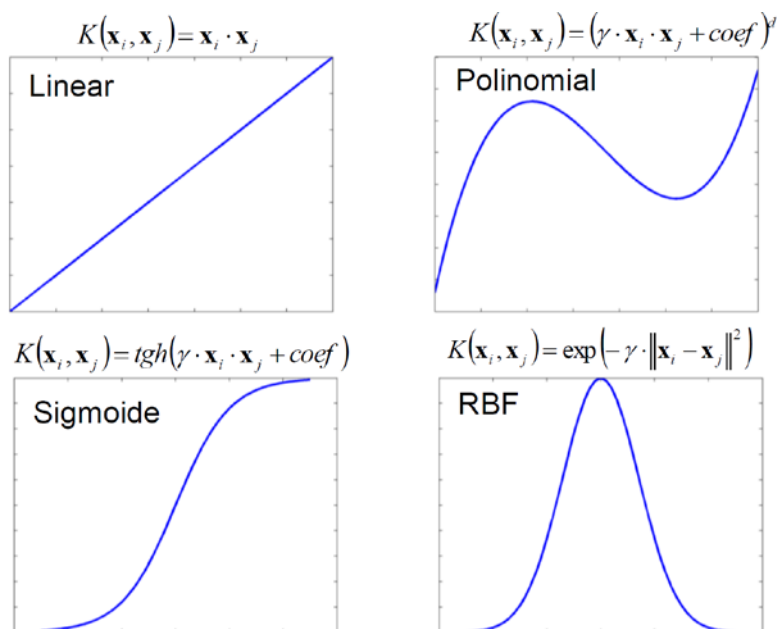


Figura 27. Algoritmo SVM – Funções Kernel. Fonte: Filgueiras (2014)

O modelo SVM foi adaptado por Drucker *et al.*, (1997) para resolver problemas de regressão, o qual ficou conhecido como *Support Vector Regression* (SVR). Na aplicação deste algoritmo, um número d é adicionado e subtraído, simultaneamente, ao valor de interesse valor de γ , formando-se duas classes distintas, conforme apresenta a Figura 28. Assim, o problema de regressão se torna, essencialmente, um problema de classificação binária, permitindo a aplicação do SVM.

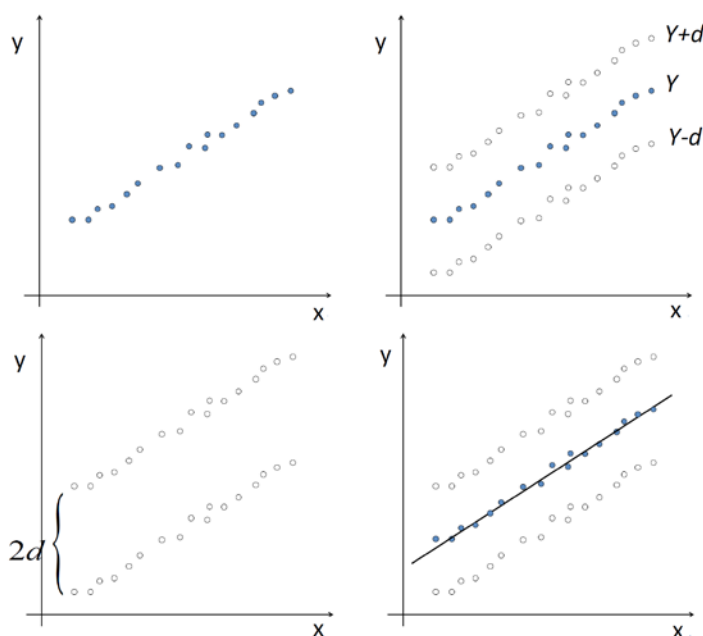


Figura 28. Algoritmo SVR – Etapas da classificação binária. Fonte: Filgueiras (2014)

Os erros associados são denotados por ξ_i e ξ_i^* , simbolizando os erros das classes com a adição e subtração de d , respectivamente. Além disso, é definida uma tolerância ε , que delimita a região em volta do hiperplano de separação onde os erros de classificação são considerados aceitáveis. A Figura 29 apresenta a configuração do problema.

Matematicamente, a solução do algoritmo SVR pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar: } & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{sujeito a: } & \begin{cases} y_i - w \cdot \varphi(x_i) - b \leq \varepsilon - \xi_i \\ w \cdot \varphi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon - \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

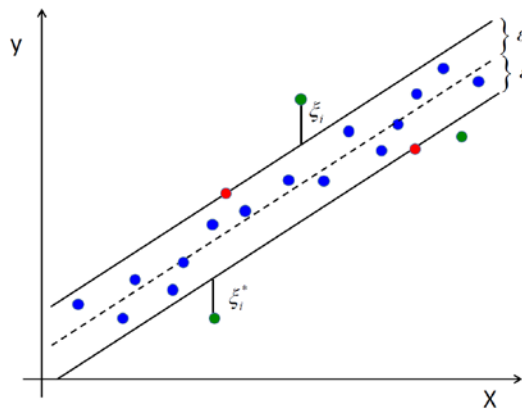


Figura 29. Representação da solução SVR. Fonte: Filgueiras (2014)

5.1.8 Treinamento das SVMs baseado em PSO

O treinamento da SVM/SVR exige a predefinição de alguns parâmetros como C e ε . Isso pode ser feito de modo empírico, o que leva tempo e experiência de quem irá realizar os treinamentos ou pode ser automatizado através de algoritmos de busca. Neste caso, foi utilizado o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) para a realização da busca de parâmetros ótimos com a finalidade de minimizar o erro médio quadrático da SVR.

O algoritmo PSO foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart (1995) e aprimorado por diversos pesquisadores ao longo dos anos (WEISE, 2009). O PSO é inspirado em sistemas biológicos sociais como um bando de pássaros ou um cardume de peixes onde, durante a procura por comida, os indivíduos do grupo se espalham e realizam, cada um ao seu modo, uma busca independente. Ao encontrar a comida, o indivíduo informa aos demais membros do grupo que, aos poucos, se direcionam à fonte de comida e, se encontrarem algo ainda melhor, vão convergindo o grupo para a melhor fonte. De modo semelhante, o algoritmo replica este comportamento utilizando uma função objetivo e partículas independentes que se movimentam em um espaço de busca e vão influenciando as demais partículas, quanto melhor seja sua posição em relação à função objetivo até que o grupo possa convergir para um ponto.

Em termos mais técnicos, conforme descrito por Weise (2009), o PSO realiza uma busca utilizando um grupo de S partículas em um espaço N -dimensional G para encontrar o melhor valor possível, seja ele o valor máximo ou mínimo da função. Cada partícula p possui uma posição $x \in G \subseteq R^n$ e uma velocidade $v \in R^n$. A posição x representa uma solução candidata ao problema. A velocidade v da partícula determina tanto em que direção ela irá se mover para continuar sua busca quanto se ela efetua uma exploração em uma área maior (alta velocidade) ou em área menor (baixa velocidade).

A inicialização do algoritmo consiste em determinar posições e velocidades aleatórias para cada partícula. A cada passo do algoritmo são atualizadas a velocidade e, em seguida, a posição das partículas. Cada partícula possui uma memória guardando sua melhor posição. A interação social entre as partículas se dá pelo fato de que cada uma pode conhecer a posição das partículas vizinhas $N(p)$, ou seja, que estejam em um raio de atuação predefinido à sua volta. Cada partícula pode se comunicar com as vizinhas e conhecer a melhor posição da vizinhança ou a melhor posição global entre todas as partículas. Se o algoritmo utiliza a melhor posição global para atualizar a posição e velocidade das partículas, tenderá a convergir mais rapidamente, porém com menos chance de encontrar a solução ótima global. Utilizar a melhor posição da vizinhança torna a convergência mais lenta, porém com maior probabilidade de encontrar a solução ótima global.

As equações para o cálculo da velocidade e posição das partículas são:

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 U_{1j} [0,1] (u_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 U_{2j} [0,1] (y_{sj}^t - x_{ij}^t)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}$$

onde,

- v : velocidade da uma partícula;
- as velocidades v_{ij} estão limitadas na faixa $[v_{\max}, v_{\max}]$ evitando que as partículas saiam do espaço de busca;
- x : posição de uma partícula no espaço N -dimensional limitado na faixa $[x_{\min}, x_{\max}]$;
- y_j : melhor posição individual de uma partícula;
- y_s : melhor posição global entre todas as partículas (S partículas);
- c_1 : coeficiente cognitivo (grau de autoconfiança);
- c_2 : coeficiente social (grau de confiança no enxame); e
- U_1 e U_2 : números aleatórios uniformemente distribuídos na faixa $[0,1]$.

Observa-se, ainda, que os coeficientes cognitivo e social têm alto grau de impacto no desempenho do algoritmo. Um valor grande para o coeficiente cognitivo (c_1) significa um alto valor de autoconfiança da partícula, enquanto um grande no coeficiente social (c_2) faz com que as partículas confiem mais no enxame. É conhecido que, para funções objetivo unimodais, resultados melhores são obtidos com pequenos valores de c_1 e valores maiores de c_2 . Para funções multimodais o melhor desempenho é alcançado balanceando c_1 e c_2 .

5.2 Estudo de Caso – Metodologia e Resultados

Para a realização do estudo baseado nas SVRs estão disponíveis dados de consumo de energia, os quais foram integralizados em intervalos de 15 minutos ao longo do dia. Estes dados foram classificados em três categorias: dia útil, sábados e domingos, sendo separados em subconjuntos para treinamento, teste e validação.

Foram realizados treinamentos da SVR para aproximar as curvas de carga com o *kernel* RBF Gaussiano e o algoritmo de busca PSO em conjunto com a biblioteca libSVM (<https://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>) para treinar as SVRs. Como espaço de busca do algoritmo PSO, utilizaram-se as variáveis C e ϵ , e, como critério de avaliação, a função custo associada ao PSO foi a raiz quadrada da média dos erros (RMSE – *root-mean-squared error*), resultante do treinamento de cada SVR gerado pelo algoritmo libSVM. Os resultados advindos do emprego da técnica SVR são comparados a outros dois métodos de regressão: *Gaussian Process Regressor* (GPR) (Rasmussen, 2003) e regressores baseados em redes neurais Perceptron (MLPR – *Multi-Layer Perceptron Regression*) (ALPAYDIN, 2016).

O estudo de caso abrange medições realizadas no prédio UED (Unidade de Ensino e Docência) localizado na Faculdade do Gama da UnB. O prédio UED possui um medidor instalado no quadro geral de baixa tensão da edificação e as medições deste dispositivo representam toda a demanda e consumo da edificação. A escolha deste prédio foi feita em função de ele ter sido o primeiro a ser contemplado com a instalação de medidores e, por consequência, possui o maior número de amostras coletadas, fato este relevante para a produção de um estudo estatisticamente significativo. Utilizaram-se dados referentes a dois períodos de medição: junho de 2019 e março/abril de 2020, de forma a demonstrar o comportamento da edificação em dois períodos distintos. Ressalta-se que a mesma metodologia é aplicada às outras edificações monitoradas pelo SIGE.

Nesse contexto, a Figura 30 apresenta as curvas típicas de consumo de energia para um dia útil, as quais foram obtidas a partir das medições em junho/2019 e março/abril/2020. Ao se comparar os resultados, pode-se observar a diferença acentuada no consumo para o período de aulas, o qual está representado por junho de 2019, e o período de março/abril de 2020, em que ocorreu a suspensão das atividades de ensino em decorrência da pandemia de COVID-19.

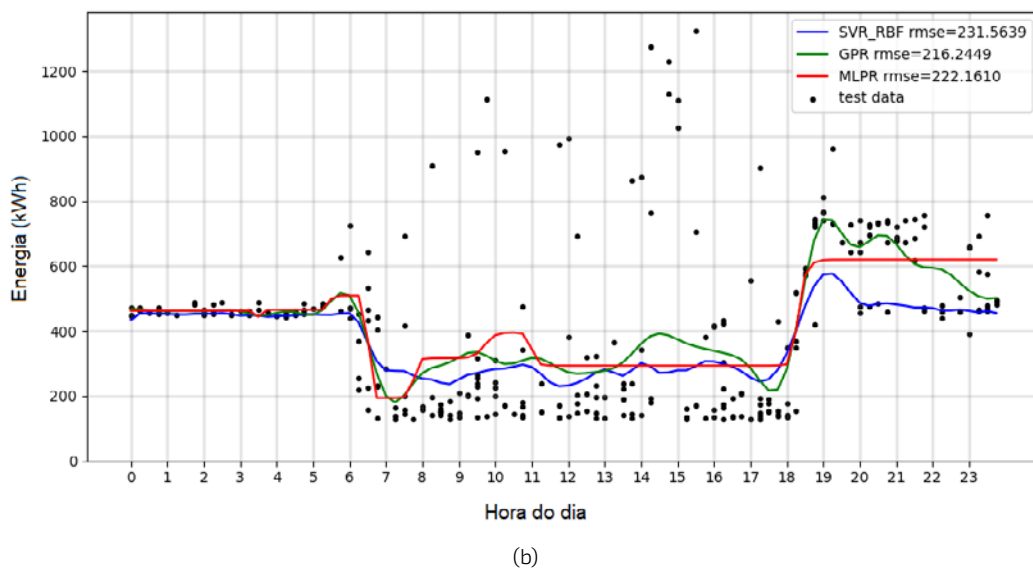
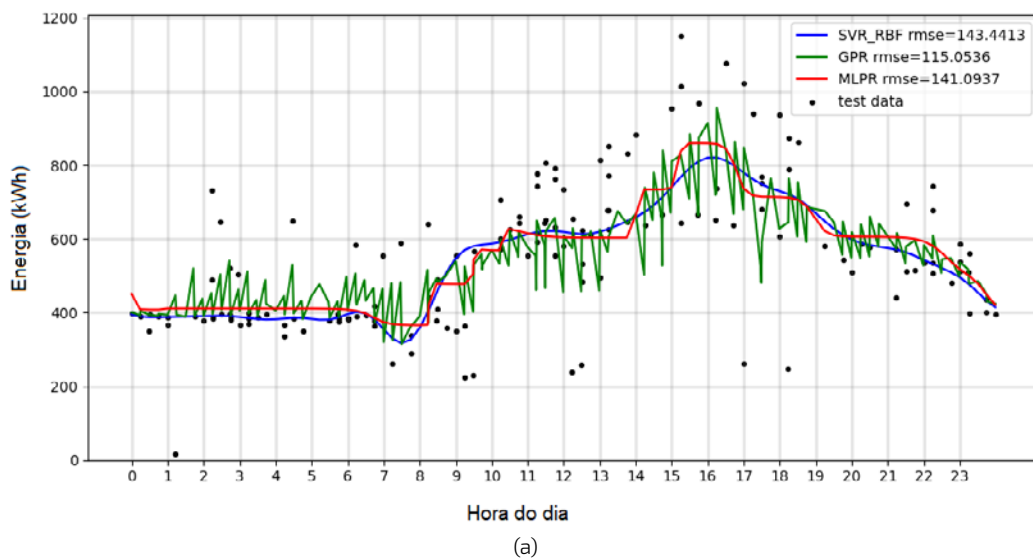
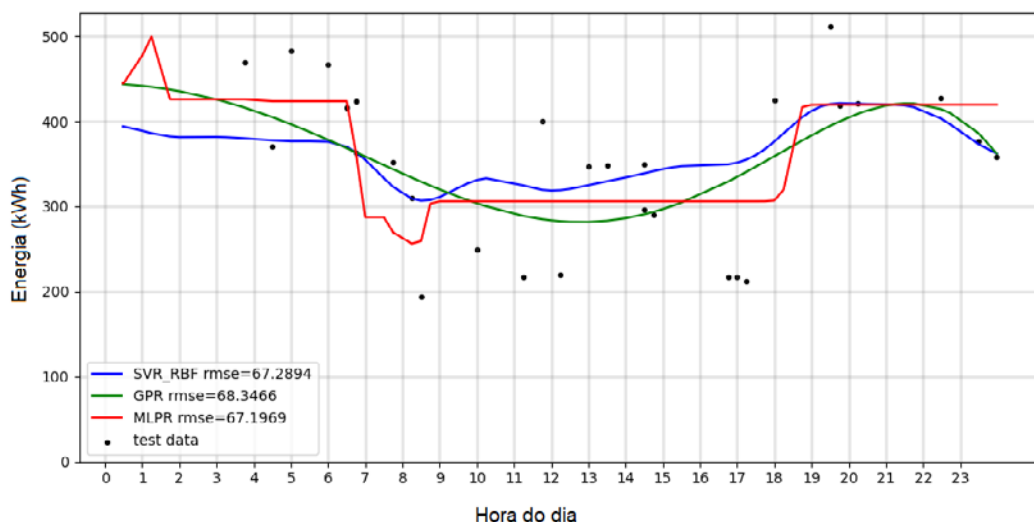
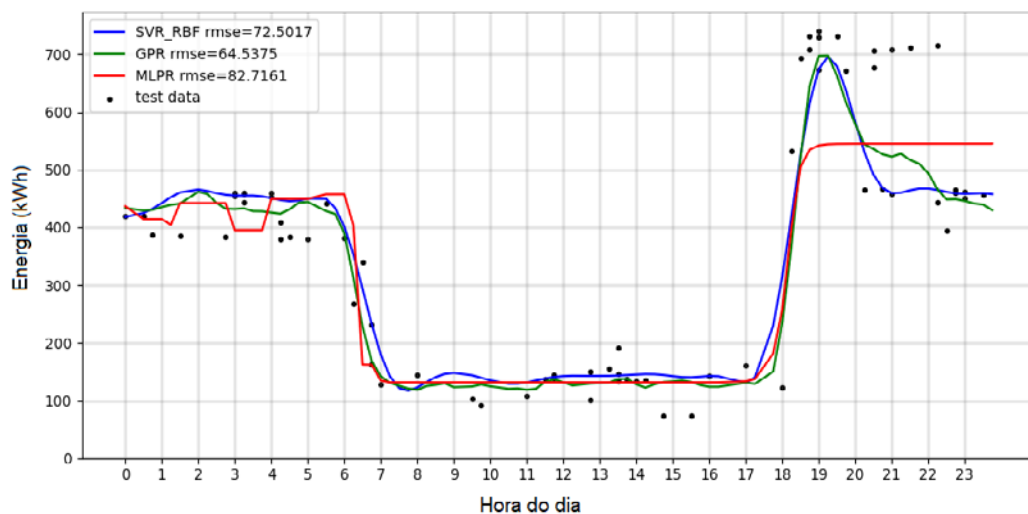


Figura 30. Curva de consumo – Dia útil – Medidor UED. (a) Junho/2019; (b) Março/abril/2020

Na sequência, a Figura 31 e a Figura 32 apresentam as curvas de consumo para os dias de final de semana (sábado e domingo). Neste caso, é possível notar que, de acordo com a dinâmica da FGA, a qual apresenta poucas atividades aos sábados e domingos, as curvas referentes a ambos os períodos são bem semelhantes e apresentam uma tendência de consumo constante ao longo do tempo. Pode-se observar, ainda, uma elevação do consumo no período noturno, fato este relacionado ao acionamento de sistemas de iluminação de ambientes internos e externos da edificação.

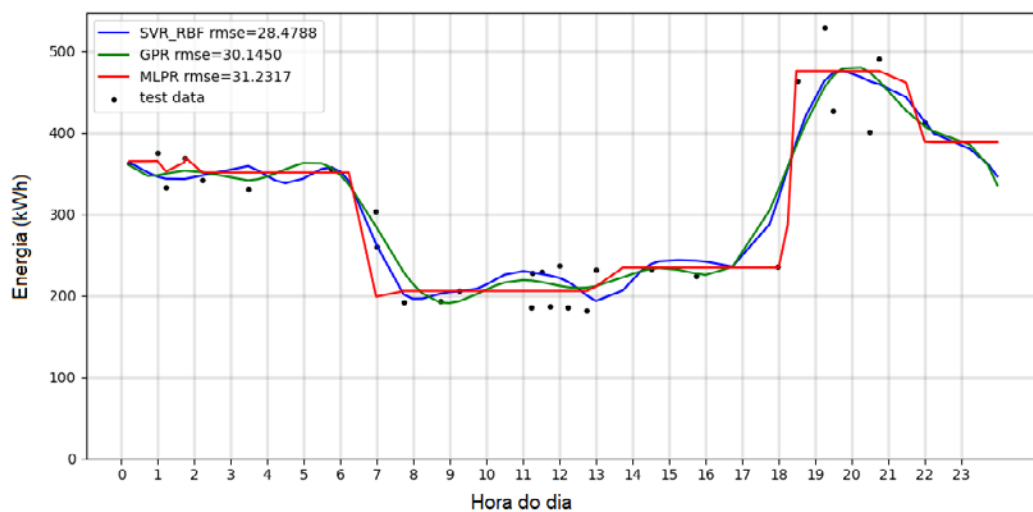


(a)

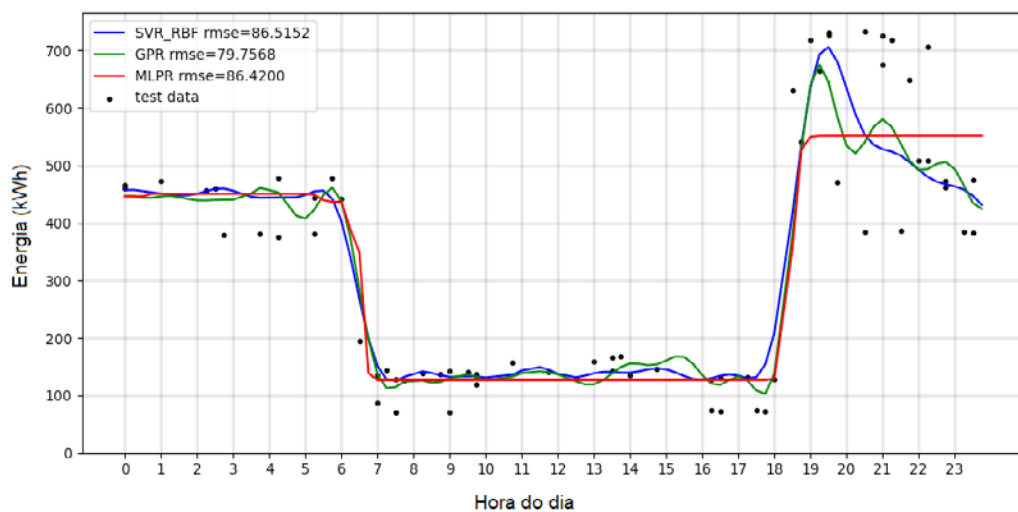


(b)

Figura 31. Curva de consumo – Sábado – Medidor UED. (a) Junho/2019; (b) Março/abril/2020



(a)



(b)

Figura 32. Curva de consumo – Domingo – Medidor UED. (a) Junho/2019; (b) Março/abril/2020

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo apresentar os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento relacionados ao Sistema de Gestão Energética da Universidade de Brasília. Conforme foi apresentado, o Sistema de Gestão Energética se caracteriza pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e desenvolvimento de *software* supervisor, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações, por meio de submedições de consumo. Ao longo deste relatório, foram apresentados diversos aspectos relacionados ao desenvolvimento deste tipo do sistema, sendo necessário tecer as seguintes considerações finais:

- as fases iniciais dos trabalhos foram marcadas pela definição da técnica de desenvolvimento, a qual se baseia em metodologias ágeis. Destaca-se a inclusão de testes automatizados, Integração Contínua e *Deploy* Contínuo (CI/CD), Automação de Configuração de Ambiente e Isolamento de Ambiente, proporcionando uma maior robustez e qualidade de código;
- o sistema se baseia em premissas de *Software Livre*, o que viabiliza sua adoção por outros órgãos públicos, bem como a criação de uma comunidade em torno de seu desenvolvimento que ajude a aprimorar cada vez mais suas funcionalidades. Isto é um elemento essencial para a continuidade do desenvolvimento após o término do acordo de cooperação CEB-UnB-Finatec;
- na sequência, caracterizou-se a necessidade de usuários do SIGE na Universidade de Brasília, culminando na definição de requisitos gerais. Tais requisitos se alinham com características existentes em normas técnicas internacionais, tais como a ISO 50001;
- a arquitetura de *hardware* do SIGE foi concebida em diversas camadas, de forma a proporcionar uma maior redundância na coleta de dados e facilitar a disponibilização de informações para o usuário final. As etapas de estudos e pesquisas de desenvolvimento do produto resultaram na definição de requisitos de *hardware* e *software* para todas as camadas, as quais subsidiaram a escolha das tecnologias empregadas no sistema.
- adicionalmente, ressalta-se o desenvolvimento de interfaces gráficas para viabilizar o acesso às informações coletadas e prover o acompanhamento em tempo real das edificações da Universidade de Brasília. As funcionalidades desenvolvidas consideram a inclusão de visualização de dados de medição, geração de relatórios, painéis informativos para auxiliar a gestão do sistema de distribuição de energia da Universidade, sistemas de notificação de ocorrência, dentre outros; e
- o SIGE também conta com o cálculo de indicadores relacionados às edificações monitoradas, bem como o tratamento de dados históricos de medição para a obtenção de curvas típicas de consumo.

Isto posto, constata-se a produção de um sistema de gestão energética que tem forte impacto na Universidade de Brasília e grande potencial de aplicação em outras instituições públicas do Brasil e continuidade de desenvolvimento.

7. REFERÊNCIAS

- [1] ABBAS, O. A. *Comparisons between data clustering algorithms*. Computer Science Department, Yarmouk University, Irbid. Jordânia, p. 6, 2008.
- [2] ABNT NBR ISO 50001:2018 – *Sistemas de gestão da energia – Requisitos com orientações para uso*. 2ª ed., 2018
- [3] BECK, K. *eXtreme Programming explained: Embrace change*. Addison-Wesley, 2000.
- [4] BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT'S ENVIRONMENTAL ASSESSMENT METHOD – BREEAM. *International New Construction 2016* SD233. BRE Global, Issue 2, 2017.
- [5] CORTES, C.; VAPNIK, V. N. *Support-vector networks*. ATT Bell Labs, p. 25, 1995.
- [6] DRUCKER, H. *et al. Support vector regression machines*. Bell Labs and Monmouth University, Department of Electronic Engineering, p. 7, 1997.
- [7] EY; GBC BRASIL. *Sustainable Buildings in Brazil*. 2013. Disponível em: <<http://gbcbrasil.org.br/sistema/docsMembros/1311141211060000005990.pdf>>. Acesso em: 29 set 2016.
- [8] ALVES, E. R. *Mineração de Dados Baseada em Inteligência Computacional: uma Aplicação à Determinação da Tipologia de Curvas de Carga*. Dissertação de Mestrado. UFPA, Belém, PA, 2011.
- [9] FILGUEIRAS, P. H. *Regressão por vetores de suporte aplicado na determinação de propriedades físico-químicas de petróleo e biocombustíveis*. Doutorado em Ciências. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, Brasil, 2014.
- [10] FOSSA, A. J.; E SGARBI, F. A. *Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001: Gestão de Energia*. 2015. International Copper Association Brazil, Copper Alliance. Disponível em: <http://www.abrinstal.org.br/docs/guia_gestao_de_energia.pdf>. Acessado em: março de 2020.
- [11] FRANCISQUINI, A. A. *Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, SP, Brasil, 2006.
- [12] GNU. *O que é o software livre?*, 2020. A Definição de Software Livre. Disponível em: <<https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.pt-br.html>>. Acesso em: março de 2020.
- [13] KENNEDY, J.; EBERHART, R. *Particle swarm optimization*. In: Proc. IEEE International Conference on Neural Networks. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, pp. 1942–1948.
- [14] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobrás, 2014.
- [15] MCLOUGHLIN, F.; DUFFY, A.; COLON, M. *A clustering approach to domestic electricity load profile characterisation using smart metering data*. Dublin Institute of Technology, Dublin, Irlanda, p. 12, 2015.
- [16] MODBUS. *Modbus Application Protocol Specification*. V1.1b3, www.modbus.org, 2012.
- [17] MODBUS. *Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide*. V1.0b, www.modbus.org, 2006.
- [18] PINHEIRO, M. D. *Ambiente e Construção Sustentável*. Instituto do Ambiente. Portugal, 1ª ed, p. 243. 2006.
- [19] SAIDEL, M.A.; FAVATO, L.B.; MORALES, C. *Indicadores Energéticos e Ambientais: Ferramenta Importante na Gestão da Energia Elétrica*. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2005.
- [20] SANGALLI, L. M. *et al. Functional clustering and alignment methods with applications*. Dipartimento di Matematica, Politecnico di Milano, Milão, Itália, p. 20, 2010.
- [21] SCHWABER, K.; SUTHERLAND J. *The Scrum Guide™: The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*. Scrum.org, 2017.
- [22] SENJYU, T.; HIGA, S.; UEZATO, K. *Future load curve shaping based on similarity using fuzzy logic approach*. In: Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings. [S.l.: s.n.], 1998.
- [23] SHAMEEM, M. U. S.; FERDOUS, R. *An efficient k-means algorithm integrated with jaccard distance measure for document clustering*. Dept. of Computer Science and Engineering, University of Development Alternative. Dhaka, Bangladesh and University of Trento, Trento, Itália, p. 6, 2009.
- [24] SRINIVASAN, D.; LIEW, A. C.; CHANG, C. S. *Forecasting daily load curves using a hybrid fuzzy-neural approach*. In: Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings. [S.l.: s.n.], 1994. v. 141, Issue 6.

- [25] STEINARSSON, S. *Downsampling Time Series for Visual Representation*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Faculdade de Ciência da Computação, University of Iceland, Reykjavík, p. 65, 2013.
- [26] TONIM, G. *A gestão de Energia Elétrica na Indústria – Seu Suprimento e Uso Eficiente*. Universidade de São Paulo – USP, Departamento de Engenharia Elétrica. São Paulo, SP, 2009.
- [27] VACANTI, D. *The Kanban Guide for Scrum Teams*. Scrum.org, 2019.
- [28] VIVIAN, C. H. V. *Estudo de Caso da Curva de Carga de Consumidor Residencial*. Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil, 2015.
- [29] WEISE, T. *Global Optimization Algorithms – Theory and Application*. [S.l.]: Germany: it-weise.de (self-published), 2009.

CAPÍTULO 6

Estado da Arte em Geração Distribuída

Sergio de Oliveira Frontin



OBJETIVO

Investigar, analisar e consolidar o referencial bibliográfico (teses, dissertações, artigos técnicos e científicos, projetos de P&D, livros etc), no tocante às questões relacionadas à inserção da Geração Distribuída (GD) em sistemas de distribuição de energia elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição em âmbito brasileiro como internacional vêm enfrentando diversos desafios tecnológicos, técnicos, econômicos e sociais. Tais desafios decorrem principalmente da crescente difusão de Geração Distribuída inserida nas unidades de consumidores da rede de distribuição. Aliam-se a estes desafios a intensificação do uso de veículos elétricos que vão exigir postos de carregamento de baterias, a entrada de armazenamento junto às fontes intermitentes de energia e, ainda, a possibilidade de formação de microrredes. Sendo importante ressaltar que estes itens (geração distribuída, veículos elétricos e armazenamento de energia) vêm surgindo num cenário de aplicação cada vez mais intensa de redes elétricas inteligentes detentoras de alta componente de dispositivos de eletrônica de potência, tecnologia da informação e redes modernas de comunicação.

Neste novo ambiente, surge a necessidade de rever as diversas premissas e critérios que envolvem o planejamento, projeto, operação, manutenção e comercialização das redes de distribuição.

Assim, é de primordial importância conhecer o que os diversos agentes que atuam no setor de distribuição de energia vêm estudando, apontando os impactos técnicos e econômicos, e indicando as possíveis soluções, identificando os desafios e obstáculos a serem enfrentados, apresentando as novas metodologias de análise, novos modelos para representação dos componentes, novos modelos de negócios etc. Para visitar este universo e estabelecer o Estado da Arte na Geração Distribuída, foram consultadas diversas fontes de informações.

2. DEFINIÇÕES

Segue definição de alguns termos importantes relacionados ao tema em questão.

2.1 Microgeração Distribuída

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Aneel, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (REN Aneel 687 de 24 de novembro de 2015).

2.2 Minigeração Distribuída

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW, menor ou igual a 5 MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da Aneel, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (REN Aneel 786 de 17 de outubro de 2017).

2.3 Redes Elétricas Inteligentes

Integração de fontes renováveis de energia, novos materiais, equipamentos avançados, telecomunicação e informação, controle e supervisão e tecnologia de armazenamento, de maneira a apoiar a gestão digital, decisões inteligentes e transações interativas entre geração, transmissão e distribuição (*State Grid – China*).

2.4 Microrredes

Um grupo de cargas e recursos energéticos distribuídos (DER) interligados com fronteiras elétricas claramente definidas que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede e podem se conectar e desconectar do *grid* para permitir que opere tanto conectado ao *grid* quanto em modo ilhado (Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Energy Department – DoE*)).

3. FONTES DE INFORMAÇÕES

A pesquisa bibliográfica realizada com o objetivo de determinar o estado da arte voltada para o tema Geração Distribuída (GD) contou com a base de dados das seguintes fontes de informação:

- Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE;
- Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – SEPOPE;
- Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS;
- Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI;
- Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL, UFRJ;
- Universidade de Brasília – UnB;
- Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL;
- Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Aneel – ANEEL; e
- *Conseil International des Grands Réseaux Electriques – CIGRÉ.*

As publicações dos diversos fóruns patrocinados pelo IEEE e artigos de revistas internacionais foram selecionados e analisados essencialmente para compor os capítulos que se referem aos assuntos: estudos de impactos da integração de fontes renováveis na rede elétrica, simulação em tempo real e redução de sistemas elétricos.

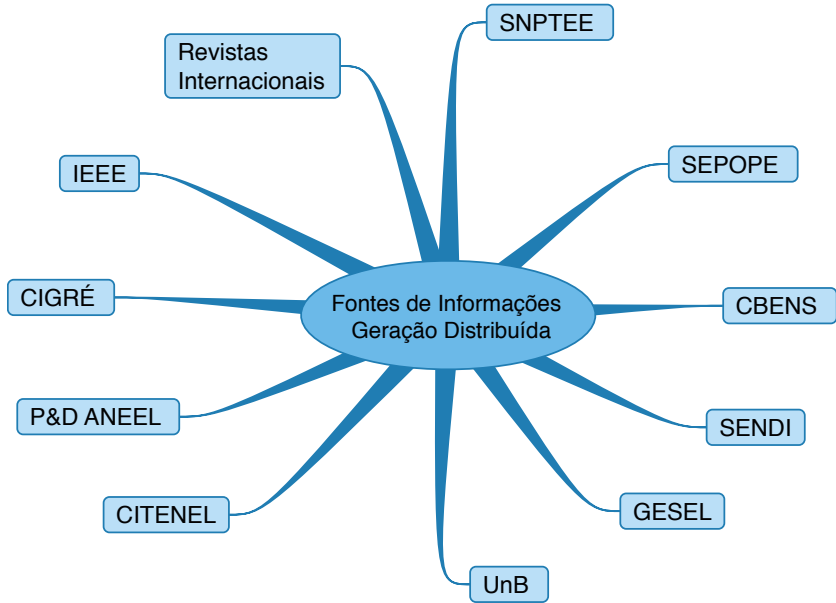


Figura 1. Fontes de consulta

Os informes seleccionados oriundos dessas fontes foram agrupados nos temas apresentados a seguir.

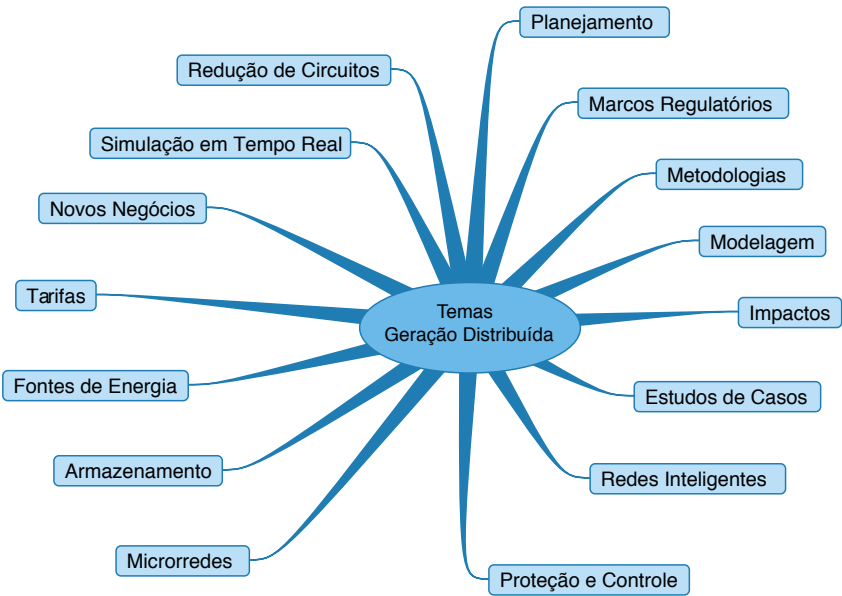


Figura 2. Temas pesquisados

Para cada um destes temas, foram apresentados os pontos relevantes da situação atual e as perspectivas dos pontos visualizados que necessitam de aprimoramento.
Os resultados da prospecção realizada são apresentados no próximo item.

4. RESULTADOS DA PESQUISA

As tabelas a seguir apresentam, para cada uma das fontes de informações, a quantidade de informes técnicos selecionados por ano de realização do evento.

4.1 Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)

O SNPTEE é um evento tradicional do setor de energia elétrica que é realizado a cada dois anos nos anos ímpares. A prospecção de informe relacionados à Geração Distribuída foi realizada nos eventos realizados nos anos de 2009, 2011, 2013, 2015 e 2017, resultando no quadro a seguir, que apresenta a quantidade de informes pertinentes ao tema, por evento e por grupo de estudo.

Ano	Local	GPT	GPL	GCR	GET	Total
2017 – XXIV SNPTEE	Curitiba (PR)	1		1		2
2015 – XXIII SNPTEE	Foz do Iguaçu (PR)	1	3	1	2	7
2013 – XXII SNPTEE	Brasília (DF)	4		3		7
2011 – XXI SNPTEE	Florianópolis (SC)	3				3
2009 – XX SNPTEE	Recife (PE)	4				4
Total		13	3	5	2	23

- GPT – Grupo de estudo de produção térmica e fontes não convencionais.
- GPL – Grupo de estudo de planejamento de sistemas elétricos.
- GCR – Grupo de estudo de comercialização, economia e regulação de energia elétrica.
- GET – Grupo de estudo de eficiência energética e gestão da tecnologia, da inovação e educação.

4.2 Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)

Evento destinado aos especialistas que atuam no planejamento da operação e na expansão do sistema interligado. Foi concebido para ser realizado a cada dois anos nos anos pares. Por motivos conjunturais o evento de 2016 não foi realizado.

Ano	Local	Quantidade
2018 – XIV SEPOPE	Recife (PE)	6
2014 – XIII SEPOPE	Rio de Janeiro (RJ)	2
2012 – XII SEPOPE	Foz do Iguaçu (PR)	3
Total		11

4.3 Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)

Evento que vem se fortalecendo ao longo dos anos, devido ao crescimento da energia solar tanto na área de Geração Distribuída como na geração de energia solar concentrada em grandes parques.

Ano	Local	Quantidade
2018 – VII CBENS	Gramado (RS)	10
2016 – VI CBENS	Belo Horizonte (MG)	2
2014 – V CBENS	Foz do Iguaçu (PR)	2
Total		14

4.4 Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)

Certamente o maior fórum na área de distribuição de energia elétrica no Brasil.

Ano	Local	Quantidade
2018 – XXIII SENDI	Fortaleza (CE)	3
2016 – XXII SENDI	Curitiba (PR)	4
2014 – XXI SENDI	Santos (SP)	5
2012 – XX SENDI	Rio de Janeiro (RJ)	7
2010 – XIX SENDI	São Paulo (SP)	3
Total		22

4.5 Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL, UFRJ)

Grupo ligado à Universidade Federal do Rio de Janeiro, que vem realizando importantes trabalhos para o setor de energia elétrica. Foram selecionados para análise um livro e três textos para discussão.

Ano	Quantidade
2018	2
2017	1
2016	1
Total	4

4.6 Universidade de Brasília (UnB)

O Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília vem desenvolvendo, nos últimos anos, trabalhos acadêmicos voltados para o tema Geração Distribuída. No período de 2010 – 2017, foram elaborados: duas teses, três dissertações e 12 trabalhos de conclusão de curso (TCC), conforme quadro a seguir.

Ano	Tese	Dissertação	TCC	Total
2017			3	3
2016	1	1		2
2015			3	3
2014			2	2
2013		1	2	3
2012		1		1
2011			2	2
2010	1			1
Total	2	3	12	17

4.7 Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)

Evento patrocinado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), com o objetivo de apresentar os resultados dos projetos de P&D. Os informes selecionados foram apresentados, na quase totalidade, em atendimento aos temas preferenciais: fontes alternativas de energia, planejamento de sistemas, redes elétricas inteligentes.

Ano	Local	Quantidade
2017 – IX CITENEL	João Pessoa (PB)	3
2015 – VIII CITENEL	Costa do Sauípe (BA)	2
2013 – VII CITENEL	Rio de Janeiro (RJ)	1
2011 – VI CITENEL	Fortaleza (CE)	1
Total		7

4.8 Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Aneel

Na base de dados da Aneel, que contém as informações básicas sobre os projetos de P&D sob a responsabilidade das empresas concessionárias de energia elétrica, foram selecionados os seguintes projetos no segmento Distribuição.

Ano	Projetos
2017	4
2016	2
2015	1
2014	2
2012	3
2011	1
2010	2
2009	2
Total	17

4.9 Conseil International des Grands Réseaux Electriques (CIGRÉ)

A prospecção de informe relacionado à Geração Distribuída (*Distributed Generation*) foi realizada nos informes técnicos apresentados nas bienais de Paris realizadas nos anos pares e nas brochuras elaboradas pelos diversos Comitês de Estudos do CIGRÉ. Para compor o Estado da Arte, foram selecionados os seguintes informes distribuídos de acordo com o quadro resumo a seguir.

Ano	Quantidade
2018 – Bienal	5
2015 – Brochuras	2
2014 – Bienal	4
2014 – Brochura	1
2012 – Bienal	1
2010 – Bienal	1
2008 – Bienal	2
2006 – Bienal	1
Total	17

Os informes foram apresentados no Comitê de Estudos C6 – Sistema de Distribuição e Geração Distribuída.

5. COMENTÁRIOS SOBRE AS PESQUISAS REALIZADAS

Em sua totalidade foram selecionados para análise 129 informes, apresentados no período de 2018 a 2006, nos mais diferentes eventos, conforme quadro e figuras a seguir:

Evento	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008 2006	Total
SNPTEE		2		7		7		3		4		23
SEPOPE	6				2		3					11
CBENS	10		2		2							14
SENDI	3		4		5		7		3			22
GESEL	2	1	1									04
UnB		3	2	3	2	3	1	2	1			17
CITENEL		3		2		1		1				07
ANEEL		4	2	1	2		3	1	2	2		17
CIGRÉ	5			2	5		1		1		3	17
Total	26	13	11	15	18	11	15	7	7	6	3	132

Pode-se notar que o SNPTEE contribuiu com o maior número de informes (23), seguido do SENDI (22), e o ano de 2018 foi aquele com o maior número de informes (26) seguido do ano de 2014 (18).

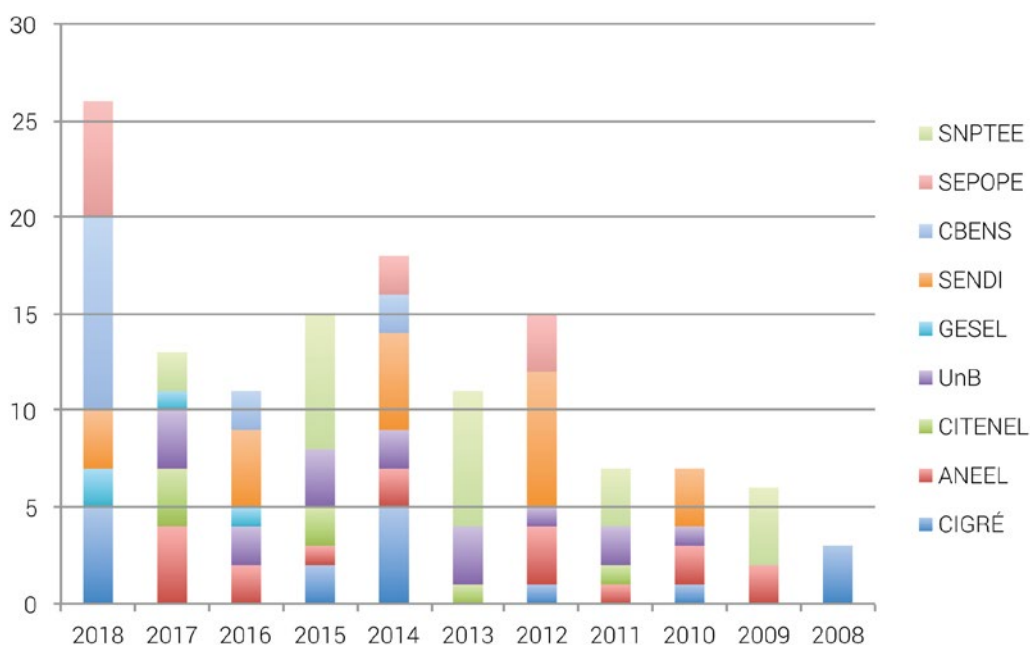


Figura 3. Quantidade de informes por ano e por evento

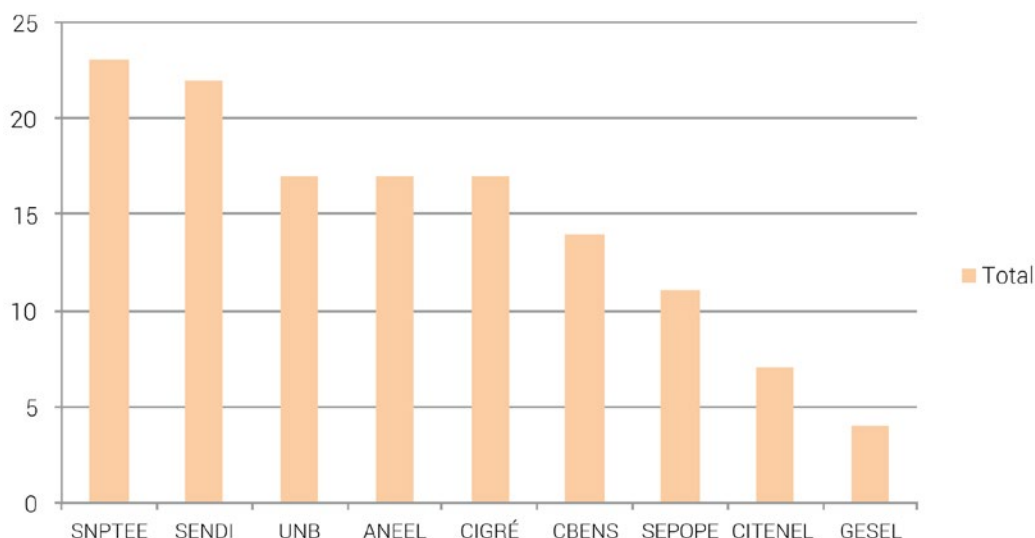


Figura 4. Quantidade de informes por evento

As palavras chaves indicadas nos informes fornecem uma ampla visão dos assuntos correlatos ao tema Geração Distribuída. Seguem algumas destas palavras chaves:

- **Geração** – geração distribuída, microgeração, minigeração, fontes renováveis de energia;
- **Fontes de energia** – energia solar fotovoltaica, energia eólica, células a combustível, cogeração, microturbinas;
- **Redes** – microrredes, redes inteligentes, rede de distribuição, conexão de micro e minigeração;
- **Estudos** – impactos técnicos, ilhamento de áreas, fluxo de potência, estabilidade de sistemas, religamento assíncrono, perfil de tensão, controle ativo de tensão, simulação em tempo real, redução de perdas, *OpenDSS*;
- **Regulação** – Resolução Normativa Aneel n.º 482/2012, procedimentos de redes, procedimentos de distribuição, regulamentação de geração distribuída, políticas públicas;
- **Tarifas** – medição inteligente, *net-metering*, tarifa *feed in*, tarifa branca, comercialização, compensação de energia, *prosumers*;
- **Controle, proteção** – eletrônica de potência, conversor de energia, microinversor; e
- **Outros** – qualidade de energia, veículos elétricos, eficiência energética, armazenamento de energia, sistemas de monitoramento.

As entidades envolvidas nos informes dos eventos realizado no Brasil foram as seguintes:

- **Universidades** – Universidade de Brasília, Universidade de Pernambuco, Universidade Federal do Tocantins, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Unesp Ilha Solteira, Universidade do Estado de Santa Catarina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Universidade Federal de Itajubá, Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal do ABC; Centro Universitário Alves

Faria, Universidade Federal de Santa Maria, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Universidade Federal do Pampa, Universidade Federal de Viçosa, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Instituto Federal do Espírito Santo, Universidade Salvador, Universidade Federal do Pará, Universidade Federal de Goiás, Universidade Federal do Ceará;

- **Empresas Concessionárias** – Eletrobras, Chesf, Copel, Endesa Brasil, Ampla, Cesp, AES Sul, AES Eletropaulo, Cemar, *Florida Power&Light Company*, Cemig, *Light SESA*, EDP Bandeirante, Empresa Bandeirante de Energia S/A, Enel Distribuição Ceará, Enel Distribuição Rio, Tractebel Energia S/A;
- Empresa de Consultoria – Thymos Energia, Promon Engenharia, Elco Engenharia de Montagem;
- **Fabricantes** – Siemens;
- **Laboratórios** – Cepel, Lactec; e
- **Outros** – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), Fundação Parque Tecnológico de Itaipu (FPTI), Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP).

As empresas concessionárias patrocinadoras dos projetos de P&D selecionados foram as seguintes:

- Ampla Energia e Serviços S/A;
- Bandeirante Energia S/A;
- Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia;
- Companhia Energética de São Paulo;
- Companhia Paulista de Força e Luz;
- Centrais Elétricas de Rondônia S/A;
- Centrais Elétricas Matogrossense S/A;
- CEB Distribuição S/A;
- Copel Distribuição S/A;
- Elektro Eletricidade e Serviços S/A; e
- Light Serviços de Eletricidade S/A.

Em âmbito internacional, considerando os informes do CIGRÉ, temos os seguintes países e universidades envolvidos na elaboração dos trabalhos:

- **Países** – Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Brasil, China, Estados Unidos, Espanha, Egito, Eslovênia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Itália, Japão, Portugal, Reino Unido, Sérvia; e
- **Universidades**– *Soubra Faculty of Engineering (Egypt)*, *Minia University (Egypt)*, *Imperial College London (United Kingdom)*, *Eindhoven University of Technology (Netherlands)*, *Università di Cagliari (Italy)*, *University of Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering Slovenia*, *Tianjiun University (China)*, *University of Bologna (Italy)*, *University of Milan (Italy)*, *University of Genoa (Italy)*.

6. RESUMO DOS TRABALHOS CLASSIFICADOS POR TEMAS

A seguir serão apresentados os resumos dos informes selecionados agrupados de acordo com os seguintes temas:

- Planejamento da Geração Distribuída;
- Marcos Regulatórios voltados para a Geração Distribuída;
- Metodologias aplicadas ao estudo da Geração Distribuída;
- Modelagem de componentes, ferramentas computacionais e laboratórios;
- Impactos decorrentes da penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição;
- Estudos de casos com aplicação de Geração Distribuída;
- Redes Inteligentes no contexto da Geração Distribuída;
- Proteção e controle aplicados à Geração Distribuída;
- Microrredes no contexto da Geração Distribuída;
- Armazenamento de energia na Geração Distribuída;
- Fontes de energia na Geração Distribuída;
- Tarifas; e
- Novos negócios.

Deve-se notar que um informe pode abordar mais de um dos assuntos indicados. Neste caso, será escolhido o assunto com maior ênfase ou apresentado em dois ou mais grupos de temas.

6.1 Planejamento da Geração Distribuída

Evento	2018	2016	2015	2014	2013	2011	2010	2008	2006	Total
SNPTTE			1		1					2
SEPOPE	2			1						3
CBENS	4									4
SENDI							1			1
GESEL		1								1
UnB		1		1	1	1	1			5
CITENEL					1					1
ANEEL				1						1
CIGRÉ	1			1				1	1	4
Total	7	2	1	4	3	1	2	1	1	22

Os resumos a seguir apresentados foram extraídos dos informes indicados, sem nenhuma alteração de conteúdo e, portanto, expressam o pensamento dos autores que, por sua vez, espelham o conhecimento e tecnologia da época de publicação do informe.

- GOMES, E.C.F. (SEPOPE, 2018) aborda as seguintes questões: principais barreiras, problemas de financiamento, estratégias das empresas, internalização das novas tecnologias e falta de regulamentação específica. Para responder a estas questões, analisa os resultados dos quatro leilões de energia fotovoltaica que já foram realizados no Brasil. Examina a afirmação da ABSOLAR de que o mercado de energia solar no Brasil está atrasado em 15 anos comparado com outros mercados internacionais, indica que a contratação de cerca de 1.000 MW de volume mínimo anual de geração solar fotovoltaica poderia viabilizar uma fábrica de painéis solares no Brasil e, desse modo, desenvolver a indústria nacional com a possibilidade de atingir preços médios mais competitivos.
- PARENTE, B.J.P. (SEPOPE, 2018) faz reflexões sobre as potencialidades do Brasil e as barreiras existentes para um avanço rápido da matriz energética solar neste país, analisando os caminhos possíveis para alcançar destaque mundial nesta área. Trata de aspectos relevantes sobre necessidade de escoamento adequado da energia produzida, o ambiente regulatório, as amarras para a comercialização, variabilidade solar e armazenamento energético.
- SHAYANI, R.A. (CBENS, 2018) apresenta um método para análise probabilística da necessidade de reforço de rede de distribuição para conexão de Geração Distribuída Fotovoltaica, visando à realização de investimentos prudentes na rede, em prol da modicidade tarifária.
- RODRIGUES, M.A.O. (CBENS, 2018) apresenta cenários para a expansão da energia solar no Distrito Federal, analisando os possíveis impactos técnicos e sociais. Os fatores motivadores seriam os elevados índices de radiação em todo o território brasileiro que indica a potencialidade da aplicação de energia solar fotovoltaica, que atuaria de forma benéfica sobre os aumentos de temperatura, diminuição de precipitação e escassez hídrica. Nesse contexto, foi feita a previsão conservadora para até o ano 2050: instalar 37 GWp de Geração Distribuída solar fotovoltaica.
- SKORUPA, T. (CBENS, 2018) apresenta um estudo para determinar a locação ótima da GD objetivando a redução de perdas. Considerou um sistema teste no noroeste do estado do Rio Grande do Sul e uma fonte solar fotovoltaica de 5 MW. Foram simulados cinco cenários distintos para analisar os impactos no perfil de tensão e nas perdas do sistema. Comparando-se os cinco casos, verificou-se que a variação entre o melhor e o pior ponto de conexão apresentou cerca de 66% de diferença nas perdas do sistema.
- MOREIRA, E.A. (CBENS, 2018), sob a perspectiva da engenharia de planejamento de sistemas elétricos, analisa a forma mais adequada de se modelar o sistema fotovoltaico conectado a rede. O impacto da escolha da modelagem foi analisado por meio de simulação de quatro cenários distintos de uma mesma rede elétrica. Os resultados obtidos indicam variações nos parâmetros de carregamento das linhas e perdas elétricas, entre os cenários de aproximadamente 6 % a 13 % respectivamente. Tal diversidade de resultados dificulta o processo de tomada de decisão, o que pode conduzir a projetos sobre ou subdimensionados acarretando prejuízos financeiros e até riscos operativos.

- POPOVIC, Z. (CIGRÉ, 2018, Sérvia) apresenta uma metodologia para o planejamento da rede de distribuição na presença de Geração Distribuída e as incertezas decorrentes das variabilidades das cargas. O objetivo primordial do procedimento é determinar o plano de expansão que minimize os riscos econômicos com a máxima possível eficiência.
- CAMARGOS, R. S. C. (UnB, 2016) indica que a Aneel exige que a expansão das redes de distribuição seja planejada considerando a inserção da GD, entretanto não define como deve ser feito. Nesse sentido, é proposto método para identificação dos limites da GD, que alteram a necessidade de reforços detectada pelo planejamento da expansão de redes de distribuição de média tensão. Foram considerados critérios de carregamento, níveis de tensão e perdas técnicas. Tradicionalmente, a situação crítica para a rede acontece quando a demanda das unidades consumidoras é máxima, contudo, quando se instala a GD, os cenários que exigem reforços para o alimentador ocorrem nos momentos em que a GD injeta a maior potência na rede, ou seja, nas horas de maior irradiação solar e menor consumo.
- CASTRO, N. (GESEL, 2016) conclui no trabalho que é importante destacar que o crescimento da participação da micro e da minigeração não deve ser analisado como uma mera diversificação da matriz elétrica. Em linhas gerais, é preciso reconhecer que está em curso uma transição tecnológica que impactará o setor elétrico em suas diferentes esferas. Prospecta-se não apenas a continuidade da difusão de micro e minigeração e a crescente importância do gerenciamento da demanda, como também é preciso considerar os impactos da crescente participação de veículos elétricos, corroborando *drive* de possível disseminação de sistemas de armazenamento de energia nas unidades de consumo. A atual abordagem da Aneel acerca da Geração Distribuída enfatiza e estimula a difusão da tecnologia de sistemas de micro e minigeração, não avaliando, ainda, aspectos associados a contratos de energia existentes, perda de faturamento da distribuidora, necessidade de investimentos em novos equipamentos de rede para lidar, por exemplo, com fluxos reversos de energia, implantação de novos procedimentos e ferramentas associados à operação e manutenção, implantação de novos índices de qualidade dos serviços, implantação de novos critérios de segurança, aspectos de planejamento de ampliações e reforços na rede e, finalmente, novos critérios de contratação de energia. Embora o Brasil já tenha avançado em alguns aspectos relacionados à inserção da micro e da minigeração, observa-se que marco regulatório ainda não é capaz de lidar com todas as mudanças e impactos. Ressalta-se que incentivos regulatórios à Geração Distribuída atuam como catalisadores do processo supracitado, provocando impactos diretos, como descontos sobre a TUSD e necessidade de adequação da rede de distribuição; e indiretos, como a redução do consumo e na receita das distribuidoras.
- NEGRI, J.C. (SNPTEE, 2015). O estudo aborda perspectivas de implantação da GD de médio porte, conectada em rede específica para geração elétrica. É efetuada uma revisão bibliográfica da experiência internacional para identificar questões comuns, tratamento realizado e dificuldades remanescentes. O arcabouço legal-regulatório nacional é apresentado, sendo identificados os principais entraves e propostos ajustes. Com base nos benefícios intrínsecos da GD, é avaliada a aplicação em áreas próximas ao consumo e de estrangulamento dos sistemas de transmissão e distribuição nos centros metropolitanos. Uma re-

visão das tecnologias aplicáveis é realizada. Alguns exemplos de casos são analisados e alinhadas as propostas metodológicas e contribuições.

- LANDEIRA, J. (SEPOPE, 2014) faz uma análise econômica sobre a implantação de Geração Distribuída Fotovoltaica no Brasil para clientes tipo B3. Para este estudo, foram escolhidas 38 cidades no Brasil, na região de mais de 20 concessionárias, onde para cada caso é calculado o fator de capacidade da usina por meio do *software* PVSYST, considerando, entre outros aspectos, a influência da temperatura nos painéis, as perdas internas da planta, a compensação da inclinação dos painéis com a variação da latitude e uma base de dados de mais de 25 anos com os valores de temperatura e irradiância solar em cada local. Mediante um modelo financeiro baseado na economia de energia anual de uma unidade consumidora com a instalação da usina, vários cenários são criados para ao final concluir sobre a viabilidade desses investimentos por meio da Taxa de Retorno Interno (TIR) dos projetos.
- MACHADO, A.H.B. (UnB, 2014), considerando a importância do fator perdas no planejamento de uma rede de distribuição considerando GD, faz uma análise do tema levando em consideração diversos cenários de localização. Constatou que a curva de carga da unidade que possui uma fonte geradora tem influência no valor das perdas, e que a influência da correlação das curvas de carga e da irradiância solar pode superar a influência da localização.
- EL SAAD, M.M.A (CIGRÉ, 2014, Egito). A inserção da GD de diferentes fontes, localizadas próximas aos centros de carga, provém uma oportunidade para suporte de tensão e redução de perdas na futura operação da rede de distribuição. Nesse sentido, é apresentada metodologia baseada em fluxo de potência, para determinar a localização ótima e tamanho da GD. Esta metodologia foi aplicada na rede de distribuição do Egito. Foram analisadas diversas combinações com a instalação de uma, duas e três unidades de GD com o objetivo de reduzir as perdas totais e aprimorar os níveis de tensão.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO- CESP (ANEEL, 2014). O projeto tem como objetivo estabelecer o diagnóstico atual da Ciência, Tecnologia e Inovação nas cinco grandes temáticas: Geração de Energia e Armazenamento; Transmissão de Energia Elétrica; Distribuição de Energia Elétrica; Eficiência Energética; e Assuntos Sistêmicos. Para o Estado da Arte em Geração Distribuída, foi analisado o capítulo 11 (Geração Distribuída e Microrredes) do volume 5/8 (Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Distribuição de Energia Elétrica). Neste capítulo, foram apresentados os seguintes tópicos: visão do futuro; caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro; e estudo e prospecção das rotas tecnológicas.
- LANDEIRA, J. (SNPTEE, 2013) apresenta cenário econômico e discute a viabilidade, mediante um estudo de caso, de uma planta solar fotovoltaica de minigeração (100 kW) na cidade do Rio de Janeiro para um cliente tipo A4-Convencional à luz dessas resoluções. Com base nos resultados e discussões apresentados neste informe técnico, é possível concluir que, para clientes do tipo A4 Convencional, a minigeração fotovoltaica é viável, embora os retornos sobre o investimento ainda não sejam tão atrativos.

- SANTOS, F.J. (UnB, 2013) amplia os requisitos que devem ser abordados quando do planejamento de redes de distribuição no momento da inserção de GD. Indica que devem ser analisadas as possíveis alterações nos níveis de perdas elétricas, nos parâmetros de qualidade da energia, estabilidade do sistema, regulação de tensão, corrente de curto-circuito, carregamento de condutores e, principalmente, dos transformadores de distribuição. Apon- ta ainda que, dependendo da quantidade de GD, as perdas elétricas podem ser reduzidas quando os carregamentos dos condutores e transformadores operam em valores mais próximos dos valores nominais. Nesse sentido, enfatiza que é importante que seja anali- sado o efeito técnico e econômico de cada impacto, para que as redes como atualmente dimensionadas não sejam empecilhos à inserção da GD.
- TARANTO, G.N (CITENEL, 2013) apresenta uma metodologia de avaliação dos pedidos de co- nexão de GD no sistema da concessionária Ampla (atual Enel), com vistas à operação com ou sem ilhamento intencional. A metodologia engloba análise estática e dinâmica, com estudos de potência, curto-circuito, proteção e estabilidade. Foi apresentado um caso real mostran- do o impacto da entrada de uma Geração Distribuída na hora da ponta de um alimentador.
- OLIVEIRA, M.A.V. (UnB, 2011) apresenta um método iterativo que consegue mensurar as variáveis envolvidas no processo de planejamento de um alimentador radial de uma rede de distribuição quando da instalação de GD. Verificou que, quando se leva em consideração a grande variação da curva de irradiância solar e da curva de carga, o limite de penetração da GD se modifica notavelmente sem que haja alterações nas características do alimenta- dor. Ao longo do ano, a curva de carga muda o seu padrão devido a férias, feriados etc. Já irradiância solar depende da variação do clima, dias de sol, de chuva e da estação do ano. Estas variações do fluxo de potência geram vários impactos para o alimentador, tanto po- sitivos como negativos, que podem restringir a quantidade de GD que se pode instalar, e portanto o planejamento deve levar em conta estas variáveis.
- SHAYANI, R. A. (UnB, 2010) aponta a necessidade de avaliar os impactos causados à rede de distribuição quando da penetração de Geração Distribuída em sistemas radiais, de tal forma que esta nova modalidade de geração de energia pudesse ser implantada de modo seguro, confiável e econômico. Nesse sentido, foi desenvolvido um método iterativo levan- do em conta: as impedâncias da rede primária, da rede de baixa tensão, dos transformado- res, além da tensão de referência da subestação, das cargas dos consumidores e fator de potência. Foram estabelecidos dois critérios que deveriam ser simultaneamente atendidos para que a rede de distribuição pudesse receber a GD sem a necessidade de modificações e/ou reforços: a tensão não deve aumentar acima do valor estabelecido pelas normas, e a capacidade térmica dos condutores e transformadores não deve ser ultrapassada.
- SANS, M.R. (SENDI, 2010) apresenta os principais resultados obtidos no projeto “Otimiza- ção do planejamento da expansão do sistema de distribuição considerando unidades de geração distribuída”, realizado para a Copel, entre 2006 e 2009, no programa de P&D da Aneel. O projeto teve como objetivo estudar uma solução capaz de definir o melhor ponto para alocação de unidades de GD, de modo a trazer benefícios para o sistema, como: dimi-

nuição de perdas, violações no perfil de tensão e sobrecarga. A solução envolveu a técnica de Algoritmos Genéticos aliada a um Fluxo de Potência Ótimo, implementados no sistema de Planejamento de Redes de Distribuição de Média Tensão baseada em geoprocessamento em utilização pela Copel.

- MEEUWSEN (CIGRÉ, 2008, Holanda) elaborou estudos de análise de cenários para o futuro das redes elétricas de distribuição e transmissão na Europa e, em particular, na Holanda, estabelecendo o ano horizonte de 2050 e com a premissa de 50% da demanda ser suprida por fontes renováveis de energia.
- CELLI, G. (CIGRÉ, 2006, Itália) indica que a futura estrutura das redes de distribuição estava sendo pensada por muitos autores, instituições de pesquisa, reguladores e operadores dos sistemas de distribuição. Os conceitos de redes inteligentes, autorrecomposição, estavam sendo empregados para visualizar as possibilidades de controle no contexto da existência de fluxos bidirecionais decorrentes da GD. O autor apresenta um algoritmo para o planejamento ótimo de longo prazo destas redes do futuro, que se apresenta como um complexo problema combinatório, devido à dimensão da rede de distribuição e ao grande número de alternativas a serem exploradas. A efetividade da metodologia foi analisada com aplicação numa parte do sistema de distribuição italiano.

6.2 Marcos Regulatórios Voltados para a Geração Distribuída

Evento	2018	2016	2015	Total
SEPOPE	1			1
CBENS	2			2
UnB		1	1	2
Total	3	1	1	5

- SCOLARI, B.S. (CBENS, 2018) e ABRÃO, A.P. (CBENS, 2018) analisam e apresentam sugestões para o aprimoramento à Resolução Normativa Aneel n.º 482 de 17 de abril de 2012 e sua posterior atualização por meio da Resolução n.º 687 de 24 de novembro de 2015 e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) publicados pela Aneel, que se constituem nos principais marcos regulatórios para a implantação da Geração Distribuída no Brasil.
- JONATHAN, S. (SEPOPE, 2018) apresenta propostas para a regulamentação e a comercialização da energia elétrica em decorrência da penetração massiva de Micro e Minigeração Distribuída. Indica que esta situação provoca um aumento substancial de conexões à rede das empresas distribuidoras que podem conduzir diretamente à necessidade de novas estratégias de gerenciamento e inovação tecnológicas das áreas de comercialização de energia. Surgem modelos de novos planos de negócios que possam ajudar os concessionários neste novo ambiente sem se desacoplar dos direitos dos consumidores no seu novo papel de *prosumers* (consumidores produtores).

- VIEIRA, D. (UnB, 2016), na sua tese, propõe um método para determinação do tipo de incentivo regulatório à GD solar fotovoltaica que leva a maiores benefícios técnicos na rede. Foram estudados os principais impactos e analisadas as diferentes políticas de incentivo. Para o cálculo destes impactos, utilizaram-se técnicas de simulação de Monte Carlo e fluxo de potência, levando-se em consideração as incertezas das curvas de carga das unidades bem como das curvas de irradiância solar da região. Foi ainda realizada análise comparativa da regulação brasileira com políticas adotadas em três países: Reino Unido, Alemanha e Estados Unidos
- MOTA, V.A.S. (UnB, 2015) identificou, em pesquisa de mercado na época, que diversas barreiras ainda atrapalham o desenvolvimento da tecnologia de energia solar no Brasil, citando: tributação, ausência de linhas específicas de financiamento, impostos de importação, processo de conexão ainda não totalmente regulamentado, pouco desenvolvimento da indústria nacional etc. Considerando o cenário de crise hídrica vivido no período de 2013 a 2014, o autor demonstra que, do ponto de vista energético, optar por incentivar massivamente a tecnologia fotovoltaica distribuída é uma opção mais viável economicamente (dentre outras vantagens) do que basear a geração de emergência na tecnologia termelétrica.

6.3 Metodologias Aplicadas ao Estudo da Geração Distribuída

Evento	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2009	Total
SNPTEE				2		1			1	4
SEPOPE	1									1
SENDI			1							1
CITENEL		1						1		2
ANEEL		1			1		1	1	1	5
Total	1	2	1	2	1	1	1	2	2	13

- ROSAS, G.B. (SEPOPE, 2018) apresenta uma metodologia de avaliar as incertezas da geração de energia por fontes eólica e solar nas potências ativas produzidas por geradores convencionais para análise de reserva de energia, nas tensões para o cumprimento com os limites estabelecidos e nas correntes passantes por disjuntores e seccionadores para análise de superação por corrente nominal. A metodologia proposta considera estas incertezas por intermédio da associação da lógica *Fuzzy* à solução de um fluxo de potência ótimo, capaz de processar as redes no nível de subestação e as incertezas das fontes de energia. Os resultados obtidos reforçam a relevância de ferramentas de análise para que os técnicos da área possam realizar os estudos sobre o tema.
- QUIROGA, G.A. (CITENEL, 2017) apresenta metodologia e ferramenta computacional desenvolvida para análise de possíveis impactos causados pela utilização de microgeradores fotovoltaicos e eólicos, conectados a redes de distribuição. As curvas aos geradores distribuídos são modeladas com base no comportamento médio dos insumos disponíveis, como: irradiação solar e velocidade de vento e nas tecnologias existentes. A locali-

zação destes é definida por um algoritmo probabilístico de alocação de GD baseado em medidas de atratividade e em função de variáveis econômicas. Os impactos na rede consideram cenários prospectivos e são determinados pelo diagnóstico dos elementos da rede, monitoramento da carga dos alimentadores e das redes secundárias e, também, da análise dos perfis de tensão, perdas e efetividade da proteção.

- COPEL DISTRIBUIÇÃO S/A – COPEL. (ANEEL, 2017-1). Metodologia de análise, monitoramento e gerenciamento por fontes incentivadas, incluindo dados analíticos; métodos e técnicas de análise; modelos de tecnologias; estações de medição solarimétrica e eólica; e protótipos de sistemas de monitoramento, gerenciamento e análise de assinatura de potência. O projeto de pesquisa proposto envolve a investigação e o desenvolvimento de uma metodologia para análise, monitoramento e gerenciamento da Geração Distribuída por fontes incentivadas cuja motivação é contribuir para a melhoria da eficiência energética e Geração Distribuída. Os resultados da pesquisa incluirão dados analíticos; métodos e técnicas de análise; modelos de tecnologias; estações de medição solarimétrica e eólica; e protótipos de sistemas de monitoramento, gerenciamento e análise de assinatura de potência. Os métodos e técnicas a serem investigados e propostos dizem respeito à análise de radiação solar no Estado, comparativo de tecnologias fotovoltaicas, análise dos impactos da conexão de sistemas de GD a redes de distribuição rurais, análise de potencial eólico em regiões metropolitanas e monitoração de usinas. Será desenvolvido um novo método multicritério de análise de decisão permitindo a avaliação do impacto das características elétricas e disponibilidade em redes de distribuição rurais.
- LEONARDO, M.H.S. (SENDI, 2016) propõe a utilização de duas metodologias de alocação de perdas quando da inserção de unidades de Geração Distribuída num sistema de sub-transmissão de energia. Estes métodos se denominam Método de Substituição e Método do Coeficiente Marginal de Perdas que quantificam a influência da Geração Distribuída nas perdas elétricas totais, utilizando-se de um sistema real de distribuição de alta tensão.
- BORGES, S. (SNPTEE, 2015) propõe o uso da abordagem probabilística e algoritmo genético para alocação ótima de um sistema de distribuição de GD em unidades eólicas, a fim de minimizar as perdas de energia anual. O comportamento aleatório da velocidade do vento foi modelado usando a função de distribuição de probabilidade de *Rayleigh*, enquanto que o sistema IEEE *Reliability Test System* (IEEE-RTS) foi utilizado para modelar as variações de demanda durante o dia. Estes dois modelos são combinados em conjunto para gerar a função custo de perda de energia. Os resultados mostraram que o uso de GD em unidades eólicas permite a redução das perdas anuais de energia em um sistema de distribuição, em comparação a sistemas de distribuição sem GD. A aplicação de técnicas de abordagem probabilística definiu um modelo mais realista que a abordagem tradicional, onde esta não considera a combinação das variações da potência gerada com as oscilações de demanda durante o dia.
- SANTOS, L.L.C. (SNPTEE, 2015). Com a inserção da GD nos estudos de planejamento, se observa uma mudança na curva de carga dos consumidores de baixa e média tensão, se fazendo necessária uma operação e controle diferenciado nas redes de distribuição por parte

das concessionárias, quando comparada à não utilização da GD. O perfil típico da curva de carga sofre mudanças expressivas, devido à utilização da GD em algumas horas no decorrer dos dias. Este trabalho apresenta uma metodologia para o planejamento de sistemas de distribuição considerando a previsão de inserção de Geração Distribuída.

- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL PAULISTA. (ANEEL, 2014). Projeto composto por: i) instalação massiva de geradores fotovoltaicos em alimentador; ii) metodologias para determinar os impactos causados pela instalação de geradores FV; iii) metodologias para integração desses agentes aos sistemas de Geração Distribuída considerando as atividades de manutenção, planejamento e operação. A capacidade de geradores FVs no Brasil deve crescer em razão da divulgação da Resolução n.º 482 da Aneel; da definição das normas técnicas pelas concessionárias; da queda dos preços dessa tecnologia; e do surgimento de empresas no Brasil capacitadas para a formação de mão de obra. Uma vez que as barreiras regulatórias, tecnológicas e econômicas são transpostas, não há por que duvidar que a aplicação desse tipo de tecnologia ganhe força. É estratégico para o setor elétrico antecipar esta situação e desenvolver metodologias e padrões que permitam adequar os sistemas de distribuição a essa nova realidade com o menor custo possível, minimizando os impactos técnicos. Ressalta-se que, embora haja países, como Alemanha e Itália, com elevada quantidade de geradores fotovoltaicos instalados, mesmo nesses países não há consenso sobre as melhores práticas de engenharia e recomendações técnicas de operação e planejamento.
- PRADO, I.P. (SNPTEE, 2013) apresenta uma metodologia eficiente para alocação de unidades de Geração Distribuída, baseada no algoritmo genético de *Chu-Beasley*. Seu desempenho foi comparado com um algoritmo de busca exaustiva e foi constatado que, quando se aumenta a complexidade do sistema, o algoritmo proposto passa a ter mais vantagens, assim se obtém o resultado de forma mais rápida. Tal metodologia foi aplicada em dois sistemas de distribuição. Foram analisados cenários para a inserção de unidades de GD em cada sistema. Como resultado principal, foram obtidos os melhores locais para posicionamento das unidades de GD, como consequência houve uma melhoria nos níveis de tensão.
- LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A. (ANEEL, 2012). O produto é uma metodologia para definição de requisitos para a avaliação de desempenho de plantas de Geração Distribuída (GD) baseadas em inversores de tensão, a exemplo de solar e eólica. Para tanto, será montado um projeto demonstrativo de interligação de plantas de GD à rede da *Light* na UFRJ. O ponto comum entre todas estas novas formas de geração é a interface com a rede elétrica, onde é feita por meio de inversores de tensão. Pouco se sabe sobre o comportamento do sistema de distribuição com a inserção de vários destes equipamentos em paralelo com a rede. Estudos realizados nesta área se limitam a casos de fluxo de potência, porém para a análise da conexão mediante inversores de tensão estes estudos não são suficientes, uma vez que não são capazes de mostrar fenômenos transitórios que ocorrem em tempos na ordem de milissegundo. São utilizados *softwares* de análise de transitórios eletromagnéticos como o PSCAD/EMTDC. Nele é possível modelar a rede elétrica e equipamentos com parâmetros dependentes da frequência, observar eventos como, por exemplo, a ressonância harmônica, o que é crucial para o projeto. Os requisitos existentes são basea-

dos na conexão de máquinas rotativas na rede, sendo que os inversores são equipamentos bem mais flexíveis e podem realizar outras funções além de injetar energia ativa no sistema.

- ZAMORA, F.H.P. (CITENEL, 2011) apresenta o desenvolvimento de um aplicativo de apoio à operação de sistemas de distribuição que contempla técnicas, métodos e algoritmos dedicados ao tratamento rigoroso de redes ativas e não radicais, como ocorre com a inserção de unidades de Geração Distribuída. A ferramenta desenvolvida é amigável e adequada para o uso em diversas simulações importantes para as concessionárias de distribuição de energia. Diversas características inovadoras do aplicativo podem ser destacadas, como a possibilidade de se efetuarem análises com redes reais considerando simultaneamente o impacto em todos os segmentos de distribuição, a utilização simultânea nos cálculos de dados georreferenciados e diagramas esquemáticos, a descrição das curvas de carga e geração com qualquer número de patamares, bem como o emprego de algoritmos evolutivos e de estimação de estados.
- LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A. (ANEEL, 2011) apresenta sistema e ferramenta lúdico-educativa. Estuda capacidade energética de clientes; implementa piloto (inteligência do processo de geração fotovoltaica no edifício do Museu de Energia da LIGHT); otimiza interação com a rede local. Caráter pioneiro na integração inteligente com rede de distribuição. Desenvolvimento de uma Unidade Eletrônica Inteligente e de um Sistema Supervisório para o monitoramento e controle da energia solar. Serão instalados sensores e equipamentos de aquisição de dados para processamento, análise de armazenamento de dados para apresentação ao público. As informações sobre irradiação solar diária, temperatura dos painéis, energia fotovoltaica gerada, produtividade e energia total consumida serão apresentadas na forma de gráficos para o público em geral.
- SOUZA, A.E.E. (SNPTEE, 2009) apresenta metodologia para a definição do melhor ponto de alocação da Geração Distribuída (GD) na rede de distribuição, de modo a trazer benefícios para o sistema como um todo, tais como: diminuição de perdas, das violações no perfil de tensão e de sobrecarga nas linhas. Foi utilizada a técnica dos Algoritmos Genéticos aliada a um fluxo de potência ótimo. Os resultados da metodologia foram apresentados para uma rede de distribuição de 70 barras.
- AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S/A–AMPLA. (ANEEL, 2009). Metodologia para: i) planejamento e operação de GD alimentando áreas adjacentes em caso de pane e demora de restabelecimento do sistema, efetuando o sincronismo automático posterior; ii) interligação de novas GDs ao sistema, considerando análise estática, dinâmica e modelagem de conversores eletrônicos. Com a busca de soluções para a escassez de energia e a desregulamentação do setor, a GD vem ganhando destaque. A GD traz impactos positivos, tais como: suporte de tensão, melhoria na qualidade do suprimento, redução das perdas, melhoria do fator de potência e possibilidade de ilhamento para atendimento local. Surgem, porém, questões críticas na operação, como: aumento nos níveis de curto-circuito, coordenação da proteção, harmônicos devido a conversores, *flicker*, competição por regulação de tensão e problema da flutuação de geração de potência ativa, a qual é condicionada à disponibilidade

de da fonte. O acúmulo tecnológico e o ferramental de análise consolidados ao longo dos anos vêm sendo superados e se impõem à criação de novas bases tecnológicas. O *Simu-Light*, desenvolvido para a *Light*, em P&D Aneel, oferece as características necessárias às análises técnicas, e deverá ser utilizado como ferramenta base para este desenvolvimento, incorporando modificações e ajustes necessários.

6.4 Modelagem de Componentes, Ferramentas Computacionais e Laboratórios

Evento	2018	2017	2015	2014	Total
SEPOPE	1			1	2
SENDI				1	1
CITENEL		1	1		2
ANEEL		1			1
CIGRÉ	2			1	3
Total	3	2	1	3	9

- PIARDI, A.B. (SEPOPE, 2018) apresenta uma infraestrutura laboratorial dedicada ao estudo de microrredes. Este laboratório, previsto para entrar em operação no final de 2018, será instalado junto ao Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos (LASSE), localizado na Fundação Parque Tecnológico de Itaipu. A proposta considera as principais características de laboratórios de referência na simulação de microrredes em âmbito internacional. Os diferenciais dizem respeito à plataforma em tempo real (RTS) e aplicação dos conceitos de *Power Hardware-in-the-Loop* (PHIL).
- KOVÁCS, A. (CIGRÉ, 2018, Hungria). Com o aumento da Geração Distribuída e dispositivos de armazenamento de energia, as microrredes vão se tornar elementos relevantes no sistema de energia elétrica. Nesse sentido, o autor apresenta um simulador de microrredes com a capacidade de estudar diferentes situações de operação, e desempenho de diferentes esquemas de controle. Na simulação de uma microrredes, além da descrição dos componentes de média e baixa tensão da rede de distribuição (linhas, cabos, equipamentos de chaveamento, transformadores), deve ser dada ênfase na modelagem dos seguintes elementos: as fontes de geração (solar, eólica, microturbinas) incluindo a simulação das condições do clima, as cargas das unidades consumidoras, as unidades de armazenamento, sistemas de controle da microrredes.
- RADWAN, A.A (CIGRÉ, 2018, Egito) indica que, com o aumento da GD, a rede tradicional de distribuição se converte numa rede passiva para uma rede ativa. E, nesta nova situação, os Centros de Operação da Distribuição necessitam de ferramentas modernas para modelar e simular o sistema. Nesse sentido, o informe apresenta um novo algoritmo para o cálculo de fluxo de potência. Este novo modelo foi aplicado num sistema remoto de 22 kV no Egito, onde se demonstrou a possibilidade de melhoria da rede pela inserção de duas unidades de GD em tamanho e local otimizados.

- TARANTO, G.N (CITENEL, 2017). O foco principal do projeto é a modelagem da Geração Distribuída conectada à rede da distribuidora via inversores, para as análises estáticas e das dinâmicas eletromecânicas. Os modelos utilizam a representação fasorial na frequência fundamental, podendo ser empregados em redes de sequência positiva, ou em redes desbalanceadas trifásicas. Os modelos têm como objetivo principal a avaliação do impacto da proliferação da GD na rede. O artigo apresenta o impacto que a geração síncrona convencional e a geração conectada via inversores têm no sistema de proteção dos relés de sobrecorrente em um caso exemplo. São mostradas a descoordenação do esquema poupa-fusível e a influência da ligação dos transformadores de acoplamento nos defeitos envolvendo a terra.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL PAULISTA (ANEEL, 2017) objetiva a implantação de laboratório vivo de sustentabilidade energética na UNICAMP, abrangendo: minigeração fotovoltaica e Geração Distribuída; eficiência energética e etiquetagem de edifícios; monitoramento e sensoriamento energético de unidades e equipamentos; e capacitação técnica e divulgação do conhecimento adquirido. O laboratório a ser implantado está dividido em cinco subprojetos que permitirão o desenvolvimento de produtos passíveis de Propriedade Intelectual, como: patente de invenção/modelo de utilidade ou registro de marca para os dispositivos a serem desenvolvidos; proteção intelectual para *softwares* e ferramentas computacionais e publicação do livro Modelo de Campus Sustentável para a América Latina: i) minicentro de operação do sistema elétrica da UNICAMP, que terá um sistema de gerenciamento de energia; ii) miniplantas de geração fotovoltaica que serão responsáveis pela redução do consumo de energia do Campus; iii e iv) *retrofit* de aparelhos de ar-condicionado e o sensoriamento de ambiente, baseado em tecnologias *Internet* das Coisas (IoT); e iv) o conhecimento adquirido será repassado por meio de cursos para graduação e pós-graduação, extensão, treinamentos e *workshops*.
- ORTMANN, M.S. (CITENEL, 2015) apresenta arquitetura de microrredes experimental objetivando a implantação do Laboratório de Microrredes Inteligentes, pela Universidade Federal de Santa Catarina. A microrrede é apresentada pelos componentes da rede e principalmente pela representação dos recursos energéticos distribuídos e as estratégias de controle. Tal arquitetura permitirá estudos, análises e comprovação experimental dos diversos aspectos relacionados às tecnologias dos componentes de uma microrrede inteligente, bem como a sua operação.
- PRIOSTE, F.B. (SEPOPE, 2014). São apresentadas as equações para a modelagem de módulos e arranjos fotovoltaicos e os principais componentes de uma usina fotovoltaica, e realizadas simulações para observar as características dos módulos fotovoltaicos sob diferentes níveis de irradiância e de temperatura. Posteriormente o funcionamento de uma rede de distribuição de média tensão com a interligação de uma usina fotovoltaica foi observado, podendo-se concluir que é necessária uma análise detalhada do perfil de tensão da rede a fim de avaliar os impactos de conexão de sistemas fotovoltaicos.
- ZIMMER, V. (SENDI, 2014) analisa o impacto da inserção de microgeração e microrredes em sistemas de distribuição mediante a análise estática de fluxo de potência. Nesse contexto, foram exploradas questões sobre a modelagem de sistemas de distribuição e os

desafios a serem enfrentados. Abordou-se a modelagem trifásica solucionada pelo método de *Newton-Raphson* em coordenadas retangulares e injeção de corrente, a qual tem demonstrado bons resultados em redes malhadas e com microgeração.

- CIGRÉ BROCHURA 575/2014. É reconhecido que o sucesso da transição do sistema elétrico passivo para um sistema ativo com a predominância de GD depende, principalmente, da disponibilidade de métodos e técnicas que possam simular adequadamente esta nova configuração da rede de energia elétrica. Entretanto, para atendimento desta demanda, nota-se que a indústria, universidades e institutos de pesquisas estão atentos a esta necessidade e desenvolvendo novas ferramentas e modelos para simulação das diversas situações de operação e das diversas possibilidades de proteção e controle neste novo cenário. Por outro lado, foi observada a falta de um sistema *Benchmark* que pudesse facilitar a análise e validação destes novos métodos. Esta deficiência foi sanada pela elaboração e apresentação pela força tarefa do CIGRÉ, de uma configuração de rede para servir de base comum para testes das diferentes concepções de modelos e técnicas. Estabelecer uma base comum para testes da integração de GD e Redes Inteligentes é um desafio muito grande, tendo em vista a diversidade de configuração de sistemas de distribuição. Mesmo assim, foi possível estabelecer um sistema com suficiente flexibilidade para customização das diferentes situações dos Estados Unidos (60 Hz) e Europa (50 Hz). Nesse conceito, foi desenvolvido um conjunto de modelos desde alta a baixa tensão adequado para estudos práticos, a exemplo de fluxo de potência, testes de conversores, planejamento de operação de ilhamento, avaliação de métodos de gestão de energia, coordenação de controle integrado de armazenamento de energia com GD.

6.5 Impactos Decorrentes da Penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição

Evento	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	Total
SNPTEE				1		1		2
SEPOPE							3	3
CBENS			2		1			3
SENDI	1		1				2	4
GESEL	1	1						2
ANEEL			1					1
Total	2	1	4	1	1	1	5	15

- CASTRO, N. (GESEL, 2018) apresenta uma descrição dos potenciais impactos a serem observados pelo Brasil, devido à expansão em larga escala da Geração Distribuída. Estes impactos são de naturezas mais diversas, como econômicas, ambientais, elétricas, dentre outras. No escopo deste estudo, foram examinados e detalhados os seguintes impactos: custos evitados da geração de energia elétrica, postergação de investimento em novas usinas e na rede de transmissão e distribuição, perdas não técnicas, contratos

de comercialização de energia, ambientais, serviços ancilares e diversificação da matriz elétrica brasileira. A metodologia de elaboração deste trabalho teve como base preliminar uma ampla revisão bibliográfica e reuniões técnicas com especialistas de empresas americanas, na busca de métricas para o dimensionamento dos impactos indicados.

- SANTOS, A.M. (SENDI 2018) apresenta um dos critérios para conexão de Geração Distribuída no sistema de distribuição de média tensão da EDP São Paulo. O critério dos 3,5% visa minimizar as perturbações de tensão nos clientes em decorrência da intermitência da injeção de potência pelas gerações distribuídas conectadas ao sistema de distribuição. Esse critério leva em consideração o montante da potência injetada pela GD em função da potência de curto-circuito no ponto de conexão.
- TARANTO, G.N. (GESEL, 2017). Nas considerações finais, o autor indica que os resultados obtidos mediante as simulações mostraram que os principais impactos estão relacionados com a geração compartilhada de grande porte, a minigeração, sendo que os impactos em nível de microgeração foram praticamente inexistentes. A localização da GD nos alimentadores mostrou ser um importante fator no que diz respeito aos impactos. Em geral, as perdas elétricas nos sistemas de distribuição são reduzidas na presença de GD, mas pode aumentar dependendo de níveis acentuados de penetração e da utilização de inversores de controle avançado.
- CAMARGOS, R.S.C. (CBENS, 2016) apresenta um método para análise comparativa dos impactos técnicos da GD fotovoltaica concentrada e pulverizada. Identificou que uma fonte mais concentrada pode causar mais impactos que fontes pulverizadas na rede de distribuição, pois, além de levar trechos dos alimentadores à sobrecarga, provoca aumentos de tensão.
- LOPES, J.A. (CEBENS, 2016) indica que a inserção da GD pode trazer um certo número de problemas com a coordenação dos dispositivos de proteção, pois o sistema real de distribuição possui várias derivações de carga ao longo dos circuitos, podendo ter mais de um dispositivo de proteção na linha entre a subestação e o ponto de conexão da GD. Nesse sentido, as concessionárias serão levadas a promover ajustes nos sistemas de proteção, para não afetar o desempenho do sistema, o que certamente levará à aplicação de tecnologias de redes elétricas inteligentes.
- PRADO, C.C (SENDI, 2016) analisa o impacto que a GD pode causar na margem de estabilidade de tensão. Foi utilizado o caso base do sistema IEEE de 14 barras e com o auxílio do programa ANAREDE, realizadas simulações de fluxo de potência para determinação das curvas PV (relação entre a potência recebida e tensão). Por intermédio dessas curvas, é possível conhecer a distância entre o ponto de operação estável e de instabilidade. Com base nos resultados, foi possível determinar os locais mais apropriados para a inserção de unidades de GD e sua influência na margem de estabilidade de tensão. Concluiu-se que a inserção da GD também pode contribuir para manter a segurança do sistema frente a distúrbios que possam interferir na estabilidade de tensão.

- CENTRAIS ELÉTRICAS MATOGROSSENSE S/A – CEMAT (Aneel, 2016). O projeto pretende construir cenários de penetração dos sistemas de micro e minigeração no sistema elétrico brasileiro a partir de variáveis técnicas e econômicas. Os cenários serão aplicados a um modelo desenvolvido especificamente para medir os impactos econômicos, considerando a legislação e regulação existentes no Brasil. Esta avaliação irá considerar os impactos tanto sobre a receita quanto sobre a necessidade de investimento em troca/adaptação de equipamentos de rede e treinamento de pessoal especializado. Aplicação no simulador de alternativas regulatórias inspiradas na experiência de outros países que possuem uma maior difusão de sistemas de micro e minigeração, para quantificar os efeitos econômicos, considerando a rede de distribuição. Elaboração de propostas de novas legislações e regulamentações, quantificando seus impactos sobre a rede de distribuição. A abordagem quantitativa permitirá, aliada aos aspectos qualitativos, dar um direcionamento objetivo para a escolha de propostas de novas regulamentações, dentre diversas alternativas.
- MELLO, J.B. (SNPTEE, 2015). Este artigo busca debater os avanços necessários para tornar a Geração Distribuída regulada, ou seja, aquela contratada pelas concessionárias de distribuição, uma realidade na expansão do parque gerador brasileiro. Em adição, realiza uma análise de tendências futuras da GD de forma geral dentro da expansão do sistema brasileiro. Isto engloba não só os projetos advindos da GD regulada, que é apenas uma definição regulatória, mas também a natureza dos projetos de GD de forma geral — de menor porte e próximo ao mercado de varejo nas redes das concessionárias de distribuição. Na lógica de desenvolvimento do Brasil de crescer seu mercado, mas com foco na medida certa da modicidade tarifária, a proposta neste artigo busca ofertar soluções que priorizam a competição objetiva pelo mercado de GD regulada. O processo competitivo procura valorizar, de maneira correta, a GD regulada para o sistema e sugere formulações simples para se encontrar o sinal adequado para a implantação de projetos de GD regulada. A GD possui características próprias, que colaboram para a redução de vários custos no sistema, que devem ser considerados em conjunto com o preço final da GD. A proposta de GD regulada apresentada neste artigo busca soluções de repasse compatíveis com a política de desenvolvimento da GD regulada.
- FRIGO, M.M. (CBENS, 2014) pede atenção referente ao aumento das distorções harmônicas na rede que pode prejudicar os índices de qualidade como: fator de potência, desequilíbrios de fase e perdas, além de distúrbios provocados pela distorção harmônica. É possível observar que as distorções harmônicas são mais expressivas no ponto de conexão das unidades e, portanto, este deve ser o mais afastado possível de cargas sensíveis de transformadores e equipamentos e dispositivos de proteção.
- SCHWWENCK, K.J. (SNPTEE, 2013) apresenta alguns impactos causados por sistemas fotovoltaicos distribuídos na rede, de modo a embasar melhorias nas resoluções normativas e tecnologias empregadas. Pelos resultados apresentados, conclui-se que os sistemas distribuídos elevam a magnitude da tensão de atendimento ao consumidor, em alguns casos resultando na infração dos limites de conformidade da tensão, inviabilizando a aplicação desses sistemas por desconexões recorrentes dos inversores. Conclui-se

também que os sistemas distribuídos alteram o fator de potência no ponto de conexão, reduzindo-o, podendo acarretar em cobranças significativas por excedentes de reativos mesmo sem ocorrer alteração na potência reativa da unidade consumidora.

- OLIVEIRA, J.C. (SEPOPE, 2012) aponta os diversos estudos que necessitam ser realizados para garantir uma operação segura da Geração Distribuída na condição de ilhamento. Desse modo, para garantir a estabilidade e a segurança do sistema quando da operação ilhada, devem ser feitos estudos específicos, como estudos de fluxo de potência, curto-circuito, transitórios, eletromecânicos, coordenação da proteção, entre outros. Os estudos devem englobar não só a condição normal de operação da ilha, mas também as perturbações que podem ocorrer durante a operação ilhada, como, por exemplo, variações de carga, perda de grande parte da carga, partida de motores, perda de geração, perda de elementos da rede e ocorrência de curto-circuito. E, visto que cada sistema apresenta características específicas e peculiares, torna-se complexo pontuar os procedimentos necessários para o ilhamento de qualquer área. É possível definir condições e diretrizes gerais, mas para cada área ilhada são necessários estudos individuais.
- ALMEIDA, C.F.M. (SEPOPE, 2012) faz a avaliação do impacto de operações de religamento em sistemas de distribuição com Geração Distribuída. A principal contribuição deve-se ao desenvolvimento de um procedimento genérico para determinar o tamanho máximo de GDs que podem ser conectadas em sistemas de distribuição de energia elétrica sem a possibilidade de risco de dano para os equipamentos de rede da concessionária de energia elétrica.
- SOBRINHO, N.R.B.C. (SEPOPE, 2012) analisa o impacto da perda de Geração Distribuída na estabilidade do sistema elétrico durante perturbações sistêmicas. Este trabalho mostrou o impacto da perda de Geração Distribuída na estabilidade do sistema elétrico durante perturbações que provoquem *deficits* de geração em relação à carga. Conforme observado, para garantir a integração da Geração Distribuída ao Sistema Elétrico Nacional (SIN), sem prejuízos para a segurança do sistema, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estabeleceu regras de acesso apropriadas e definiu requisitos técnicos mínimos, que estão contidos no Submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede. Dessa forma, as novas plantas de Geração Distribuída, integradas ao sistema, já estão atendendo a esses requisitos. No entanto, algumas centrais de Geração Distribuída já existentes ainda não estão enquadradas nesses requisitos técnicos. A experiência tem mostrado que, durante perturbações sistêmicas com *deficits* de geração, essas centrais têm se desligado intempestivamente, em decorrência de atuações incorretas das proteções associadas, caracterizando o não atendimento aos requisitos técnicos estabelecidos. Os desligamentos dessas centrais distribuídas têm agravado os desequilíbrios no balanço entre carga e geração, acentuando os afundamentos da frequência do sistema e provocando a atuação dos esquemas regionais de alívio de carga por subfrequência instalados no SIN.
- SILVA, H.N. (SENDI, 2012) indica que a conexão de Geração Distribuída no sistema elétrico de uma distribuidora interfere sensivelmente nas perdas elétricas. Seu efeito positivo ou negativo depende, entre outros aspectos, do nível de tensão, da topologia do sistema e da

densidade de carga dos alimentadores. As tarifas de uso do sistema de distribuição para as usinas conectadas em tensão acima de 88 kV consideram em sua metodologia de cálculo o efeito locacional como forma de sinalizar economicamente a contribuição dessa usina para o sistema elétrico de distribuição. Nenhuma das legislações atuais privilegia as usinas conectadas em tensão inferior a 88 kV que estão próximas às cargas, em comparação com outras usinas conectadas no sistema de média tensão de distribuição e afastadas dos centros de cargas. Esse vazio regulatório não estimula a inserção de Geração Distribuída próximo à carga em tensão inferior a 88kV, pois o benefício do desconto do transporte é dado a essas fontes, independentemente da sua localização e benefício proporcionado ao sistema elétrico. Na análise dos estudos de conexão realizados pela Cemig Distribuição S.A., para geradores em tensão inferior a 34,5 kV, no período de janeiro de 2010 a fevereiro de 2012, mensurando os benefícios e desvantagens a serem percebidos pela distribuidora com a conexão desses geradores, foi observado que a maioria dos geradores provocou aumento das perdas elétricas. Assim, torna-se necessária a aplicação do sinal locacional para as tarifas de uso do sistema de distribuição de geradores conectados em tensão inferior a 88 kV, para viabilizar a conexão próxima aos centros de carga, o que proporcionaria menor despesa para o gerador e ganhos para o sistema de distribuição.

- SCHWENCK, K.J. (SENDI, 2012). Analisando os resultados apresentados no desenvolvimento desse trabalho, conclui-se que os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica elevam o módulo da tensão de atendimento do consumidor que possui esses sistemas. Nota-se também que essa elevação poderá ser mais crítica ou amena dependendo das condições de operação e características da rede, entre elas, módulo da tensão de referência da rede, módulo da impedância série da linha, relação R/X da linha e potência consumida pela carga. Além disso, pelos resultados apresentados, concluiu-se que quanto maior for a tensão de referência da rede, o módulo da impedância da linha e sua relação R/X, e quanto menor for a potência consumida pela carga, mais crítica será a elevação do módulo da tensão de atendimento para pequenos valores de potência gerada pelo sistema fotovoltaico, caracterizando assim um perfil crítico para a aplicação dessa tecnologia.

6.6 Estudos de Casos com Aplicação de Geração Distribuída

Evento	2018	2017	2015	2014	2013	2012	2011	Total
CBENS	4			1				5
SENDI	2					1		3
GESEL	1							1
UnB		3	1		1		1	6
Total	7	3	1	1	1	1	1	15

- CASTRO, N.; DANTAS, G. (GESEL, 2018). O objetivo deste livro foi apresentar 12 estudos de caso internacionais no âmbito da geração fotovoltaica distribuída. Em todos os casos analisados, foi feita uma ampla revisão das características técnicas, econômicas e

regulatórias vigentes, descritas a evolução das políticas adotadas, discutidos os impactos da difusão e os instrumentos de mitigação desses impactos. Os casos analisados se referem aos seguintes estados americanos e países europeus: Califórnia, Havaí, Nevada, Nova Iorque, Alemanha, Bélgica, Reino Unido, Itália, França, Portugal, Austrália, Japão.

- BENEDITO, R.S. (CBENS, 2018), da Universidade Federal do ABC, apresenta os estudos que foram realizados para investigar os limites de penetração da GD para os campi de Santo André e São Bernardo do Campo, com o auxílio de ferramentas e técnicas de uso livre. Foram utilizados dados reais da conta de energia elétrica e do espaço físico disponível na cobertura dos prédios da Universidade, de forma a quantificar a possível contribuição da geração solar fotovoltaica no consumo de energia elétrica.
- MOREIRA, A.L.M. (CBENS, 2018), do Centro Universitário Alves Faria, utilizou os aplicativos *PVsyst* e *Google Earth Pro* para o dimensionamento do sistema e retorno do investimento ao longo do tempo, enquanto LUCHESSE (CBENS, 2018), da Universidade de Santa Maria, utilizou para os seus estudos o aplicativo *Distribution System Simulator (OpenDSS)*.
- DUARTE M.M. (CBENS, 2018) sugere uma solução técnica e financeiramente viável para energizar 100 % de uma escola pública (Centro de Ensino Médio Taguatinga Norte-DF) utilizando-se de sistemas fotovoltaicos conectados a rede, mas realizando conjuntamente ações de eficiência energética contando principalmente com a troca das lâmpadas existentes por lâmpadas LED.
- CASTRO, O.N.J. (SENDI 2018) apresenta um estudo de caso de sistema de minigeração solar conectado em um alimentador de característica comercial com alto carregamento, sendo a análise do ponto de vista de qualidade de fornecimento de energia na rede de distribuição.
- BARROS, F.A. (SENDI 2018) apresenta a arquitetura de um projeto piloto de microrrede que visa atender a um condomínio residencial, a modelagem do sistema de controle usando Redes de Petri Coloridas e a modelagem e simulação da microrrede usando o *software ATPDraw* para análise do fluxo de carga.
- GREGÓRIO, J. V. (UnB, 2017) apresenta um método para a determinação do modelo elétrico do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, para a determinação das curvas de carga das Unidades Consumidoras e para a simulação no programa *OpenDSS*. Devido à diversidade das instalações da Universidade, há várias curvas de carga, pois elas são influenciadas pelo modo de utilização dos laboratórios e salas de aula. Foi verificado que os níveis de tensão aumentam durante os horários em que a GD injeta energia na rede. Desse modo, algumas medidas preventivas devem ser adotadas. Por outro lado, devido à redução nos picos de potência nos dias úteis, as perdas técnicas foram consideravelmente reduzidas. Já durante os finais de semana, apesar da diminuição da demanda, o fluxo de potência apenas inverteu a sua direção, mantendo as perdas técnicas praticamente inalteradas.

- MEDEIROS, C.V.P. (UnB, 2017). A autora apresenta um estudo de caso referente à inserção de uma minigeração fotovoltaica de 5 MW num alimentador da Companhia Energética de Brasília, com a utilização do aplicativo ANAREDE. Constatou-se que a metodologia aplicada na modelagem do alimentador no ANAREDE é apropriada para o estudo.
- NUNES, B.F.F. (UnB, 2017) realizou uma análise sobre o potencial de energia solar no Distrito Federal, mapeado em 2016 pela Fundação WWF e UnB. Com base nestas informações, foi possível mostrar como a expansão do mercado de GD pode impactar o mercado da CEB. Os impactos diretos e indiretos foram analisados sob as óticas do consumidor final, a distribuidora de energia, estado e meio ambiente.
- ALMEIDA, K.S. (UnB, 2015) desenvolveu estudo de caso, relacionado à Usina Solar de 3 MW que seria instalada no município de Jaíba no norte de Minas Gerais. Esta usina seria instalada em atendimento a um projeto de programa Aneel de P&D. Foi apresentado um procedimento metodológico para nortear os estudos de conexão em regime permanente de uma usina solar fotovoltaica envolvendo a análise da rede básica, os impactos gerados, os possíveis reforços de rede e os custos associados. Com relação aos aspectos de conexão, foi mencionada a necessidade de estudos de proteção e automação da rede.
- URBANETZ, J. (CBENS, 2014) apresentou a experiência da Copel na implantação do primeiro sistema fotovoltaico conectado a sua rede de distribuição. O sistema gerou uma média superior a 700 kWh/mês no primeiro ano de operação (2013). Foi informado que, mesmo com alguns desligamentos durante a fase de homologação, se confirmou ser um sistema bastante eficaz, contribuindo para disseminar esta forma de geração no ambiente urbano.
- CAMARGOS, R. S. C (UnB, 2013), utilizando um método iterativo aplicado a um alimentador radial, analisou cenários de aplicação de GD no prédio da Embaixada Italiana em Brasília. Foi estudada a rede em situação normal de operação e quando da instalação de painéis fotovoltaicos de silício amorfo e painéis policristalino, considerando variações da curva de irradiância solar medido no prédio da Embaixada.
- SOUZA, D.F. (SENDI, 2012) apresenta o sistema fotovoltaico conectado à rede implementado no estádio de futebol Governador Professor Roberto Santos (Pituaçu), localizado na região urbana da cidade de Salvador, Bahia. O projeto é o primeiro dessa natureza no país e previu a aquisição dos equipamentos, instalação, operação e acompanhamento do desempenho do gerador solar fotovoltaico, de potência nominal aproximada de 400 kVp. A energia gerada no local supre cargas do estádio e o excedente é injetado na rede de distribuição da concessionária que, por sua vez, alimenta as cargas do estádio quando a geração não é suficiente. Trata-se do primeiro cliente cativo de uma concessionária de distribuição de energia elétrica que participa do Sistema de Compensação de Energia, modelo conhecido internacionalmente pelo termo *net metering*, no qual a energia ativa gerada compensa a energia ativa consumida, contabilizadas com medidor bidirecional.

- LOPES, L.Z. (UnB, 2011), objetivando realizar simulações computacionais para estudo de casos envolvendo a instalação de GD, criou um alimentador radial para testes. Contendo curvas de carga, curvas de irradiância solar e área disponível para GD, obteve-se um alimentador que permitiu simular os impactos de aumento de tensões nas barras do sistema e sobrecarga nos ramos e transformadores quando elevada penetração de GD é considerada.

6.7 Redes Inteligentes no Contexto da Geração Distribuída

Evento	2016	2015	2013	2012	2010	Total
SNPTTE			1			1
SENDI	1			1		2
UnB		1				1
ANEEL				1	1	2
Total	1	1	1	2	1	6

- BERNARDON, D.P (SENDI, 2016) indica que os sistemas de distribuição estão passando por uma revolução devido às mudanças tecnológicas e regulatórias. Esta nova concepção ocorre sob a ótica das Redes Elétricas Inteligentes, que se caracteriza por integrar uma série de tecnologias, metodologias e procedimentos, contando com o auxílio dos sistemas de informação, comunicação, medição, automação e Geração Distribuída. Os benefícios esperados são: melhor gerenciamento dos sistemas, redução do consumo de energia, de perdas, de custos de operação e manutenção etc. Paralelamente deve provocar mudanças significativas nas técnicas tradicionais de planejamento da expansão. Nesse contexto, o autor apresenta uma nova metodologia para planejamento dos sistemas de distribuição, propondo o desenvolvimento de uma plataforma computacional, *Planning Smart Management - PSM*. Esta arquitetura inclui funcionalidades para análise dos impactos das redes inteligentes nos estudos de planejamento da expansão. O autor acredita que a aplicação desta ferramenta propiciará uma maior assertividade nos investimentos de expansão e/ou postergação destes, fornecendo apoio técnico-científico e agilidade na tomada de decisões.
- HONORIO, L.G. (UnB, 2015) apresenta uma proposta de metodologia de gerenciamento de redes de distribuição para Centros de Despacho da Geração Distribuída usando aplicações de Redes Inteligentes. Utilizou-se de sistemas de monitoramento e gerenciamento dos recursos de manobra, com o intuito de aumentar o limite de injeção de potência de GD. O estudo de caso foi baseado no alimentador de 123 barras do IEEE. Como esperado, cada configuração apresentou um perfil de tensão e corrente distinto, de modo que se pode verificar aquela que pudesse permitir uma maior penetração da GD. Na análise efetuada, os fatores que mais influenciaram a determinação do limite foram: ampacidade dos condutores, presença de reguladores de tensão e capacitores e demanda das unidades consumidoras.

- CASTRO, M.R.V. (SNPTEE, 2013). Este trabalho tem como objetivo apresentar o planejamento da inserção de Geração Distribuída no projeto de *Smart Grid* (rede inteligente) de Parintins, fazendo uso de energia fotovoltaica. São apresentados conceitos gerais sobre o impacto de Geração Distribuída em redes inteligentes por meio da análise de bibliografia sobre o tema. É feita uma descrição do projeto de pesquisa e desenvolvimento, no âmbito da Aneel, de rede inteligente em Parintins, com histórico, contextualização geográfica e dados técnicos, considerando a rede de telecomunicações, bem como o sistema de medição inteligente que está em fase de instalação em Parintins.
- CEB DISTRIBUIÇÃO S/A–CEB-D (ANEEL, 2012). Projeto e implementação de um modelo de microgeração de energia elétrica baseado em energia solar fotovoltaica, e sua avaliação no contexto do uso em cargas inteligentes (estações de carregamento de veículos elétricos). O projeto se justifica pela necessidade da formação de expertise local na área de Geração Distribuída. Com a normatização que estabelece condições gerais para o acesso de Geração Distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, criou-se a necessidade urgente de formação de mão de obra qualificada e da avaliação dos aspectos tecnológicos (usando ferramentas adequadas) dos novos sistemas de microgeração distribuída, além da pesquisa de novos modelos de negócios nesse segmento. Outro elemento motivador é a inserção de veículos elétricos na frota no Brasil (e em especial em Brasília), assim como a necessidade de se começar a acompanhar o comportamento desse novo segmento de mercado consumidor de energia elétrica. A operação de uma pequena frota de veículos elétricos e o monitoramento do seu consumo de perfil de carregamento, por meio de estações com funcionalidade de *Smart Grid*, fornecerão subsídios para a elaboração de novos modelos de negócios para esse segmento.
- OMORI, J.S. (SENDI, 2012) apresenta importantes aspectos sobre a aplicação do conceito de Redes Inteligentes para a integração de Geração Distribuída a partir de painéis fotovoltaicos nas redes de distribuição de baixa tensão. A Copel Distribuição desenvolveu estudos sobre este tema, implantando uma unidade de geração piloto de 8 kW para analisar os detalhes de integração dos equipamentos de geração com a rede de distribuição, constatando, dessa forma, a necessidade e potencialidade de integração com as futuras redes inteligentes.
- LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A (ANEEL, 2010). Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de energia nos consumidores, incluindo novos modelos de tarifação, *load shifting*, controle de GD com armazenamento local e controle de carga de veículos elétricos, otimizando a curva de carga do sistema de distribuição. Com a crescente adição de equipamentos eletroeletrônicos, existe a tendência de acentuação da curva de carga. Esta acentuação pode tornar-se mais significativa quando se leva em conta a tendência de utilização de veículos elétricos. Para mitigar o impacto deste comportamento, o sistema L5 desenvolverá um sistema que aliará *load shifting*, microgeração, armazenamento de energia e novos modelos de tarifação a uma comunicação mais eficiente entre a concessionária e os consumidores. Para os consumidores, este sistema possibilitará o acompanhamento dos veículos, dispositivos de armazenamento e GDs, o manejo de

cargas para horários de menor tarifa e a programação de cargas, de forma a minimizar o valor faturado. Ainda será possível utilizar os sistemas de armazenamento para fornecer energia durante interrupções no fornecimento ou complementar o consumo durante horários de pico. A concessionária então poderá gerenciar cargas no horário de pico.

6.8 Proteção e Controle Aplicados à Geração Distribuída

Evento	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2009	Total
SNPTTE				1		1		1		3
SEPOPE	1									1
SENDI					2		1			3
UnB					1	1	1			3
CITENEL		1		1						2
ANEEL		1	1		2		1		1	6
CIGRÉ	1			1	1		1			4
Total	2	2	2	3	6	2	4	1	1	22

- PRIOSTE, F.B. (SEPOPE, 2018) aborda formas de controle de tensão/potência (ativa e reativa) sob a ótica da IEEE 1547-2018, que possibilita que o controle ativo da tensão possa ser realizado por fontes de geração de energia conectadas em sistemas de distribuição. Para as simulações, foi utilizado o programa *Open Distribution System Simulator (OpenDSS)* do *Electric Power Research Institute (EPRI)*. Conclui-se que efetuar análises de sensibilidade para cada tipo de sistema (distribuição ou transmissão) é um fator decisivo para a escolha de sub ou sobre dimensionamento da potência dos inversores objetivando o controle da tensão.
- MORTON, A.B. (CIGRÉ, 2018, Austrália); ULJANIC, B. (CIGRÉ, 2014, Eslovênia, Bélgica, Áustria); CHEN, R. (CIGRÉ, 2014, China, 2014); GRENARD, S. (CIGRÉ, 2012, França) são autores que apresentam as suas experiências adquiridas nas redes de distribuições de seus países, indicando diferentes estratégias de controle para cada situação, onde os conceitos de redes inteligentes podem igualmente contribuir para mitigação dos impactos relacionados a variações no perfil de tensão, reversão de energia, problemas de harmônicos etc. Estes impactos devem ser cuidadosamente analisados, de modo a fornecer subsídios para que os pontos de conexão sejam adequadamente dimensionados tanto economicamente como tecnicamente.
- GALVÃO, R.R.A. (CITENEL, 2017) apresenta um sistema de monitoramento aplicado a plantas mistas de microgeração distribuída de energia. Serão apresentadas as soluções de *software* e *hardware* que permitem, de modo remoto, a coleta e armazenamento de dados, o acompanhamento do desempenho das unidades de produção e algum nível de atuação sobre o sistema. A solução desenvolvida será instalada para fins de pesquisa e análise de desempenho em plantas de microgeração em dois locais: i) planta de micro-

geração mista (biogás/biometano e fotovoltaica) em Foz do Iguaçu, PR; ii) planta de microgeração fotovoltaica em Porto Velho, RO. Esse tipo de sistema apresenta-se extremamente oportuno no crescente ambiente de Geração Distribuída, uma vez que permitirá o usuário, proprietário de empreendimento, quantificar sua produção de modo *online* ou por meio de um histórico relativo a um período específico e, assim, auxiliá-lo na gestão dos recursos e nas tomadas de decisões com vistas à maximização dos ganhos.

- COPEL DISTRIBUIÇÃO S/A – COPEL (ANEEL, 2017-2). Desenvolvimento de um gerenciador de energia e de um inversor inteligente para minigeração fotovoltaica, capaz de realizar despacho de potência e serviços ancilares com interação da distribuidora, como controle de reativos e sobrevivência a afundamentos e elevações momentâneas de tensões. O projeto propõe desenvolvimento de novas tecnologias capazes de melhorar a confiabilidade de sistemas de alimentação que incluem GD mediante o monitoramento e controle de tais sistemas por parte da distribuidora. É uma nova visão para sistemas de GD buscando que a distribuidora possa operar remotamente os sistemas de GD baseados em sistemas fotovoltaicos, permitindo controle de despacho de potência em minigeração. Tal sistema é particularmente inovador, uma vez que traz novas possibilidades e funcionalidades aos sistemas de GD sob supervisão da distribuidora. Entre os novos conceitos incluídos no sistema proposto está a interatividade entre diferentes sistemas de GD, por meio de sistemas de comunicação remotos, e a formação de uma microrrede inteligente em cada ponto de conexão. Adicionalmente, estudos de viabilidade técnica e de impacto na rede serão realizados e proverão a distribuidora de informações sobre a efetividade do controle de P e Q permitindo estudos sobre possíveis novas regulamentações acerca de tarifação de P e Q em GD.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DE RONDÔNIA S/A - CERON (ANEEL, 2016). Desenvolvimento de um protótipo funcional e cabeça de série de um sistema composto por *hardware* e *software* que fará a conexão de sistema de Geração Distribuída à Rede de Distribuição (RD). Com o crescimento do mercado de GD e a Resolução Normativa da Aneel, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeradores e minigeração à RD, é evidente a necessidade de se investir no desenvolvimento de sistemas de conexão entre a geração alternativa e a RD. O aumento da integração de unidades de GD com a RD causa impactos na operação da RD, como controle de tensão, qualidade de energia, proteção do sistema, níveis de falta e perdas na rede. Unidades de geração podem estar conectadas diretamente à RD ou por intermédio de um conversor eletrônico de energia. Em todos os casos, o fluxo de potência, as perdas na rede e o controle de tensão são afetados. A proposta consiste em desenvolver um sistema de conexão de microgeradores com a RD de energia elétrica, com funções que atendam às exigências das concessionárias e permita a estas a utilização da GD em um Modelo de Geração Virtual de Energia, além de seu monitoramento e gerenciamento remoto mediante aplicativos *WEB* e *mobile*.
- FERRONATO, F.A.S. (CITENEL, 2015) apresenta um sistema integrado formado por painéis fotovoltaicos armazenadores de energia e estação de carga para veículo elétrico (VE) desenvolvido, de maneira a permitir o controle remoto do fluxo de energia entre

seus componentes. Os modos de operação do sistema integrado são controlados por um dispositivo remoto por meio de um algoritmo que utiliza parâmetros do sistema, necessidade de carga do VE e a variação do custo da energia durante o dia (Tarifa Branca) ou em tempo real. São mostrados os desenvolvimentos práticos, equipamentos utilizados e testes realizados.

- MELO, J. (SNPTEE, 2015) apresenta o projeto e a simulação de um microinversor de dois estágios com potência de 300 W e com controle do ponto de máxima potência. Ele, portanto, viabiliza plantas fotovoltaicas conectadas à rede elétrica, já que torna cada painel fotovoltaico independente e, por conseguinte, mais eficiente. Com os microinversores, poder-se-á implantar sistemas autossuficientes (casas, apartamentos, lojas) cujos objetivos são diminuir o gasto com energia (consumidor), com transmissão e distribuição (concessionárias) e, por fim, com aumento urgente de demanda. Há um estímulo à Geração Distribuída, aos sistemas de redes inteligentes.
- CIGRÉ BROCHURA 613/2015 analisa os possíveis impactos nos sistemas de proteção das redes e transformadores de distribuição e os efeitos sobre a frequência e tensão quando da inserção de fontes intermitentes de energia. Foram analisados sistemas de proteção de diversos países como Austrália, Áustria, China, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Itália, Holanda, Noruega, Portugal, Romênia, África do Sul, Espanha e Estados Unidos. A Brochura indica que os sistemas de proteção dos alimentadores dependem de diversos fatores como, por exemplo, estrutura atual, número de instalações de GD, tipo e local da GD, procedimentos dos órgãos reguladores etc. Nesse sentido, não seria possível apresentar recomendações definitivas, entretanto a Brochura apresenta diversas ideias que podem ser aplicadas pelas concessionárias dependendo da estrutura da sua rede de distribuição.
- FERREIRA, R.S. (SENDI 2014) propõe uma formulação matemática para o problema de otimização da estratégia de suporte de reativos, determinando quais os parâmetros de controle devem ser requeridos para o suporte por geradores distribuídos. Esta formulação foi aplicada com sucesso em um estudo de caso de uma microrrede piloto de 20 kW, composta de painéis fotovoltaicos, geração eólica, banco de baterias, gerador diesel de *backup*, sistema de controle e gerenciamento energético e cargas locais despacháveis.
- MELLO, A.P. (SENDI, 2014) apresenta metodologias para análise do problema de reconfiguração de redes de distribuição com Geração Distribuída. São propostas diversas estratégias para compor as análises que caracterizam a operação do sistema de forma dinâmica e em tempo real. São apresentados os resultados para uma rede real de uma concessionária de distribuição considerando diferentes cenários de carga e disponibilidade de geração dos geradores distribuídos.
- PUTTINI, D.M. (UnB, 2014) e FERREIRA, A. A. (UnB, 2013) analisam as possibilidades de operação dos recursos de manobra (elementos do circuito que possibilitam a alteração da distribuição das cargas) dos alimentadores, no sentido de aumentar os limites de penetração da GD. Foram realizadas simulações em diversas configurações.

- LUIZ, C.M. (CIGRÉ, 2014, Brasil), seguindo na mesma linha, apresenta e compara as práticas que vêm sendo adotadas por diversas empresas distribuidoras brasileiras para a conexão de GD e proteção dos alimentadores. As empresas que participaram foram: Celesc(SC), Cemig (MG), Coelba (BA), Copel (PR), CPFL (SP), Elektro (SP), Eletropaulo (SP) e Light (RJ). Os procedimentos adotados por estas empresas foram comparados com as práticas internacionais indicadas pelo IEEE, CIGRÉ e as empresas BC Hydro e Iberdrola.
- OLIVEIRA, L.R. (SNPTEE, 2013) indica que o caminho natural da GD é que ela passe a tomar cada vez mais espaço como complemento da matriz energética do Brasil. Sendo assim, é importante que pesquisas mais avançadas e mais aprofundadas nesta área sejam feitas, de forma a colaborar de modo substancial com o desenvolvimento desta tecnologia no país. O trabalho mostra que controladores P Ressonantes funcionam bem no controle de conversores eletrônicos de painéis fotovoltaicos.
- BELLAN, J. (SENDI, 2012) indica que a conexão de geradores distribuídos via inversores traz diversos impactos técnicos ao funcionamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Embora atualmente as maiores preocupações das concessionárias quanto à inserção de GD sejam relativas aos impactos na distorção das formas de onda de tensões e na elevação do perfil de tensão em regime permanente, esse artigo mostrou, mediante simulações computacionais, que aspectos de estabilidade também podem limitar a conexão desses geradores nas redes de distribuição. Os resultados das simulações apontam que a representação adequada dos controles do inversor nos modelos computacionais é de grande importância para a investigação das condições de estabilidade de inversores conectados em redes de distribuição.
- JUNGES, R.S. (UnB, 2012), na sua dissertação de mestrado, propõe um método de conexão inteligente entre sistemas de Geração Distribuída Fotovoltaica – GDFV e os convencionais alimentadores radiais de distribuição. Ainda considera e executa esquemas de proteção com o controle de tensão e corrente, alterando os parâmetros de geração no ponto de conexão, e permite assistir remotamente pela concessionária de energia. Permite, ainda, um sistema de controle automático de geração, parametrizado pelas leituras e demandas dos alimentadores radiais de distribuição no subsistema abaixo dos transformadores de 13,8V. Neste trabalho, é apresentado o protótipo que resolve os detalhes da conexão fotovoltaica, a lógica de controle, o algoritmo, os detalhamentos construtivos, e os resultados colhidos na sua experimentação. Indica ainda a necessidade de tecnologias que permitam aos dispositivos de conexão migrar de forma segura e eficiente para um modelo de rede mais eficiente e inteligente (*Smart Grid*).
- ELEKTRO ELETRICIDADE E SERVIÇOS S/A - ELEKTRO (ANEEL, 2012) apresenta um aplicativo para análise de erros em medidores eletrônicos de energia elétrica, considerando-se o estado da arte das técnicas de medição de energias ativa e reativa, com foco principal na energia reativa, considerando-se cargas não lineares e cenários de redes com GD. Esta pesquisa se propõe a analisar e comparar as metodologias no estado da arte da medição da energia elétrica, considerando-se os novos cenários de cargas não lineares e GD com

fontes renováveis envolvendo as novas tecnologias de medidores eletrônicos e suas adequações a estes novos cenários. A medição deve ter um compromisso entre possibilidades técnicas de sua implementação, custos de medidores e medição e o rigorismo de sua definição teórica. Nesse contexto, nos atuais cenários da distribuição de energia, a presença de distorções harmônicas e assimetrias nas redes de EE, do ponto de vista energético, podem causar significativos impactos nas definições de potência, nas técnicas de medição e nas formas de faturamento de energia elétrica. Portanto, esta pesquisa compara as metodologias atuais para análise das energias elétricas, com foco principal na medição/aferição/tarificação de energia reativa, considerando a unificação já consolidada para energia ativa, nos cenários reais dos sistemas de distribuição com distorções harmônicas e assimetrias, examinando-se ainda os protocolos de medição em discussão, e avaliando-se os erros de medição de energias em equipamentos de medição eletrônica de interesse da concessionária, com foco nos bidirecionais, considerando-se os novos cenários da distribuição com microrredes, resultando no desenvolvimento de um aplicativo que integre as metodologias de medição e as compare com os registros destes equipamentos.

- MULLAUSEN, J. (SNPTEE, 2011) indica que integração da GD com a rede da concessionária de energia elétrica apresenta desafios para os esquemas anti-ilhamento. Esses esquemas detectam condições de ilhamento e desligam a GD. A falha no desligamento de geradores ilhados pode causar problemas como riscos à segurança das equipes de trabalho, religamento fora de fase e degradação da qualidade de energia. O artigo discute um esquema de detecção de ilhamento baseado na medição de uma área ampla (*Wide-area measurement-based islanding detection scheme – IDS WA*), o qual usa medições com sincronização de tempo para calcular a frequência de escorregamento e a aceleração entre dois sistemas visando detectar condições de ilhamento. O artigo também discute o uso de um simulador digital em tempo real para modelar a GD junto com o resto do sistema, de forma a validar o esquema anti-ilhamento proposto. O desempenho do esquema para diferentes configurações do sistema e condições de fluxo de carga também é apresentado, além de um esquema de ilhamento com sucesso que monitora a troca de potência do sistema, efetua ações corretivas quando ocorre o ilhamento e mantém a qualidade do serviço no sistema ilhado.
- AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S/A–AMPLA (ANEEL, 2009) apresenta equipamento para proteger a rede de distribuição e uma fonte alternativa que esteja conectada a esta mesma rede. O equipamento deverá analisar continuamente as grandezas elétricas e, em tempo real, proteger a fonte alternativa e a rede de distribuição na ocorrência de falhas na rede ou na fonte alternativa. No processo de Geração Distribuída, fontes alternativas de energia devem ser conectadas à rede de distribuição já existente, reforçando-a principalmente nos horários de pico. Uma das vantagens desta metodologia é a diminuição da necessidade de novas usinas para atender somente aos horários de pico. Outra vantagem da abordagem da Geração Distribuída é o menor investimento em linhas de transmissão e subtransmissão, pois as fontes distribuídas podem ser instaladas mais próximas dos novos consumidores. Ocorre que cuidados especiais devem ser considerados quando da interligação de novas fontes de energia sobre uma rede de distribuição já existente, pois toda a coordenação de proteção foi baseada em uma fonte gerando para os consumidores e não o contrário, ou

seja, uma fonte injetando energia na rede de distribuição. Existem equipamentos importados, porém de custo elevado, que realizam esta função de proteção. Neste projeto será desenvolvido equipamento de baixo custo para esta função.

6.9 Microrredes no Contexto da Geração Distribuída

Evento	2018	2017	2015	2014	2010	Total
SENDI				2		2
ANEEL		1				1
CIGRÉ	1		1		1	3
Total	1	1	1	2	1	6

- PIMENTAL, A.X. (CIGRÉ, 2018, Brasil) apresentou um projeto piloto de microrrede num condomínio residencial localizado na cidade de Fortaleza (CE). O autor indica que no Brasil a aplicação de microrredes conectadas às redes de distribuição ainda é incipiente, limitada atualmente a simulações realizadas em universidades e iniciativas isoladas de algumas concessionárias. São discutidos os desafios regulatórios e as oportunidades relacionados à efetiva implementação de microrredes no Brasil.
- COPEL DISTRIBUIÇÃO S/A – COPEL (ANEEL, 2017-3). Implantação de minirrede no Campus do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná com Geração Distribuída (GD) munida de uma extensa rede de monitoramento. Algoritmo computacional que permite o diagnóstico do estado operativo da minirrede. Em relação à análise elétrica da rede, tem-se o desenvolvimento de algoritmos direcionados para a avaliação de estabilidade angular e de tensão a pequenas perturbações de minirredes com geração intermitente via sinais coletados por micro PMUs. Ainda, neste projeto tem-se a implementação de uma microrrede que será conectada à minirrede. Esta rede possuirá diversidade de tecnologias de geração e acumulação, permitindo uma ampla gama de estudos e a avaliação das possíveis interações entre os equipamentos, seus impactos na qualidade e na estabilidade da microrrede, principalmente quando operando ilhada. Nesta microrrede, está prevista a instalação de células combustíveis para auxiliar na regulação de potência gerada pelos geradores fotovoltaicos. No que diz respeito a novas tecnologias, pode-se citar o desenvolvimento de tecnologia de células fotovoltaicas de terceira geração que utilizam novos materiais em sua construção, células fotovoltaicas orgânicas. Nesse contexto, é proposta a síntese de materiais de carbono e seu uso em misturas com polímeros semicondutores para a fabricação de dispositivos de célula solar visando à melhoria de eficiência quântica externa. A implementação da minirrede proposta passará também pela avaliação de emissões atmosféricas em que, neste projeto, serão utilizados ensaios com acreditação internacional. Além disso, a caracterização dos resíduos dos processos térmicos do arranjo deste projeto também pode ser uma contribuição incremental para o conhecimento da área. A utilização das cinzas do processo para captura de carbono pode dar destino adequado a este resíduo, melhorando o compromisso ambiental do processo.

- CIGRÉ BROCHURA 635/2015. *Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience* apresenta os principais elementos necessários para justificar, desenvolver e implementar microrredes. Define o conceito de microrrede, estabelece os tipos principais, indica as tecnologias disponíveis incluindo aquelas relacionadas às fontes de geração, controle, proteção, operação, comunicação e armazenamento de energia. Aspectos comerciais e regulatórios são igualmente analisados, pois podem afetar os serviços que poderiam ser oferecidos por uma microrrede e, conseqüentemente, a sua atratividade econômica.
- TENFEN, D. (SENDI, 2014) apresenta um modelo matemático para o Gerenciamento Energético (GE) de microrredes que pode ser aplicado tanto para o caso da microrrede isolada quanto para o caso conectado à rede principal. O GE tem um papel importante para que uma microrrede possa se tornar viável devido ao fato de colaborar com os aspectos técnicos e econômicos do problema. Além do GE exercer uma função sobre a operação da microrrede, ele pode também atuar no planejamento, sendo executado para simulação de diversos cenários.
- PICA, C.Q. (SENDI, 2014) apresenta o desenvolvimento e resultados do projeto Usina Distrital (Centro de Energia Sustentável da Fundação CERTI – Florianópolis), cujo objetivo foi a concepção, implantação e validação de uma microrrede modelo, que possa viabilizar no curto prazo a integração de mini e microgeração na rede de distribuição. O foco do projeto foi na aplicação de microrredes em áreas urbanas e na busca da viabilidade técnica de soluções comercialmente já disponíveis.
- TAO, L. (CIGRÉ, 2010, Alemanha, Inglaterra, Grécia), objetivando visualizar a rede do futuro, estabeleceu uma plataforma para a formação de banco de dados para receber contribuições de especialistas na área de microrredes, com ênfase no planejamento e avaliação dos seus benefícios. São apresentados os aspectos econômicos, técnicos e ambientais, objetivando a caracterização dos benefícios de implantação de microrredes diante da crescente penetração de fontes renováveis nos sistemas de distribuição. Com base nas experiências reportadas, é apresentado um *roadmap* para o desenvolvimento de microrredes na Europa.

6.10 Armazenamento de Energia na Geração Distribuída

Evento	2017	2008	Total
SNPTEE	1		1
CIGRÉ		1	1
Total	1	1	2

- BOTELHO, F.K. (SNPTEE, 2017) busca modelar matematicamente um dos benefícios da utilização de baterias na rede das distribuidoras em um cenário com alta penetração de geração fotovoltaica distribuída ao armazenar a energia fotovoltaica em horários de carga reduzida e despachá-la nos períodos de maior uso do sistema de transmissão. Os resultados mostram que o benefício do uso da bateria relacionado à contratação do MUST pela distribuidora é muito pequeno para viabilizar o investimento pela distribuidora. Porém, há

diversas outras utilizações cujo benefício econômico não foi quantificado no artigo, como o aumento da confiabilidade da rede e a melhoria na qualidade do fornecimento da energia (tensão e frequência), reduzindo o DEC e FEC das distribuidoras. A tendência é que no futuro a bateria seja um importante ativo para a operação eficiente da rede, como já está acontecendo em outros países no mundo, e a utilização dela representará um ganho tanto de qualidade quanto de economia para os consumidores.

- MICOLANO, E. (CIGRÉ, 2008, Itália). O tema Armazenamento de Energia é bastante abrangente e tem diversas aplicações. O autor apresenta os resultados dos testes experimentais que foram realizados no laboratório do CESI em Milão (Itália), com o objetivo de analisar aplicação de diversos tipos de baterias e célula combustível a hidrogênio junto a um sistema de Geração Distribuída. Ficou demonstrada a efetividade dos sistemas de armazenamento para a melhoria da qualidade de energia num sistema de GD, por meio do controle do fluxo de potência para melhor ajustar a carga com as fontes de geração intermitente. Outros benefícios foram indicados como: melhoria da estabilidade mediante a regulação frequência/tensão, suprimento de suporte de emergência, nivelamento da demanda de pico etc.

6.11 Fontes de Energia na Geração Distribuída

Evento	2017	2015	2012	2011	2010	2009	Total
SNPTEE	1	1		2		3	7
SENDI			2		1		3
Total	1	1	2	2	1	3	10

- FURTADO, J.G.M (SNPTEE, 2017, 2015, 2011, 2009) apresenta, em anos sucessivos, conhecimentos adquiridos e resultados obtidos decorrentes de um projeto de demonstração do Cepel acerca de sistemas de Geração Distribuída de energia elétrica com células a combustível de 5 kW. Indica que sistemas de geração de energia com células a combustível têm sido enfatizados para aplicações no âmbito da Geração Distribuída de energia elétrica em função das crescentes necessidades de incremento da eficiência energética e da redução dos impactos ambientais. Sistemas de geração de energia elétrica com células a combustível (CaC) têm sido considerados para aplicações no âmbito da Geração Distribuída (GD) de energia elétrica e em sistemas de cogeração, uma vez que as CaC são as mais eficientes geradoras de energia elétrica e têm apresentado contínuo declínio dos custos e grande capacidade de reduções de emissões de poluentes causadores de efeito estufa. Este trabalho apresentou os principais resultados de um estudo que avaliou o emprego de CaC no segmento residencial do setor elétrico brasileiro.
- BRIGNOL, W.S. (SENDI, 2012). Com as crescentes modificações que vêm ocorrendo nos sistemas elétricos, principalmente com o advento do conceito das redes inteligentes, a avaliação dos denominados serviços ancilares é essencial para melhorar a qualidade de energia fornecida ao consumidor. Este estudo visa analisar os impactos dos serviços an-

cilares relacionados com a inserção de uma Geração Distribuída que utiliza como matéria-prima o biogás proveniente de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, em um alimentador real da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D). Estas análises são realizadas supondo diferentes potências de inserção, independentemente do tipo de tecnologia que está atuando como GD (microturbinas, grupos motor-gerador OTTO, células a combustível, turbinas a vapor etc).

- RUFATO, E. (SENDI, 2012) apresenta um projeto pioneiro no país para a geração descentralizada de energia elétrica com a utilização de biodigestores a partir de dejetos animais. O propósito da experiência é estudar a viabilidade técnica e econômica de implantação de biodigestores em propriedades rurais dedicadas à suinocultura para, com o gás metano produzido pela decomposição da matéria orgânica coletada, produzir eletricidade para o consumo na própria instalação e, até, para venda do excedente à distribuição local dos serviços. Trata-se da geração de energia por meio da utilização de micro e minigeradores conectados na rede de baixa tensão a partir dos dejetos dos suínos usando biodigestores. Para que possam estar conectados às redes da empresa distribuidora, essas unidades de Geração Distribuída, normalmente de baixa potência, requerem alguns cuidados especiais quanto à sua proteção elétrica e segurança semelhantes aos sistemas e dispositivos que são instalados nas grandes usinas geradoras. Para chegar ao protótipo instalado na Granja Colombari, região de Foz do Iguaçu, a Copel investiu em ensaios de campo, de laboratório e tecnologia sofisticada de estudos elétricos para garantir que a solução proposta de conexão dos microgeradores à rede da empresa não resulte em problemas, mas que constitua uma solução.
- GUTIÉRRES, T.E.F (SNPTEE, 2011). A combinação de sistemas de geração de energia com células a combustível e o emprego de recursos energéticos renováveis têm sido enfatizados como uma forte componente da matriz energética do futuro, uma vez que, dessa forma, se conjuga elevada eficiência de geração com sustentabilidade ambiental. Essas perspectivas são ainda consideradas no âmbito da Geração Distribuída de energia conectada à rede inteligente, possibilitando o comércio bidirecional de energia num ambiente de qualidade, confiabilidade e segurança energética. O presente trabalho avalia uma configuração de sistema de geração com células a combustível a partir do uso do etanol oriundo de biomassa como combustível primário. Os resultados obtidos mostram que o sistema de geração possui características bastante adequadas para operação em conexão com a rede elétrica inteligente e com os desenvolvimentos tecnológicos que têm sido considerados e o incremento das restrições ambientais. Sistemas de geração desse tipo são fortes candidatos como possibilidades iniciais de geração renovável e energeticamente eficiente.
- BERTARELLO, G. (SENDI, 2010) analisa as conexões de unidades de Geração Distribuída em alimentadores da rede de concessionária RGE-Rio Grande Energia. Foram estudadas as diferentes formas de produção de energia elétrica mediante fontes renováveis: gás natural, biomassa e eólica com simulações na plataforma computacional *MatLab*.
- BARIN, A. (SNPTEE, 2009) apresenta uma metodologia para tomada de decisão multicritério que visa ao gerenciamento mais adequado de sistemas renováveis de energia consi-

derando as características fundamentais de operação e aplicação destes sistemas. Neste trabalho, serão avaliados os principais sistemas de Geração Distribuída que podem fazer uso de fontes primárias renováveis, tais como: painéis fotovoltaicos, aerogeradores, microturbinas e células de combustível com uso de biogás. O estudo analisa os seguintes critérios: eficiência, custos, maturidade tecnológica, impactos ambientais, amplitude de atuação do sistema e vida útil. Por fim, será apresentada uma classificação em ordem de prioridade para o uso destas fontes comparando resultados provenientes da aplicação do método AHP e da lógica *Fuzzy* para os cenários custos e meio ambiente. Levando em consideração o crescente aumento da participação de fontes alternativas e renováveis de energia na matriz energética mundial e no atual contexto do setor elétrico brasileiro, é necessário reconhecer a importância da utilização de metodologias que avaliem da melhor forma a gestão das diversas características que compõem um sistema de geração e consumo de energia. Com isto, será possível extrair-se a máxima eficiência no uso de fontes de gerações distribuídas.

- COSTA, D.M. (SNPTEE – 2009) apresenta uma breve introdução sobre a inserção da microturbina como Geração Distribuída, realizando um levantamento das suas características de funcionamento e analisando seus aspectos tanto elétricos como mecânicos. Em seguida, foi mostrada uma abordagem simplificada da modelagem de uma microturbina, examinando a dinâmica de funcionamento dos seguintes controles da microturbina: controle de velocidade, temperatura, velocidade e combustível: a partir dos resultados obtidos dos controles, pode-se ter um conhecimento mais aprofundado sobre a hierarquia de funcionamento dos controles de uma microturbina. A conexão da turbina com a rede está a cargo do inversor multinível que, dentro de suas características, pode, entre suas células, adicionar outras formas de geração, como, por exemplo, painéis fotovoltaicos, células combustíveis entre outras tecnologias. Estes estudos são importantes, pois as microturbinas podem ser utilizadas como fonte de Geração Distribuída em sistemas de distribuição atendidos em médias e baixas tensões. É o caso, por exemplo, de sistemas que utilizam a biomassa para a produção de biogás. O calor produzido pela microturbina pode ser reutilizado para aquecimento doméstico ou para produção de mais energia elétrica. Em todos os casos, a eficiência do processo aumenta, tornando mais atrativo o uso das microturbinas.

6.12 Tarifas

Evento	2015	2013	2010	Total
SNPTEE	1	2		3
ANEEL			1	1
Total	1	2	1	4

- AMARAL, R.C. (SNPTEE, 2015) aborda o uso da Energia Solar Fotovoltaica (ESF) por meio do mecanismo de *net metering* (compensação financeira) sobre o ponto de vista e perspectiva de uma distribuidora de energia, esta em tamanho e abrangência, que pode ser

comparada ao país Portugal. Simulações feitas ilustram benefícios econômicos de ESF por intermédio de *net metering*, além de que a proposta apresentada mostra a influência deste mecanismo em diferentes setores tarifários mediante a análise do custo final de energia, considerando que seja atingida uma cota com GD de 10% da sua capacidade total energética com ESF. Os cenários estipulados preveem em primeiro momento exclusividade para unidade residencial, comercial ou industrial. A área real de estudo é delimitada e muito semelhante à de Portugal, valores discutidos para o projeto somam 756 MWp com ESF, além de fomentar novas práticas e diversidade de fontes para regiões brasileiras com menor irradiação solar que médias nacionais.

- SANTOS, L.L.C. (SNPTEE, 2013) indica que a instalação de medidores inteligentes decorrentes da aplicação de Redes Inteligentes e Geração Distribuída propiciará a aplicação de Tarifa Horária Branca para os consumidores de baixa tensão. Adicionalmente, também haverá um aumento significativo de fontes de Geração Distribuída conectadas às redes de distribuição. A proposta do trabalho é analisar o impacto da Tarifa Branca e Geração Distribuída nos consumidores residenciais, verificando a viabilidade técnica e econômica. Os resultados práticos mostram que a utilização de GD e Tarifa Branca, sem alterar a curva de carga dos consumidores, reflete uma economia aos consumidores, com retorno de seus investimentos em médio prazo, principalmente considerando a redução dos preços de GD.
- PRADO, F.A.A. (SNPTEE, 2013) avalia diversos aspectos determinantes na concepção das políticas públicas que tratam das Tarifas *Feed In*, em especial os critérios de elegibilidade das tecnologias e também das unidades geradoras (tamanho, localização, percentual do mercado já atendido, entre outros). Analisa ainda os critérios tarifários e sua aderência com os prazos de contrato, com as tecnologias empregadas e com a metodologia de quantificação da energia comercializada, tratando também de outras alternativas para incentivo além das tradicionais tarifas prêmios, como, por exemplo, financiamento com juros subsidiados, ou critérios de amortização acelerada. Finalmente aborda os procedimentos de acompanhamento e avaliação do progresso e eficácia da política com os devidos instrumentos legais para implementação da política e de ajustes caso necessários. Uma análise das experiências internacionais demonstra que a recente iniciativa brasileira pela política de *net metering* de certa maneira pode ser incentivada de forma mais acentuada. Este relativo atraso pode ser justificado pela evidente predominância da matriz energética brasileira em energias renováveis.
- COMPANHIA ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA – COELBA (ANEEL, 2010). Conhecimento e definição de estratégia para enfrentamento dos impactos e oportunidades de negócios das distribuidoras de energia elétrica a partir da implantação de políticas de compra compulsória de energia a partir de fontes renováveis. O agravamento de questões ambientais relativas ao tema de Mudanças Climáticas vem despertando o interesse por políticas mais efetivas na promoção de tecnologias de energia renovável. Entre as mais diversas políticas, aquelas denominadas por *Feed In Tariffs* - FITs vêm ganhando força com sua maciça utilização em todo o mundo. A bibliografia registra mais de 40 expe-

riências diferentes em todo o mundo. As FITs se constituem em regras regulatórias que tornam compulsórias compras de energia elétrica gerada de forma distribuída por consumidores em instalações de pequeno porte, por parte das distribuidoras. Usualmente essa compra ocorre com uma tarifa prêmio (superior às tarifas de fornecimento) visando à promoção da amortização do investimento das instalações de geração e ampliação do efeito escala de produção desses equipamentos.

6.13 Novos Negócios

Evento	2016	2015	2010	Total
SENDI	1		1	2
ANEEL		1		1
Total	1	1	1	3

- GONÇALVES, N.P (SENDI, 2016) analisa a viabilidade econômica e financeira de uma empresa de locação de painéis fotovoltaicos destinados a consumidores cativos, ligados às redes de distribuição de energia elétrica. Demonstra que este novo modelo de negócios possui características naturais favoráveis.
- BANDEIRANTE ENERGIA S/A (ANEEL, 2015). Este projeto visa à utilização da Geração Distribuída urbana com sistemas solares fotovoltaicos descentralizados e armazenamento de curto prazo visando avaliar os serviços ancilares para estabilidade da rede, avaliação dos impactos para a distribuidora e desenvolvimento de novos modelos de negócio. Adicionalmente, por meio de pequenos bancos de baterias dimensionados para este fim, estes micros e minigeradores pulverizados ao longo dos sistemas de distribuição urbanos podem oferecer suporte à rede elétrica e evitar demandar potência da rede no horário de ponta. Sob a ótica da concessionária de distribuição, ao contrário do que pode a princípio parecer como uma potencial fonte de perda de receita, a autogeração de eletricidade pela UC se apresenta como uma oportunidade. Novos modelos de negócio podem ser concebidos com o objetivo de trazer para a distribuidora um novo negócio por meio da GD solar. Aliam-se a estes aspectos os serviços ancilares que potencialmente a GD solar pode oferecer para a distribuidora.
- GAMA, P.H.R.P. (SENDI, 2010) apresenta uma nova metodologia que permite aproveitar a Geração Distribuída excedente dos usuários industriais com potencial de geração de recursos ou fontes próprias chamadas de Geração Distribuída. A metodologia pretendeu obter conhecimento de toda a GD da área de concessão da Bandeirante Energia, tanto da geração existente cadastrada ou não pelo órgão regulador, bem como a geração potencial.

6.14 Resumo

O quadro e os gráficos a seguir apresentam a distribuição dos informes selecionados por cada um dos temas analisados. Pode-se notar que os temas Planejamento (22) e Proteção (22) receberam o maior número de contribuições seguido dos temas Impactos (14), Metodologia (13) e Estudos (13).

Evento	SNPTÉE	SEPOPE	CBENS	SENDI	GESEL	UnB	CITENEL	ANEEL	CIGRÉ	Total
Planejamento	2	3	4	1	1	5	1	1	4	22
Marcos		1	2			2				5
Metodologia	4	1		1			2	5		13
Modelagem		2		1			2	1	3	9
Impactos	2	3	3	4	2			1		15
Estudos			5	3	1	6				15
Redes	1			2		1		2		6
Proteção	3	1		3		3	2	4	6	22
Microrredes				2				1	3	6
Armazenamento	1								1	2
Fontes	7			3						10
Tarifas	3							1		4
Negócios				2				1		3
Total	23	11	14	22	4	17	7	17	17	132

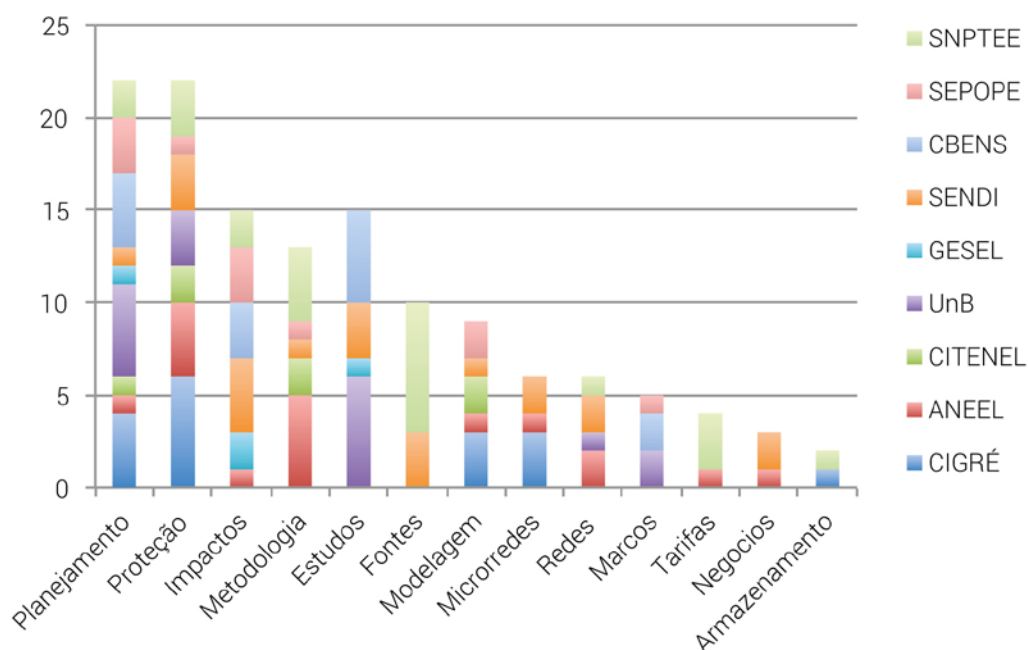


Figura 5. Número de informes por tema e por evento

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões a seguir indicadas foram baseadas nos resumos apresentados no item anterior.

7.1 Planejamento da Geração Distribuída

As metodologias, ferramentas computacionais e estudos necessários para a execução do planejamento da expansão da rede de distribuição devem ser atualizados de forma a contemplar um cenário de novas tecnologias. Deve-se considerar não somente a difusão de micro e minigeração, a crescente importância do gerenciamento da demanda, como também a futura participação de veículos elétricos em conjunto com dispositivos de armazenamento atuando sob a guarda de plataforma de redes inteligentes. Nesse sentido, devem-se analisar os aspectos associados a contratos de energia existentes, perda de faturamento da distribuidora, necessidade de investimentos em novos equipamentos de rede para lidar, por exemplo, com fluxos reversos de energia, implantação de novos procedimentos e ferramentas associadas à operação e manutenção, implantação de novos índices de qualidade dos serviços, implantação de novos critérios de segurança, aspectos de planejamento de ampliações e reforços na rede e, finalmente, novos critérios de contratação de energia.

Metodologias, algoritmos, ferramentas computacionais, critérios utilizados para o planejamento da expansão da rede de distribuição, devem ser revisitados e atualizados, de forma a contemplar novos cenários de inovações tecnológicas com a crescente inserção de GD e, futuramente, a inserção de veículos elétricos e dispositivos de armazenamento de energia. Nesse novo cenário, deve-se cada vez mais aplicar os conceitos de redes elétricas inteligentes.

7.2 Marcos Regulatórios Voltados para a Geração Distribuída

Os principais marcos regulatórios para a GD são as Resoluções n.º 482/2012 e n.º 687/2015 e os módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist). Autores apresentam diversas sugestões para o aprimoramento destes marcos regulatórios e indicam igualmente sugestões de políticas de incentivo para acelerar a utilização de GD. Alegam que existem diversas barreiras que ainda atrapalham o desenvolvimento da tecnologia solar no Brasil, citando, por exemplo, tributação, financiamento, impostos de importação, pouco desenvolvimento da indústria nacional e aumento substancial de conexões de GD às redes de distribuição, que podem conduzir à necessidade de novas estratégias de gerenciamento e comercialização.

A atual experiência brasileira na implantação da GD já apresenta indicadores suficientes para demandar aprimoramento das Resoluções n.º 482/2012 e n.º 687/2015 e os módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist).

7.3 Metodologias Aplicadas ao Estudo da Geração Distribuída

São apresentados diversos trabalhos de formulação de metodologias para análise dos aspectos decorrentes da inserção de Geração Distribuída nos sistemas de distribuição. Fatores importantes são considerados, como: incertezas da potência ativa gerada devido à intermitência das fontes, haja vista a variação da irradiância solar e velocidade do vento. As metodologias visam: planejar as redes de distribuição na presença da GD; identificar e avaliar os impactos na rede de distribuição; reduzir as perdas técnicas; estabelecer em bases probabilísticas os pontos mais atrativos para alocação das fontes, monitorar; e avaliar o desempenho das fontes.

Os informes analisados indicam a necessidade de metodologias, algoritmos matemáticos e ferramentas computacionais que possam analisar com segurança e exatidão os diversos aspectos decorrentes da inserção de fontes de geração intermitentes na rede de distribuição.

7.4 Modelagem de Componentes, Ferramentas Computacionais e Laboratórios

As novas ferramentas computacionais desenvolvidas para análise da inserção da GD nas redes de distribuição necessitam do desenvolvimento de modelos que possam simular os diversos componentes e variáveis envolvidos nesta configuração, como, por exemplo, inversores das fontes de geração, condições do clima, curvas de carga dos consumidores, unidades de armazenamento, dispositivos de proteção e controle etc. Torna-se igualmente necessária a implantação de estrutura laboratorial dedicada aos estudos de impactos, estudo das condições operativas das microrredes ou mesmo de simuladores capazes de estudar as diferentes situações operativas e analisar o desempenho de diferentes esquemas de controle. Deve-se enfatizar que os Centros de Operação da Distribuição necessitam de ferramentas modernas para modelar e simular o sistema, acompanhando as inovações tecnológicas implantadas.

Uma força tarefa do CIGRÉ estabeleceu uma base comum (*benchmark*) para testes das novas ferramentas e modelos para simulação das diversas situações de operação e das diversas possibilidades de proteção e controle aos novos cenários. Embora reconhecendo a dificuldade de estabelecer esta base comum para testes de integração de GD e Redes Inteligentes, foi possível construir um sistema com suficiente flexibilidade para customização das diferentes situações na Europa e Estados Unidos. Assim, foi desenvolvido um conjunto de modelos de alta e baixa tensão adequados para os estudos: fluxo de potência, testes de conversores, planejamento da operação de ilhamento, avaliação dos métodos de gestão de energia, coordenação de controle integrado de armazenamento de energia com GD etc. No Brasil, seria altamente recomendável formar parceria entre as empresas, objetivando desenvolver uma base comum de testes para as configurações típicas das distribuidoras brasileiras.

7.5 Impactos Decorrentes da Penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição

A Geração Distribuída pode apresentar impactos para os consumidores e concessionárias, influenciando principalmente o perfil de tensão, estabilidade do sistema e qualidade de energia. Nesse sentido, diversos estudos vêm sendo realizados para a escolha da modelagem mais adequada dos componentes do sistema, da escolha das ferramentas computacionais e laboratoriais mais apropriadas, para a definição dos critérios, para a determinação dos limites de penetração das fontes renováveis e, finalmente, para a identificação e quantificação técnica e econômica das medidas mitigadoras para a resolução das situações de superação.

Alguns informes pedem atenção em relação ao aumento das distorções harmônicas na rede que pode prejudicar os índices de qualidade como: fator de potência, desequilíbrios de fase e perdas, além de distúrbios provocados pela distorção harmônica. É possível observar que as distorções harmônicas são mais expressivas no ponto de conexão das unidades e, portanto, este deve ser o mais afastado possível de cargas sensíveis, de transformadores e equipamentos e dispositivos de proteção,

Deve-se igualmente quantificar as perdas quando da inserção da GD. O seu efeito positivo ou negativo depende principalmente do nível de tensão, da topologia do sistema, da densidade de carga dos alimentadores.

Com relação às empresas distribuidoras de energia, deve-se analisar os impactos econômicos tanto sob a receita como a necessidade de troca ou adaptação de equipamentos de rede e treinamento de pessoal especializado no tema. Esta análise permitiria obter subsídios para apresentação de sugestões de melhoria da regulamentação vigente.

Com relação ao Brasil, será necessário avaliar o impacto devido à expansão em larga escala da Geração Distribuída. Estes impactos são de naturezas mais diversas, como econômicas, ambientais, elétricas, custos evitados da geração de energia elétrica, postergação de investimento em novas usinas e na rede de transmissão e distribuição, contratos de comercialização de energia, ambientais, serviços ancilares e diversificação da matriz elétrica brasileira.

Torna-se necessária a definição e determinação de métricas para a caracterização dos impactos, devido à inserção de GD nas redes de distribuição, considerando o nível de tensão do sistema elétrico, os diferentes tipos de consumidores e localização da distribuidora.

7.6 Estudos de Casos com Aplicação de Geração Distribuída

Em outubro de 2016, a Aneel publicou a Chamada n.º 001/2016 – Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D. Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior. Como fator motivador para a Chamada, a Aneel informa que, de acordo com a Secretaria de Ensino Superior (SESu) do Ministério de Educação, em 2015, o valor total da fatura de energia elétrica das 63 Universidades Federais foi de cerca de R\$ 430.000.000,00 (quatrocentos e trinta milhões de reais). Reconhecendo, entretanto, que parte considerável desses gastos se deve ao uso de equipamentos ineficientes e a práticas inadequadas de instalação, entre outros inconvenientes, como a falta de cultura de uso eficiente e racional de energia no país. Nesse sentido, a chamada esperava que os projetos apresenta-

dos pudessem: facilitar a inserção da minigeração no setor público, avaliar a viabilidade econômica da geração própria de energia e seus impactos nos sistemas de distribuição, fomentar o treinamento e capacitação em eficiência energética e Geração Distribuída etc. Nesse contexto, no VII CBENS realizado em 2018, foram apresentados alguns informes relacionados a projetos decorrentes desta Chamada da Aneel, dentre os quais pode-se indicar: a Universidade Federal do ABC (São Paulo), Centro Universitário Alves Faria (Goiás) e Universidade Federal de Santa Maria (Rio Grande do Sul). Deve-se ressaltar a produção científica da Universidade de Brasília, apresentando casos referentes a uma instituição de ensino e Embaixada da Itália, e potencial de energia solar do Distrito Federal.

Importante indicar igualmente o livro publicado pelo GESEL com apresentação de 12 estudos de casos de empresas internacionais.

No âmbito da Chamada Aneel n.º 001/2016, espera-se para os próximos eventos a publicação de estudos de casos das demais universidades que participam deste projeto. Será importante conhecer as atividades realizadas para promoção simultânea de ações de eficiência energética com a implantação de planta solar com o objetivo da redução do consumo de energia.

7.7 Redes Inteligentes no Contexto da Geração Distribuída

São diversos os conceitos de uma rede inteligente. Dentre eles, apresenta-se a seguir o conceito apresentado pela China, que tem foco em todos os setores de um sistema de potência, incluindo geração, transmissão, distribuição e armazenamento. Assim, uma rede inteligente é definida como: “Integração de fontes renováveis de energia, novos materiais, equipamentos avançados, telecomunicação e informação, controle e supervisão e tecnologia de armazenamento, de maneira a apoiar a gestão digital, decisões inteligentes e transações interativas entre geração, transmissão e distribuição”. Por este conceito, pode-se indicar que as redes inteligentes teriam o papel de interligar todas as tecnologias, que certamente vão desempenhar um papel crucial na transição para uma rede elétrica sustentável no futuro próximo.

7.8 Proteção e Controle Aplicados à Geração Distribuída

Cuidados especiais devem ser considerados quando da inserção de GD numa rede existente de distribuição, pois todo o controle de tensão e coordenação da proteção dos alimentadores e transformadores foram baseados na premissa de um fluxo de potência para o consumidor sem considerar a possibilidade de fluxos bidirecionais. Nesse sentido, surgem novas estratégias de operação, novos instrumentos de medição e monitoramento, conversores eletrônicos mais inteligentes e novas ferramentas computacionais etc. Nesse contexto, os pontos de conexão devem ser cuidadosamente analisados e dimensionados técnica e economicamente para poder efetivamente contribuir para a mitigação dos impactos decorrentes da inserção da GD. Foram apresentadas diversas soluções tecnológicas como, por exemplo, dispositivos de monitoramento, que permitam, de modo remoto, a coleta e armazenamento de dados, o acompanhamento do desempenho das fontes de geração que permita algum nível de atuação sobre o sistema, gerenciador de energia e inversor inteligente capaz de realizar despacho de potência e

serviços ancilares como o controle de reativos e sobrevivência a afundamentos e elevação momentâneas de tensão, formação de uma microrrede inteligente no ponto de conexão que permita, por meio de sistemas de comunicação remotos, enviar dados para a supervisão das distribuidoras, soluções para evitar o ilhamento dos sistemas providos de GD etc. São igualmente apresentadas metodologias para a otimização estratégica de suporte de reativos e reconfiguração das redes analisando as possibilidades de operação dos recursos de manobra.

Será necessário reforçar as pesquisas no sentido de garantir uma conexão segura da GD com as redes de distribuições, analisando aspectos de proteção, controle, monitoramento de desempenho, gerenciador de energia e novas metodologias e aplicativos de estudos. Pilotos de conversores inteligentes e de microrredes nos pontos de conexão devem ser dimensionados e instalados para que se possam quantificar os custos e benefícios.

7.9 Microrredes no Contexto da Geração Distribuída

A definição da Microrrede segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. Energy Department – DoE) é a seguinte: “Um grupo de cargas e recursos energéticos distribuídos (DER) e interligados com fronteiras elétricas claramente definidas que atuam como uma única entidade controlável em relação à rede e podem se conectar e desconectar do *grid* para permitir que opere tanto conectado ao *grid* quanto em modo ilhado.” A inserção da GD na distribuição pode ensejar em muitas situações à formação de microrredes específicas.

Os trabalhos selecionados apresentam alguns projetos pilotos de microrredes (condomínio residencial localizado em Fortaleza, Campus da Universidade Federal do Paraná e Centro de Energia Sustentável da Fundação CERTI – Florianópolis). Objetivam analisar os aspectos regulatórios, técnicos, econômicos, comerciais, ambientais, de modo que seja determinar a atratividade econômica e mesmo identificar novos negócios para as empresas distribuidoras.

Para o efetivo estudo da operação das microrredes, é necessário o desenvolvimento de algoritmos e modelos matemáticos que possam representar este tipo de configuração e seus componentes, quer operando isoladamente, quer conectada à rede de distribuição.

7.10 Armazenamento de Energia na Geração Distribuída

Estudos vêm demonstrando que existem diversos benefícios da implantação de sistemas de armazenamento de energia junto a um sistema de Geração Distribuída, como, por exemplo, melhoria da qualidade de energia, melhoria da estabilidade por meio da regulação frequência/tensão, suprimento de suporte durante emergência, nivelamento da demanda de pico.

Demonstrados os benefícios que um sistema de armazenamento pode trazer para a rede de distribuição, quando instalado principalmente junto a um sistema de Geração Distribuída, devem-se analisar e detalhar os aspectos técnicos e econômicos e outros fatores motivadores que poderiam ser deflagrados no sentido de acelerar esta aplicação.

7.11 Fontes de Energia na Geração Distribuída

Foi dada ênfase neste trabalho à utilização de energia solar fotovoltaica para a formação de um sistema de Geração Distribuída. Entretanto, existem diversas outras fontes de energia possíveis de serem utilizadas neste tipo de configuração. Podem-se citar, por exemplo, aerogeradores, células a combustível, microturbinas que podem utilizar como combustíveis: biogás proveniente de resíduo sólido urbano, biodigestores de propriedade rurais dedicadas à suinocultura, etanol oriundo da biomassa. A efetiva utilização destas outras fontes de energia num sistema de Geração Distribuída impõe a necessidade de analisar diversos critérios, como, por exemplo, custos, eficiência, maturidade tecnológica, impactos ambientais, segurança, vida útil etc.

Para a efetiva aplicação de outras fontes de energia num sistema de GD, visualiza-se a necessidade de desenvolvimento de novas metodologias e novas ferramentas computacionais, de modo a poder avaliar as diferentes características técnicas e operacionais de cada uma.

7.12 Tarifas

A Resolução Aneel n.º 482/2012, com as devidas alterações da Resolução Aneel n.º 687/2015, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Define, também, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, que é o sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.

Os informes apresentados deste bloco discutem a aplicação do sistema adotado no Brasil (Compensação de Energia – *net metering*) com políticas adotadas por outros países, especialmente a Tarifa *Feed In*, onde a energia produzida pelos consumidores é compulsoriamente comprada pelas distribuidoras e usualmente por uma tarifa superior à tarifa de fornecimento convencional (Tarifa Prêmio), de forma a promover a amortização do investimento e motivar outros consumidores na produção de energia limpa.

Um informe analisa o impacto da Geração Distribuída em conjunto com a Tarifa Branca (flexibilidade de alteração dos hábitos de consumo durante os horários de maior carregamento do sistema elétrico) nos consumidores residenciais verificando sua viabilidade técnico-econômica. Concluiu-se que estas medidas se traduzem em economia para os consumidores com retorno de seus investimentos a curto prazo.

O sistema brasileiro de compensação de energia regulamentado pela Aneel é um fator suficiente para aumentar o mercado de Geração Distribuída, ou são necessárias medidas complementares? Este é um tema atualmente em discussão.

7.13 Novos Negócios

Na perspectiva de perda de receita das distribuidoras em decorrência da produção de energia por parte das unidades consumidoras, começam a surgir iniciativas de novos negócios, de forma que seja mantida a rentabilidade das empresas. São citados, por exemplo, locação de painéis fotovoltaicos e metodologia para aproveitamento dos excedentes dos usuários industriais. Outra sugestão seria prover as instalações de GD com dispositivos de armazenamento de energia de curto prazo, visando reduzir os impactos para a rede, e que possa atuar em conjunto com o sistema de proteção e controle para prover serviços ancilares.

Torna-se cada vez mais premente a identificação e análise técnica, econômica e regulamentar de novos negócios para as empresas distribuidoras para fazer face à perda de faturamento decorrente da produção de energia por parte dos consumidores.

8. REFERÊNCIAS

8.1 SNPTEE – Seminário Nacional da Produção e Transmissão de Energia Elétrica (24)

2017 (2)

FURTADO, J.G.M. *et al.* *Análise energética-econômica de sistemas de geração distribuída e cogeração à base de células a combustível para aplicações residenciais.* GPT 14. Cepel, UFRJ. XXIV SNPTEE. Curitiba, PR, 2017.

BOTELHO, F.K. *et al.* *Utilização de baterias na distribuição com a inserção de geração fotovoltaica distribuída – avaliação de impactos.* Thymos Energia. GCR 05. XXIV SNPTEE. Curitiba, PR, 2017.

2015 (7)

MELLO, J.C. *et al.* *A geração distribuída regulada na expansão – avanços necessários.* GPL 12. Thymos Energia, Cogen. XXIII SNPTEE. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

BORGES, S. *et al.* *Alocação ótima de geração distribuída em sistema de distribuição usando algoritmo genético com análise probabilística.* GET 12. UFPA. XXIII SNPTEE. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

NEGRI, J.C. *et al.* *Análise e oportunidade de implantação de geração distribuída em grandes centros metropolitanos, alternativamente à expansão da transmissão e distribuição – estudos de casos na região metropolitana de São Paulo e no litoral do estado.* XXIII SNPTEE. GPL 13. Cesp. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

SANTOS, L.L.C. *et al.* *Metodologia para planejamento de sistemas de distribuição considerando a previsão de inserção de geração distribuída.* GPL 14. UFSM, AES SUL. XXIII SNPTEE. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

FURTADO, J.G.M. *et al.* *Análise das eficiências energéticas e econômica de um sistema de geração distribuída de energia elétrica com células a combustível.* GET 11. Cepel. XXIII SNPTEE. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

AMARAL, R.C. *et al.* *Viabilidade e opções integradas para inserção da energia solar fotovoltaica através de geração distribuída em larga escala.* GCR 03. UFSM AES Sul. XXIII SNPTEE. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

MELO, J.B. *et al.* *Desenvolvimento de micro inversores para viabilizar plantas fotovoltaicas conectadas nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica visando à geração distribuída.* GPT 21. CHESF, UPE. XXIII SNPTEE. Foz do Iguaçu, PR, 2015.

2013 (7)

OLIVEIRA, L.R. *et al.* *Conexão na rede elétrica de um micro inversor para geração fotovoltaica de energia elétrica.* GPT 21. Unicamp, Unesp. XXII SNPTEE. Brasília, DF, 2013.

LANDEIRA, J. *et al.* *Estudo de viabilidade para uma usina fotovoltaica de minigeração distribuída conectada à rede.* GPT 20. Promon, Endesa Brasil. XXII SNPTEE. Brasília, DF, 2013.

PRADO, I.P. *et al.* *Busca Exaustiva e algoritmos genéticos empregados na alocação de geração distribuída visando à redução de perdas ativas do sistema de distribuição.* GPT 25. UFABC, UFG. Cemar. XXII SNPTEE. Brasília, DF, 2013.

SCHWWENCK, K.J. *et al.* *Análise dos impactos de sistemas fotovoltaicos distribuídos e conectados à rede elétrica na tensão de atendimento e no fator de potência da unidade consumidora.* GCR 23. Coppe/UFRJ. XXII SNPTEE. Brasília, DF, 2013.

SANTOS, L.L.C. *et al.* *Impacto da tarifa branca e da geração distribuída nos consumidores residenciais.* GCR 28. UFSM. XXII SNPTEE. Brasília, DF, 2013.

PRADO, F.A.A. *et al.* *Experiências internacionais na concepção de tarifas Feed in.* GCR 22. USP. XXII SNPTEE. Brasília, DF, 2013.

CASTRO, M.R.V. *et al.* *Geração distribuída no Smart grid – estudo do caso Parintins.* XXII SNPTEE. GPT 09. Eletrobrás, Cepel. Brasília, DF, 2013.

2011 (4)

MULLAUSEN, J. *et al.* *O futuro dos esquemas de detecção de ilhamento na geração distribuída.* GPT 06. Florida Power & Light Company. XXI SNPTEE. Florianópolis, SC, 2011.

FURTADO, J.G.M. *et al.* *Desenvolvimento e avaliação do projeto de demonstração do Cepel de um sistema de geração distribuída de energia elétrica com células a combustível.* GPT 11. Cepel, Chesf. XXI SNPTEE. Florianópolis, SC, 2011.

RAMOS, A.J.P. *et al.* *Impacto da geração distribuída eólica nos sistemas de distribuição e transmissão: aspectos operativos de regime permanente, dinâmico e qualidade de energia.* GPT 08. Andesa. XXI SNPTEE. Florianópolis, SC, 2011.

GUTIÉRRES, T.E.F. *et al.* *Geração distribuída e Smart grid com células a combustível e recursos renováveis: modelagem, simulação e estudo de caso.* GPT 29. Cepel, Siemens. XXI SNPTEE. Florianópolis, SC, 2011.

2009 (4)

SOUZA, A.R.R. *et al.* *Alocação de geração distribuída em rede de distribuição utilizando fluxo de potência ótimo e algoritmos genéticos.* Lactec, Copel, UFPR. XX SNPTEE. GPT 23. Recife, PE, 2009.

FURTADO, J.G.M. *et al.* *Otimização de um sistema de geração distribuída de energia com células a combustível.* GPT 12. Cepel, Chesf. XX SNPTEE. Recife, PE, 2009.

BARIN, A. *et al.* *Gerenciamento de fontes alternativas de geração distribuída utilizando uma análise multicriterial baseada no método AHP e na lógica Fuzzy.* GPT 19. UFSM. XX SNPTEE. Recife, PE, 2009.

COSTA, D.M. *et al.* *Aspectos técnicos e operacionais do uso de microturbinas conectados aos sistemas elétricos para a geração distribuída de energia elétrica e térmica.* GPT 10. UFSM, USP-SC. XX SNPTEE. Recife, PE, 2009.

8.2 SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (11)

2018 (6)

GOMES, E.C.F. *et al.* *Situação atual e perspectivas para a energia fotovoltaica no Brasil.* SP46. XIV SEPOPE. Recife, PE, 2018.

JONATHAN, S. *et al.* *O futuro da comercialização e do planejamento de energia elétrica com geração distribuída no Brasil – Um Plano de Negócio.* SP27. XIV SEPOPE. Recife, PE, 2018.

PARENTE, B.J.P. *et al.* *Por um Brasil solar.* SP104. XIV SEPOPE. Recife, PE, 2018.

ROSAS, G.B. *et al.* *Superação de equipamentos, reserva de energia e controle de tensão em Sistemas com penetração de energias eólica e solar.* SP12. XIV SEPOPE. Recife, PE, 2018.

PIARDI, A.B. *et al.* *Aspects of a hybrid and flexible microgrid laboratory implementation.* SP47. XIV SEPOPE. Recife, PE, 2018.

PRIOSTE, F.B. *et al.* *Impactos da interligação de uma usina solar fotovoltaica com controle de tensão em um sistema de distribuição.* SP90. XIV SEPOPE. Recife, PE, 2018.

2014 (2)

LANDEIRA, J. *et al.* *Análise econômica sobre a implantação de geração distribuída fotovoltaica no Brasil para clientes tipo B3.* Promon Engenharia, Coppe/UFRJ. XIII SEPOPE. Foz do Iguaçu, PR, 2014.

PRIOSTE, F.B. *et al.* *Impactos da inserção de geração fotovoltaica na rede elétrica.* Universidade do Estado de Santa Catarina. XIII SEPOPE. Foz do Iguaçu, PR, 2014.

2012 (3)

OLIVEIRA, J.C. et al. *Procedimentos para operação de áreas ilhadas com geração distribuída*. SP162. Unifei, Cemig. XII SEPOPE. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ALMEIDA, C.F.M. et al. *Avaliação do impacto de operações de religamento em sistemas de distribuição com geração distribuída*. SP045. Enerq-USP, University of Alberta (Canadá). XII SEPOPE. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

SOBRINHO, N.R.B.C et al. *Impacto da perda de geração distribuída na estabilidade do sistema elétrico durante perturbações sistêmicas*. SP021. Chesf, Unifei. XII SEPOPE. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

8.3 CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar (15)

2018 (10)

SCOLARI, B.S. et al. *Panorama dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica Amparados pela Resolução Normativa n.º 482/2012 da ANEEL no Brasil*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

ABRÃO, A.P. et al. *Acompanhamento e Análise de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede no Estado de Minas Gerais Antes e Após Revisão da Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

SHAYANI, R.A. et al. *Análise Probabilística da Necessidade de Reforço de Rede de Distribuição para Conexão de Geração Distribuída Fotovoltaica*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

RODRIGUES, M.A.O. et al. *Análise de Impactos Técnicos e Social da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica no Distrito Federal*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

SKORUPA, T. et al. *Alocação Ótima de Geração Distribuída Fotovoltaica para Redução de Perdas de Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Um Estudo de Caso*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

MOREIRA, E.A. et al. *A Modelagem da Geração Fotovoltaica Distribuída e Seus Impactos na Perspectiva do Planejamento de Sistemas Elétricos*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

BENEDITO, R.S. et al. *Limites de Inserção da Geração Solar Fotovoltaica em Universidades Federais*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

MOREIRA, A.L.M. et al. *Estudo de Viabilidade de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede em uma Instituição de Ensino*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

LUCCHESE, F.C. et al. *Análise do Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica na Rede Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

DUARTE, M.M. et al. *Análise de Viabilidade Técnico-Econômica da Implementação de Geração Solar Fotovoltaica Aliada a Eficiência Energética no Centro de Ensino Médio Taguatinga Norte*. VII CBENS. Gramado, RS, 2018.

2016 (3)

CAMARGOS, R.S.C. et al. *Método para Análise Comparativa dos Impactos Técnicos da Geração Distribuída Fotovoltaica Concentrada e Pulverizada*. VI CBENS. Belo Horizonte, MG, 2016.

BEZERRA, S.M.S. et al. *Motivações e Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica Conectada à Rede na Matriz Energética Brasileira*. VI CBENS. Belo Horizonte, MG, 2016.

LOPES, J.A. et al. *Avaliação dos Impactos na Proteção dos Sistemas Elétricos de Distribuição da Conexão de Centrais de Micro e Minigeração Solar Fotovoltaica*. VI CBENS. Belo Horizonte, MG, 2016.

2014 (2)

FRIGO, M.M. *Microgeração Solar de Energia Elétrica Interligada a Sistemas de Distribuição de Baixa Tensão*. V CBENS. Recife, PE, 2014.

URBANETZ, J. et al. *Primeiro Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Homologado Pela Copel*. V CBENS. Recife, PE, 2014.

8.4 SENDI – Seminário Nacional de Distribuição (22)

2018 (3)

CASTRO, O.N.J. *et al.* *Geração Distribuída: Uma visão da distribuidora Enel Rio*. Enel Distribuição Rio. XXIII SENDI. Fortaleza, CE, 2018.

BARROS, F.A. *et al.* *Modelagem e simulação de uma microrrede utilizando ATP e Redes de Petri*. Enel Distribuição Ceará, Universidade Federal do Ceará. XXIII SENDI. Fortaleza, CE, 2018.

SANTOS, A.M. *et al.* *Critério para conexão de geração distribuída no sistema de distribuição de média tensão da EDP São Paulo*. Empresa Bandeirante de Energia S/A, EDP Bandeirante. XXIII SENDI. Fortaleza, CE, 2018.

2016 (4)

PRADO, C.C. *et al.* *Análise do impacto da geração distribuída na margem de estabilidade de tensão*. Universidade Federal de Santa Maria, AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia. XXII SENDI. Curitiba, PR, 2016.

BERNARDON, D.P. *et al.* *Planejamento de sistemas de distribuição considerando a realidade de redes elétricas inteligentes e geração distribuída*. Universidade Federal de Santa Maria, CEEE Distribuição, AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia. XXII SENDI. Curitiba, PR, 2016.

GONÇALVES, N.P. *et al.* *Locação de painéis fotovoltaicos num sistema de microgeração distribuída- Considerações sobre a viabilidade de um modelo de negócio*. Companhia Paranaense de Energia, Copel Geração S.A. XXII SENDI. Curitiba, PR, 2016.

LEONARDO, M.H.S. *et al.* *Análise do impacto da geração distribuída nas perdas de um sistema de subtransmissão*. Rio Grande Energia S/A, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. XXII SENDI. Curitiba, PR, 2016.

2014 (5)

FERREIRA, R.S. *et al.* *Suporte de reativos por micro e minigeração distribuída: requisitos de acesso ao sistema de distribuição e a garantia de adequado desempenho operacional*. PSR Consultoria Ltda, Companhia Paulista de Força e Luz e Universidade Federal do Rio de Janeiro. XXI SENDI. Santos, SP, 2014.

PICA, C.Q. *et al.* *Projeto e implantação de microrredes comercialmente viáveis. Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI*. Centrais Elétricas de Santa Catarina S/A. XXI SENDI. Santos, SP, 2014.

TENFEN, D. *et al.* *Gerenciamento energéticos de microrredes*. Universidade Federal de Santa Catarina. XXI SENDI. Santos, SP, 2014.

MELLO, A.P. *et al.* *Sistemas inteligentes para reconfiguração automática de redes de distribuição com geração distribuída em tempo real com uso de equipamentos telecomendados*. Universidade Federal de Santa Maria, Universidade Federal de Santa Catarina, AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. XXI SENDI. Santos, SP, 2014.

ZIMMER, V. *et al.* *Estudo dos impactos de microrredes em rede de distribuição utilizando fluxo de potência trifásico*. Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. XXI SENDI. Santos, SP, 2014.

2012 (7)

SCHWENCK, K.J. *et al.* *Análise do comportamento da tensão de atendimento do consumidor com sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

OMORI, J.S. *et al.* *A importância da aplicação de redes inteligentes para integração de painéis fotovoltaicos nas redes de distribuição*. Companhia Paranaense de Energia. XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

BELLAN, J. *et al.* *Estabilidade de geradores distribuídos conectados via inversores em sistemas de distribuição de energia elétrica*. Elektro Eletricidade e Serviços S/A, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

SILVA, H.N. *et al.* *Avaliação dos impactos da geração distribuída no sistema elétrico de média tensão da Cemig Distribuição*. Cemig Distribuição. XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

RUFATO, E. *et al.* *Requisitos de proteção para conexão de mini e microgeração na rede de baixa tensão. Testes e procedimentos, caso Copel*. Copel Distribuição S/A, Universidade de São Paulo. XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

SOUZA, D.F. *et al.* *Sistema solar fotovoltaico Pituaçu: Aplicação da nova regulamentação para minigeração*. Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

BRIGNOL, W.S. *et al.* *Avaliação da geração distribuída para o fornecimento de serviços ancilares em redes de distribuição*. Universidade Federal de Santa Maria, Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE). XX SENDI. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

2010 (3)

GAMA, P.H.R.P. et al. *Incorporação da geração distribuída na estratégia de contratação de energia no ambiente regulado*. B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistema Elétricos Ltda, Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação, Bandeirante Energia S/A. XIX SENDI. São Paulo, SP, 2010.

BERTARELLO, G. et al. *Impacto da geração distribuída no sistema elétrico de distribuição da concessionária, considerando-se geração com gás natural, biomassa e eólica*. Rio Grande de Energia- RGE, UPM. XIX SENDI. São Paulo, SP, 2010.

SANS, M.R. et al. *Planejamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica considerando unidades de geração distribuída*. Lactec, Copel, Universidade Federal do Paraná. XIX SENDI. São Paulo, SP, 2010.

8.5 UnB – Universidade de Brasília (17)

2017 (3)

MEDEIROS, C.V.P. *Análise dos impactos técnicos da conexão de um sistema de minigeração distribuída fotovoltaica em um alimentador radial da CEB Distribuição utilizando o software Anarede*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

GREGÓRIO, J.V. *Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

NUNES, B.F.F. *Análise do aproveitamento do potencial de geração distribuída fotovoltaica no DF e seu impacto sobre os contratos de concessão de energia no ambiente regulado celebrados pela CEB*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Ronaldo Sérgio Chacon Camargos. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

2016 (2)

CAMARGOS, R.S.C. *Método para a identificação dos limites de geração distribuída fotovoltaica que alteram a necessidade de reforços detectada pelo planejamento da expansão de sistemas de distribuição de média tensão*. Dissertação de Mestrado. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

VIEIRA, D. *Método para determinação do tipo de incentivo regulatório à geração distribuída solar fotovoltaica que potencializa seus benefícios técnicos na rede*. Tese de Doutorado. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

2015 (3)

MOTA, V.A.S. *A energia solar fotovoltaica distribuída como alternativa para a crise energética nacional: modelo de expansão acelerada através de subsídios economicamente justificados*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

HONÓRIO, L.G. *Aplicação de Redes Elétricas Inteligentes para Centros de Despacho de Geração Distribuída*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

ALMEIDA, K.S.A. *Mensuração do impacto técnico e dimensionamento do reforço de rede de uma usina solar fotovoltaica conectada à rede de distribuição: estudo de caso da usina de Jaíba Solar*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

2014 (2)

MACHADO, A.H.B. *Análise de perdas em alimentador radial de distribuição considerando geração distribuída fotovoltaica e curvas de carga das unidades consumidoras*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

PUTTINI, D.M. *Análise dos efeitos de diferentes configurações dos recursos de manobra de um alimentador radial no limite de penetração de geração distribuída fotovoltaica*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

2013 (3)

CAMARGOS, R.S.C. *Análise técnica de impactos e limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em uma rede radial de distribuição – estudo de caso para o alimentador da Embaixada da Itália em Brasília*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

FERREIRA, A.A. *Determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em alimentadores radiais considerando recursos de manobra*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

SANTOS, F.J. *Planejamento de redes de distribuição considerando geração distribuída*. Dissertação de Mestrado. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

2012 (1)

JUNGES, R.S. *Método de controle de injeção de potência de painéis fotovoltaicos conectados a alimentadores radiais de distribuição*. Dissertação de Mestrado. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

2011 (2)

OLIVEIRA, M.A.V. *Dimensionamento de geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição considerando curvas de irradiância solar e de carga*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

LOPES, L.Z. *Alimentador radial de distribuição para simulações de penetração da geração distribuída fotovoltaica*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador: Prof. Rafael Amaral Shayani. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

2010 (1)

SHAYANI, R.A. *Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição*. Tese de Doutorado. Orientador: Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

8.6 CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (7)

2017 (3)

GALVÃO, R.R.A. et al. *Sistema de monitoramento para plantas de microgeração distribuída de energia*. Fundação Parque Tecnológico de Itaipu. IX CITENEL. João Pessoa, PB, 2017.

QUIROGA, G.A. et al. *Avaliação dos impactos de geração distribuída diante de diferentes cenários de penetração*. Universidade de São Paulo e AES Eletropaulo. IX CITENEL. João Pessoa, PB, 2017.

TARANTO, G.N. et al. *Modelagem dinâmica para avaliação do impacto de fontes alternativas no sistema de distribuição de energia*. Universidade Federal do Rio de Janeiro e Light SESA. IX CITENEL. João Pessoa, PB, 2017.

2015 (2)

FERRONATO, F.A.S. et al. *Sistema de supervisão e controle para geração distribuída com armazenamento de energia e veículos elétricos*. Instituto Lactec e Light SESA. VIII CITENEL. Costa do Sauípe, BA, 2015.

ORTMANN, M.S. et al. *Arquitetura e componentes de uma microrrede inteligente experimental*. Universidade de Santa Catarina e Tractebel Energia S.A. VIII CITENEL. Costa do Sauípe, BA, 2015.

2013 (1)

TARANTO, G.N. et al. *Planejamento e operação de microrredes formadas pela presença de geração distribuída*. Universidade Federal do Rio de Janeiro e Ampla. VII CITENEL. Rio de Janeiro, RJ, 2013.

2011 (1)

ZAMORA, F.H.P. et al. *Ambiente integrado de apoio à operação de redes de distribuição com geração distribuída*. Sinapsis Inovação e Energia e Eletropaulo. VI CITENEL. Fortaleza, CE, 2011.

8.7 ANEEL – Programa de Pesquisa e Desenvolvimento P&D (17)

2017 (4)

COPEL DISTRIBUIÇÃO S/A – COPEL. *Metodologia para análise, monitoramento e gerenciamento da GD por fontes incentivadas*. PD-02866-0464/2017. Valor: R\$ 11.527.195,00 (onze milhões, quinhentos e vinte sete mil, cento e noventa e cinco reais).

COPEL DISTRIBUIÇÃO S/A – COPEL. *Gerenciador e inversor inteligente para conexão de sistemas fotovoltaicos em geração distribuída de energia*. PD-02866-0468/2017. Valor: R\$ 5.060.884,00 (cinco milhões, sessenta mil, oitocentos e oitenta e quatro reais).

COPEL DISTRIBUIÇÃO S/A – COPEL. *Desenvolvimento de minirredes com fontes de energia renováveis não convencionais*. PD-02866-0470/2017. Valor: R\$ 8.754.622,00 (oito milhões, setecentos e cinquenta e quatro mil, seiscentos e vinte e dois reais).

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL PAULISTA. *Desenvolvimento de um modelo de Campus Sustentável na Unicamp - Laboratório vivo de aplicação de minigeração renovável, eficiência energética, monitoramento e gestão do consumo de energia*. PD-00063-3032/2017. Valor: R\$ 4.691.516,00 (quatro milhões, seiscentos e noventa e um mil, quinhentos e dezesseis reais).

2016 (2)

CENTRAIS ELÉTRICAS DE RONDÔNIA S/A - CERON. *Sistema de conexão de microgeradores com a rede de distribuição de energia elétrica para viabilização de centrais virtuais de energia*. PD-0369-0010/2016. Valor: R\$ 2.060.200,00 (dois milhões, sessenta mil, duzentos reais).

CENTRAIS ELÉTRICAS MATOGROSSENSE S/A – CEMAT. *Impacto dos recursos energéticos distribuídos sobre o setor de distribuição*. PD-0405-1603/2016. Valor: R\$ 2.162.558,00 (dois milhões, cento e sessenta e dois mil, quinhentos e cinquenta e oito reais).

2015 (1)

BANDEIRANTE ENERGIA S/A. *Geração distribuída urbana utilizando sistemas fotovoltaicos e armazenamento de curto prazo: serviços auxiliares, avaliação e impactos para a distribuidora e desenvolvimento de novos negócios*. PD-0391-0019/2015. Valor: R\$ 7.486.000,00 (sete milhões, quatrocentos e oitenta e seis mil reais).

2014 (2)

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL PAULISTA. *Aplicação massiva de geração distribuída solar em diferentes tipologias de telhados na cidade de Campinas*. PD-0063-3012/2014. Valor: R\$ 14.814.907,00 (quatorze milhões, oitocentos e quatorze mil, novecentos e sete reais).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica. Volume 5/8. Evolução tecnológica nacional no segmento de distribuição de energia elétrica*. Projeto executado pelo Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE). PD-0061-0046/2014. Valor: R\$ 10.634.283,00 (dez milhões, seiscentos e trinta e quatro mil, duzentos e oitenta e três reais).

2012 (3)

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A. *Avaliação e definição de requisitos de plantas de geração distribuída interligadas à rede elétrica através de inversores de tensão*. PD-0382-0079/2012. Valor: R\$ 1.116.580,00 (um milhão, cento e dezesseis mil, quinhentos e oitenta reais).

ELEKTRO ELETRICIDADE E SERVIÇOS S/A - ELEKTRO. *Geração distribuída com fontes alternativas e renováveis de energia em ambiente de microrredes, smart grid: metodologias de medição, segurança operacional e impactos na qualidade de energia*. PD-0385-0053/2012. Valor: 1.875.100,00 (um milhão, oitocentos e setenta e cinco mil, cem reais).

CEB DISTRIBUIÇÃO S/A – CEB-D. *Eletroposto Solar-Microgeração fotovoltaica distribuída integrada à arquitetura predial e sua aplicação para carregamento de veículos elétricos*. PD-5160-1207/2012. Valor: R\$ 1.247.554,00 (um milhão, duzentos e quarenta e sete mil, quinhentos e cinquenta e quatro reais).

2011 (1)

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A. *Desenvolvimento tecnológico e inovação na utilização de tecnologia fotovoltaica e sua integração inteligente com a rede de distribuição: uma ação voltada a Grandes Clientes da Light*. PD-0382-0080/2011. Valor: R\$ 2.129.352,00 (dois milhões, cento e vinte nove mil, trezentos e cinquenta e dois reais).

2010 (2)

COMPANHIA ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA – COELBA. *Metodologia de avaliação dos impactos da implementação de políticas tarifárias Feed in em concessionárias de distribuição*. PD-0047-0035/2010. Valor: R\$ 576.200,00 (quinhentos e setenta e seis mil, duzentos reais).

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A. L5: *Desenvolvimento de um sistema inteligente de gestão de fontes renováveis, armazenamento distribuído e veículos elétricos recarregáveis integrados ao conceito e plataforma Smart Grid*. PD-0382-0061/2010. Valor: R\$ 3.132.401,00 (três milhões, cento e trinta e dois mil, quatrocentos e um reais).

2009 (2)

AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S/A–AMPLA. *Planejamento e operação de microrredes formadas pelo elevado grau de penetração de geração distribuída; análise estática e dinâmica*. PD-0383-0014/2009. Valor: R\$ 917.760,00 (novecentos e dezessete mil, setecentos e sessenta reais).

AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S/A–AMPLA. *Proteção para geração distribuída*. PD-0383-0030/2009. Valor: R\$ 2.623.040,00 (dois milhões, seiscentos e vinte e três mil, quarenta reais).

8.8 GESEL – Grupo de Estudos do Setor Elétrico. UFRJ (4)

2018 (2)

CASTRO, N.; DANTAS, G. (Organizadores). Livro - *Experiências internacionais em geração distribuída: motivações, impactos e ajustes*. Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL, UFRJ. Grupo Energisa. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

CASTRO, N. J. *Impactos sistêmicos da micro e minigeração distribuída*. Texto de Discussão do Setor Elétrico n.º 79. Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2018.

2017 (1)

TARANTO, G.N. et al. *Impactos da difusão da micro e da mini geração no planejamento na operação e na manutenção do sistema de distribuição*. Texto de Discussão do Setor Elétrico n.º 73. Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

2016 (1)

CASTRO, N. et al. *Perspectivas e desafios da difusão da micro e da mini geração solar fotovoltaica no Brasil*. Texto de Discussão do Setor Elétrico n.º 67. Grupo de Estudos do Setor Elétrico – GESEL, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

8.9 CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Electriques (17)

2018 (5)

POPOVIC, Z. et al. *Risk-based Planning of Radial Distribution Networks with Distributed Generation and Demand Response in the Presence of Uncertainty*. C6-101-2018. Sérvia. Estados Unidos. Cigré Session, 2018.

PIMENTAL, A.X. *Design and Implementation of a Grid-Connected Microgrid in Medium Voltage Brazilian Distribution Network Architecture, Control and Refulatory Challenges*. C6-301. Brasil. Cigré Session, 2018.

KOVÁCS, A. et al. *Full-scope Simulation of Grid-connected Microgrids*. C6-304-2018. Hungria. Cigré Session, 2018.

RADWAN, A.A. et al. *Modelling of Active Distribution Network for Distributed Generation Planning*. C6-103-2018. Egito. Cigré Session, 2018.

MORTON, A.B. et al. *Potencial of and Limitations to Distributed Management of LV and MV Feeder Voltage Profiles with High Penetration of Embedded Generation and Storage*. C6-107. Austrália. Cigré Session, 2018.

2015 (2)

CIGRÉ Brochura 635/2015. *Microgrids 1 Engineering, Economics, & Experience*. Outubro, 2015.

CIGRÉ Brochura 613/2015. *Protection of Distribution Systems with Distributed Energy Resources*. Cigré Joint Working Group B5/C6.26/CIRE, 2015.

2014 (5)

EL SAAD, M.M.A. *et al. Performance Analysis of Electric Distribution Systems with Distributed Generation Resources*. C6-104-2014. Egito. Cigré Session, 2014.

LUIZ, C.M. *et al. Comparative Analysis of Distributed Generation Connection Requirements in Brazilian Utilities*. C6-203-2014. Brasil. Cigré Session, 2014.

ULJANIC, B. *et al. Voltage Control in Distribution Network with High Share of Distributed Generation*. C6-110. Eslovênia, Bélgica, Áustria. Cigré Session, 2014.

CHEN, R. *et al. Study on the Cluster Control of Distributed Energy Resources Integrated to the Local Distribution Network*. C6-204. China. Cigré Session, 2014.

CIGRÉ BROCHURA 575/2014. *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*. Task Force C6.04, 2014.

2012 (1)

GRENARD, S. *et al. Implementation of a Centralised Voltage Control Experiment in Presence of Distributed Generation in ERDF's MV Network*. C6-109. França. Cigré Session, 2012.

2010 (1)

TAO, L. *et al. European Roadmap for Microgrids*. C6-306. Alemanha, Inglaterra, Grécia. Cigré Session, 2010.

2008 (2)

MEEUWSEN, *et al. Electricity Networks of the Future: Various Roads for a Sustainable Energy System*. C6-112. Holanda. Cigré Session, 2008.

MICOLANO, E. *et al. Experimental Tests on Storage Systems in a Distributed Generation Microgrid*. C6-304. Itália. Cigré Session, 2008.

2006 (1)

CELLI, G. *et al. From Passive to Active Distribution Networks: Methods and Models for Planning Network Transition and Development*. C6-204-2006. Itália. Cigré Session, 2006.

CAPÍTULO 7

Novos Paradigmas para o Planejamento Energético. A Importância das Fontes Renováveis e da Eficiência Energética

Rafael Amaral Shayani



OBJETIVO

A sociedade está em constante evolução. O mundo encontra-se cada vez mais interconectado, e questões que afetam todos, como as emissões de gases de efeito estufa pelo setor energético, devem ser analisadas sob uma ótica mais ampla. O paradigma atual de planejamento energético, de que a energia é um fim por si só, deve dar lugar a um novo paradigma, com foco no ser humano, em alinhamento com o Acordo de Paris e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Entretanto, a transição energética para fontes renováveis de energia ocorre de maneira muito lenta, mantendo-se a predominância da forma tradicional de geração de energia, baseada em recursos fósseis. Para promover essa mudança no setor energético, é necessário modificar a maneira como os engenheiros são formados na universidade, a qual deve abordar a questão energética de modo interdisciplinar e fomentar a discussão de aspectos sociais e ambientais em sala de aula, não podendo mais se limitar a questões técnicas apenas. Este capítulo tem como objetivo apresentar, com base em uma perspectiva histórica, o crescimento passado e o rumo atual do sistema energético mundial. Reflexões são pontuadas e aprendizagens obtidas, então novos rumos são indicados, com base nas recentes diretrizes internacionais promulgadas, culminando para a necessidade de modernização dos cursos de engenharia para poder enfrentar a questão energética.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade está passando por um período de amadurecimento. Cada vez mais novas percepções modificam o grau de consciência da sociedade. Vários conceitos vigentes durante décadas são agora questionados e novos paradigmas são adotados, o que é esperado de uma sociedade em constante evolução.

O mundo encontra-se cada vez mais interconectado e as pressões que emergem da transição de um mundo dividido para um mundo unido, processo este de longo prazo, são sentidas nas relações internacionais e suscitam profundas rupturas em estruturas, regulamentos e sistemas que não conseguem servir aos interesses de todos os povos.

O destino da humanidade é a unidade mundial. Em uma visão histórica, a evolução humana iniciou-se com as famílias, as quais se uniram em tribos, depois em cidade-estado e, de forma subsequente, resultou na instituição das nações. O passo seguinte é considerar a Terra como um só país; e os serem humanos como seus cidadãos. Tal visão de que cada nação faz parte de um todo é um dos sinais do amadurecimento da humanidade [1].

A História registra que a sociedade, ao florescer tecnologicamente, ficou deslumbrada com as novas oportunidades que se descortinaram e produziu equipamentos inovadores, gerando notáveis progressos em diversas áreas, tais como transporte (desenvolvimento e popularização de veículos automotores), comunicações (desenvolvimento de telefone e sua evolução para o celular), maquinaria industrial automatizada, eletrodomésticos, entre outros, sendo praticamente todos eles dependentes de uma fonte de energia para funcionar. Desse modo, considerado crucial para o crescimento econômico e prosperidade das nações, o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia em sua forma elétrica foi desenvolvido por brilhantes mentes do século XIX que conceberam geradores elétricos, transformadores e linhas

de transmissão, possibilitando que a energia pudesse ser convertida em eletricidade em praticamente qualquer lugar onde houvesse potencial energético, e transmitida para onde estivesse o centro de consumo. Dessa forma, o consumo energético mundial cresceu ano após ano, com perspectiva de intensificar ainda mais esse crescimento visando atender à demanda reprimida de países em desenvolvimento.

O esforço para disponibilizar cada vez mais energia elétrica para a sociedade é legítimo, pois reduz a necessidade de esforço manual, permitindo assim que sobre mais tempo para as pessoas se dedicarem a outras atividades, tais como estudos, artes e lazer. Entretanto, com mais de um século de experiência de uso do sistema energético mundial, o qual é fundamentalmente o mesmo desde sua concepção, é necessário refletir, de forma isenta e independente, os impactos que esse sistema está causando na sociedade como um todo, para poder melhor direcionar seu crescimento.

O processo de criar, implementar, refletir sobre os resultados, aprender com a experiência e refazer de forma mais consciente, é algo intrínseco da mente humana. Com maior acesso a dados e informações a que jamais tivemos antes, hoje podemos monitorar os impactos na medida em que eles ocorrem, permitindo evoluir sempre que necessário.

2. PERSPECTIVA HISTÓRICA DO CRESCIMENTO DO SISTEMA ENERGÉTICO MUNDIAL

2.1 Perfil de Crescimento das Últimas Décadas

Essa análise considera dados do sistema energético a partir da década de 1970, disponibilizados pela Agência Internacional de Energia no documento *Key world energy statistics 2017* [2]. Entende-se que uma análise das últimas décadas é suficiente para indicar o crescimento passado e inferir a tendência para qual segue o crescimento futuro.

Ao analisar tal documento, pode-se constatar que a energia primária total mundial por tipo de combustível aumenta ano após ano, indicando que a sociedade requer cada vez mais energia. Esse crescimento energético ocorreu com base prioritariamente em recursos fósseis, os quais continuam em crescimento. As fontes renováveis, incluindo solar, eólica, geotérmica, oceânica e das marés, apesar de apresentarem elevado crescimento nos últimos anos, representam apenas 1,5% do total.

As fontes renováveis de energia estão em crescimento acelerado, mas ainda representam uma pequena parcela da matriz energética mundial. Sobre a geração mundial de eletricidade por tipo de combustível, o crescimento da eletricidade foi ainda mais acentuado do que o da energia de forma geral; enquanto a geração de energia praticamente duplicou, a preferência pelo uso de eletricidade praticamente quadruplicou. Nota-se novamente a predominância de combustíveis fósseis para geração de eletricidade, os quais continuam em crescimento. Há também um crescimento contínuo das emissões de CO₂ por combustíveis fósseis de origem energética [2].

A Tabela 1 apresenta indicadores de crescimento. Com a população mundial quase duplicando nessas últimas décadas, é esperado um crescimento energético, porém se nota que a geração de energia cresceu mais do que a população, indicando que cada habitante consome atualmente, em média, 20% mais energia do que em 1973 [2].

Tabela 1. Comparação do crescimento mundial populacional com o crescimento energético, elétrico e de emissão de CO₂ por queima de combustível fóssil

	1973	2015	Crescimento
População (milhões)	3.928	7.334	87%
Energia primária mundial (Mtep)	6.101	13.647	124%
Eletricidade mundial (TWh)	6.131	24.255	296%
Emissão de CO ₂ por queima de combustível fóssil (Mt CO ₂)	15.458	32.294	109%

Fonte: [2]

2.2 Características do Modelo Atual de Crescimento do Setor Energético

Com base nos dados apresentados, podem-se identificar algumas características do modelo atual de crescimento do setor energético:

- a humanidade requer cada vez mais energia;
- atualmente essa energia vem, essencialmente, de combustíveis fósseis;
- o crescimento das fontes renováveis de energia ainda é inferior ao crescimento anual do consumo, logo há crescimento do uso de combustíveis fósseis; e
- há aumento da emissão de CO₂ pelo setor energético.

Essas constatações nos levam à conclusão de que o sistema energético ainda não está efetivamente em transição rumo a uma economia de baixo carbono, haja vista o incremento do uso de combustíveis fósseis, com consequente aumento da emissão de CO₂, e a utilização de fontes renováveis de energia apenas como forma alternativa, de modo ainda tímido.

Esse cenário conservador, em que o sistema permanece com praticamente a mesma característica em todo o período estudado, com perspectiva de pouca alteração para o futuro, pode ser explicado pelo modelo conceitual fragmentado adotado pelos agentes do setor, podendo ser sintetizado pela afirmação de que gerar energia é um fim por si só. Essa forma de raciocínio, de que quanto mais energia for disponibilizada para a sociedade, melhor para o desenvolvimento e prosperidade, por ser um serviço público essencial que deve ser ofertado em abundância, é baseada essencialmente em aspectos técnicos visando garantir a segurança energética. Nessa linha de raciocínio, os recursos devem ser explorados ao máximo, especialmente os de menor custo.

Esse modelo conceitual fragmentado pode ser definido pelas seguintes características:

- visão prioritariamente técnica dos recursos energéticos;
- preocupação com segurança energética;
- planejamento visando suprir a tendência de crescimento energético;
- visão fragmentada, onde a geração de eletricidade é desconectada de seu uso e de seus impactos na sociedade e no meio ambiente, os quais são tratados como externalidades; e
- sistemas energéticos planejados prioritariamente por engenheiros.

3. NOVAS DIRETRIZES INTERNACIONAIS PARA MUDAR O RUMO DE CRESCIMENTO DO SETOR ENERGÉTICO

3.1 Necessidade de Visão Integrada

O desafio energético com o qual a humanidade se depara atualmente não era muito claro nas décadas passadas. Com o aumento das emissões de gases de efeito estufa por diversos setores da sociedade, somado ao aumento da quantidade de lixo produzido pelo modelo econômico consumista, há uma preocupação real com o desenvolvimento sustentável¹ e com a possibilidade de as gerações futuras não terem à disposição os mesmos recursos de que a sociedade atual dispõe.

Um dos sinais de que a humanidade está desenvolvendo uma consciência mais madura pode ser vista pela criação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), os quais indicam os pontos prioritários para a agenda mundial no período 2015-2030 [3]. O Objetivo 7 reconhece a importância de reduzir a emissão de gases de efeito estufa, indicando a necessidade de avanços no uso da energia limpa e acessível. Da mesma forma, o Objetivo 13 enfatiza a necessidade de ações contra a mudança do clima, não apenas pelo setor energético, mas por todos os setores envolvidos.

Os objetivos 7 e 13 colocam a humanidade diante de desafios de dimensões formidáveis: como garantir crescimento energético de forma sustentável, em harmonia com o meio ambiente? Como promover segurança energética com modicidade tarifária e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões de gases de efeito estufa oriundas do sistema energético? Como garantir energia suficiente para que os países em desenvolvimento possam dispor da infraestrutura necessária para o crescimento de forma sustentável e, também, economicamente viável? Tais indagações apresentam-se como um dos principais dilemas da sociedade.

Porém a questão é ainda mais complexa! O amadurecimento da humanidade evoluiu para uma consciência de que as ações tomadas não devem ser avaliadas se atingiram ou não o fim a que se propõe, mas também como colaboram com os demais aspectos da sociedade ou os prejudicam. Tal visão está retratada na grande mudança de paradigma apresentada pelos ODS, que é o fato de os objetivos serem integrados e indivisíveis. Cada objetivo está relacionado, de algum modo, com vários outros, não sendo aceitável que um objetivo seja atingido em detrimento de outro. Não há mais espaço para visões fragmentadas!

Isso levanta outros aspectos. Além de preservar o meio ambiente, de que forma o setor energético se relaciona, por exemplo, com erradicação de pobreza? Igualdade de gênero? Inovação? Redução de desigualdades? Comunidades sustentáveis? Consumo e produção responsáveis? Paz, justiça e instituições eficazes?

A importância dessa visão integrada já está sendo abordada na literatura relacionada à energia. Por exemplo, o estudo realizado por Sovacool, na Dinamarca (2014), analisou 4.444 artigos sobre energia, publicados em periódicos de referência no mundo entre 1999 e 2013. Ele identifica

¹ A definição mais aceita para desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro. Essa definição surgiu na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas para discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental. Fonte: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/desenvolvimento_sustentavel/

que apenas 22,8% dos artigos apresentam abordagem interdisciplinar, sugerindo que a maioria das publicações enfocam apenas um único aspecto da energia, o que gera soluções de aplicação restrita. A maioria das aplicações interdisciplinares envolvem engenharia e economia; apenas 12,6% dos artigos estão relacionados às ciências sociais. Para que as pesquisas sobre energia se tornem mais relevantes para os problemas reais da humanidade, há a necessidade de que o foco passe a ser o ser humano, em vez da tecnologia, e que questões como Justiça Energética² sejam consideradas. Tal abordagem requer a utilização de ciências sociais em conjunto com a engenharia [4].

3.2 Foco no Ser Humano e Abordagem Não Mercadológica

Para que o setor energético possa vencer esses desafios, atendendo ao crescimento da demanda sem prejudicar o meio ambiente e, ainda, ajudando a promover os demais ODS, é necessária uma modificação drástica em sua rota. Continuar aumentando o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de CO₂ devem dar lugar a uma nova política integrada que busque o que é melhor para a sociedade como um todo.

Uma nova e importante diretriz foi promulgada em 2015 durante a *United Nations Climate Change Conference* (COP 21) por 195 países reunidos na França, conhecido como “Acordo de Paris” [5]. Tal documento delinea os esforços que os países devem fazer para conter o aquecimento global. Tais ações afetam diretamente a forma de fazer planejamento energético:

Acordo de Paris, Artigo 6º

8. As Partes reconhecem a importância de abordagens não mercadológicas integradas, holísticas e equilibradas estarem disponíveis para as Partes para ajudar na implementação de suas contribuições nacionalmente determinadas, no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza, de forma coordenada e eficaz, incluindo por meio de, inter alia, mitigação, adaptação, financiamento, transferência de tecnologia e desenvolvimento de capacidades, conforme o caso.

Acordo de Paris, Introdução

Reconhecendo que a mudança climática é uma preocupação comum da humanidade, as Partes deverão, ao tomar medidas para combater as mudanças climáticas, respeitar, promover e considerar suas respectivas obrigações em matéria de direitos humanos, o direito à saúde, os direitos dos povos indígenas, comunidades locais, migrantes, crianças, pessoas com deficiência e pessoas em situação de vulnerabilidade, o direito ao desenvolvimento, bem como a igualdade de gênero, empoderamento das mulheres e a igualdade intergeracional.

Essa inovadora abordagem apresenta diretrizes completamente novas para o planejamento energético. O fato de essas guias serem radicalmente diferentes do modelo atual as torna compreensíveis e até mesmo esperadas, ao constatarmos, conforme já apresentado, que o setor energético está crescendo por inércia, sem perspectivas de mudanças profundas. Logo, para modificar a rota de uma grande massa operando de forma inercial, é necessário um grande choque para efetivamente mudar seu rumo.

2 Justiça energética considera a distribuição adequada dos benefícios e dos problemas causados pelos sistemas energéticos.

A “importância de abordagens não mercadológicas integradas, holísticas e equilibradas” é um grande divisor de águas. A inércia do sistema atual, baseado em abordagens mercadológicas, pressupõe que as fontes renováveis de energia somente devem ser utilizadas quando seu custo direto de produção for mais barato do que as fontes convencionais fósseis, em prol da modicidade tarifária. Isso explica o crescimento ainda tímido das fontes renováveis e os poucos esforços em valorar seus benefícios ambientais e sociais, os quais são considerados como “externalidades” quando uma visão fragmentada do setor elétrico tem a produção de energia como um fim por si só.

Uma “abordagem holística” é essencial, visto que os impactos do setor energético afetam o planeta como um todo, ao emitirem gases na atmosfera. Considere a emissão mundial de CO₂ por queima de combustível fóssil por região [2]. A emissão de CO₂ *per capita* do Brasil é inferior a diversos outros países, conforme apresentado na Tabela 2. A visão tradicional baseia-se na ideia de que os países mais desenvolvidos possuem matrizes energéticas baseadas em carvão e emitiram muito CO₂ para garantir seu crescimento econômico. Logo, por um princípio de reciprocidade, o Brasil, que atualmente possui uma matriz mais limpa do que muitos outros países, teria a sensação de ter o direito de aumentar suas emissões para ter a energia necessária para crescer, desde que continue emitindo menos que os países mais desenvolvidos.

Tabela 2. Emissões de CO₂ por energia primária e *per capita*

	CO ₂ /TPES ³ (tCO ₂ /toe)	CO ₂ /pop (tCO ₂ /capita)
Mundo	2,37	4,40
China	3,04	6,59
Brasil	1,51	2,17
Estados Unidos	2,28	15,53
Rússia	2,07	10,19
Índia	2,43	1,58
África do Sul	3,01	7,77

Fonte: [2]

A falta de uma abordagem holística, mantendo-se uma visão fragmentada, fará com que todos os países em desenvolvimento tenham o direito de aumentar suas emissões, justificando o aumento do uso de combustíveis fósseis. Porém, dessa forma, as emissões totais jamais serão reduzidas, e a sociedade como um todo será prejudicada. A situação requer uma visão mundial da situação. Deve-se considerar a Terra como um só país e os seres humanos como seus cidadãos, para que todos, em um esforço conjunto, possam adotar as medidas necessárias para reverter a situação, visto que a questão climática afeta a todos.

Essa visão mundial, em que os interesses nacionais de segurança energética devem dar lugar a ações que visem garantir o desenvolvimento sustentável da sociedade como um todo, desafia o paradigma atual, porém é necessário para garantir o desenvolvimento sustentável e a justiça social. Assim, o Acordo de Paris acrescenta a importância do “desenvolvimento de capacidades”. Essas novas capacidades requerem alterações profundas inclusive dentro das universidades, em especial na forma como engenheiros estudam planejamento energético.

3.3 Avanços Tecnológicos que Possibilitam a Mudança no Sistema Elétrico

O sistema elétrico como nós o conhecemos remonta do final do século XIX, com a contribuição de notáveis nomes da engenharia tais como Thomas Edison e Nikola Tesla. Os geradores e motores elétricos são constituídos principalmente por material ferromagnético (rotor e estator) e cobre (enrolamentos de campo e armadura), sem a utilização de equipamentos eletrônicos, os quais ainda não existiam na época em que o sistema elétrico foi implantado.

O sistema de geração de energia foi concebido para gerar tensão com frequência constante, logo a força motriz mecânica deve ser capaz de girar o eixo do gerador síncrono com velocidade constante. Para isso, há a necessidade de armazenar a energia motriz para poder atender às variações da carga elétrica sem alterações na frequência. Logo, o sistema elétrico convencional está profundamente arraigado à ideia de que é necessário ter armazenamento de energia, seja como grandes reservatórios de usinas hidrelétricas, seja como estoque de combustível fóssil em usinas termelétricas. Naquela época ainda não havia tecnologia disponível que fosse capaz de gerar energia elétrica a partir de fontes intermitentes e de velocidade variável, tal como eólica, por exemplo.

Porém, uma grande inovação tecnológica ocorreu no século XX! O primeiro transistor, fruto da pesquisa em eletrônica, foi desenvolvido em 1948. Com a evolução de técnicas de miniaturização, componentes e equipamentos eletrônicos tiveram sua produção acelerada, gerando circuitos integrados no final da década de 1960. No início dos anos 1970, os componentes passaram a ser fabricados em silício e, na década de 1980, foram criados os microprocessadores de alta velocidade e desempenho.

Com o advento da eletrônica de potência, foi possível criar os retificadores de tensão e os inversores de frequência. Assim, a energia eólica, por exemplo, cuja velocidade varia e cuja força motriz não pode ser armazenada em sua forma cinética (vento), pôde ser aproveitada para geração de eletricidade conectada à rede elétrica, operando com frequência constante, cujos dispositivos de eletrônica de potência permitem converter tensão e frequência variáveis, oriundos do gerador eólico, em tensão e frequência constantes e compatíveis com a rede elétrica. Isso permitiu explorar outras formas de energia alternativas que possuem intermitência, tais como energia das marés e dos oceanos.

A outra grande inovação tecnológica ocorrida nesse período, também relacionada à eletrônica, foram os painéis fotovoltaicos, os quais são formados por semicondutores. O painel fotovoltaico de silício tem rendimento típico próximo de 15%. Em uma primeira análise, pode-se argumentar que o rendimento é muito baixo, menor que o das termelétricas, visto que 75% do insumo energético não são aproveitados. Entretanto, essa análise é equivocada, visto que a energia solar fotovoltaica é uma inovação tecnológica e, de forma diferente das demais formas convencionais de geração de eletricidade, não é baseada na conversão de energia mecânica em elétrica. A conversão ocorre de forma eletrônica! O efeito fotoelétrico, responsável pela geração de energia nos painéis fotovoltaicos, transforma a energia do sol diretamente em energia elétrica sem a necessidade das etapas de conversão térmica e mecânica. Essa tecnologia, intrinsecamente diferente das termelétricas, requer uma revisão da forma como o seu rendimento é analisado.

Uma termelétrica movida a combustível fóssil que apresente baixo rendimento causa um problema ambiental grave, pois muitos gases de efeito estufa serão emitidos para pouca produção de eletricidade. Já para o sistema fotovoltaico esse raciocínio não se aplica. Se uma placa de ener-

gia solar tiver rendimento nulo, nenhum problema ambiental é causado, nenhum calor adicional é emitido, nenhum gás de efeito estufa é liberado e nenhuma poluição sonora é gerada. Na pior das hipóteses a placa serve apenas para fazer sombra, o que é algo desejado em diversas situações.

Comparar o rendimento do painel fotovoltaico com o rendimento de uma termelétrica a combustível fóssil, e preterir-lo como solução tecnológica por ter rendimento menor, é o mesmo que desprezar uma vacina contra uma grave epidemia se ela, mesmo sem causar nenhum efeito colateral, não garantir 100% de eficácia. Um produto que só gera benefícios visando superar uma grave situação de crise deve ser sempre aproveitado.

Há um segundo aspecto crucial na interpretação do rendimento de um painel fotovoltaico. Um rendimento de 15% é algo relativo, haja vista ser um percentual da fonte primária utilizada para gerar a eletricidade. O sol é uma fonte de energia muito mais potente do que todos os recursos fósseis juntos, logo um percentual relativamente baixo resulta, mesmo assim, em um valor absoluto expressivo de eletricidade que pode ser gerada. Em outras palavras, o sol tem energia suficiente para suprir toda a humanidade.

O advento da eletrônica fornece o conhecimento técnico e científico necessário para gerar energia a partir de fontes intermitentes de energia, em especial as renováveis. Assim, energia solar, eólica, maremotriz, oceânica, entre outras, podem ser exploradas. O que é necessário é reconhecer que o novo sistema elétrico que se afigura diante de nós será consideravelmente diferente do atual, da mesma forma que a telefonia celular gerou uma nova dinâmica comparada com a telefonia fixa.

3.4 A Importância do Consumo e Produção Responsáveis

Esses novos paradigmas exigem a revisão de todos os aspectos relacionados ao planejamento energético. Os ODS 11 – *Cidades e Comunidades Sustentáveis* e 12 – *Consumo e Produção Responsáveis* são inspirações para questionar a premissa do modelo atual, de que se deve garantir o fornecimento de energia para o crescimento do país. O ponto a ser questionado é se o crescimento econômico realmente necessita ser acompanhado de crescimento energético. A questão inovadora a ser feita é: como crescer consumindo cada vez menos energia? A eficiência energética tem papel fundamental para permitir o crescimento econômico sem obrigatoriamente necessitar de um crescimento energético na mesma razão. Um exemplo ilustrativo é apresentado a seguir, para permitir algumas reflexões.

Considere a ideia de utilizar veículos elétricos em vez de veículos com motor a combustão. Parece ser, à primeira vista, uma ótima forma de reduzir a emissão de gases de efeito estufa, além de economizar energia, visto que motores elétricos podem ter eficiência superior a 90%, enquanto motores a combustão tem eficiência próxima de 40%. Entretanto, uma visão integrada do tema leva aos seguintes questionamentos:

- de onde virá a energia elétrica necessária para alimentar os veículos elétricos? Se ela vier de uma termelétrica que queima combustíveis fósseis, não há ganhos em relação à emissão de CO₂ ou eficiência energética, apenas modificou-se o local onde o combustível fóssil é queimado; e
- o tráfego das cidades não será reduzido com a substituição de veículos à combustão por elétricos, portanto a qualidade de vida da população continuará prejudicada ao passar horas por dia no trânsito.

Quando o foco é a tecnologia, e não o ser humano, soluções tecnológicas tendem a aparecer para resolver um problema específico. Por exemplo, pode-se vislumbrar uma solução em que carros voadores são utilizados para resolver os problemas de trânsito. Tal ideia é repetidamente enfatizada em filmes de ficção científica. Porém, nessa solução, o consumo energético aumentará, pois requer mais energia para fazer um carro voar do que rodar em cima de uma pista. Essa solução, por exemplo, pode ajudar a reduzir o trânsito, mas agrava o problema energético.

A visão com foco no ser humano buscará uma solução integrada, que visa atender a todos os ODS simultaneamente. Nesse caso, transporte coletivo elétrico, alimentado por usinas que utilizam fontes renováveis, pode ser uma solução plausível. Idem para a utilização de bicicletas elétricas. Tais visões integradas devem ser trabalhadas nos estudantes!

4. NOVO PARADIGMA DE CRESCIMENTO DO SETOR ENERGÉTICO

O sistema energético mundial atual está na contramão dos esforços da sociedade em direção à uma sociedade mais próspera, justa e sustentável. Há a urgente necessidade de modificar o rumo do sistema energético, à luz das recentes diretrizes adotadas por praticamente todos os países do mundo (ODS e Acordo de Paris), para que o sistema energético possa ser re-direcionado para atender às demandas da sociedade. Isso requer um novo paradigma de crescimento do setor energético. A Tabela 3 apresenta uma comparação das características do paradigma atual de planejamento e do novo paradigma necessário.

Tabela 3. Comparação das características do modelo atual de planejamento e do novo modelo necessário

Paradigma atual	Novo paradigma necessário
Foco na tecnologia.	Foco no ser humano.
Busca gerar a energia necessária para o crescimento econômico.	Busca crescimento econômico consumindo cada vez menos energia.
Visão nacional do problema.	Visão mundial do problema.
É baseado em justiça econômica: os países em desenvolvimento têm o direito de utilizar fontes fósseis, que são mais baratas, para crescer.	É baseado em justiça social, buscando o melhor para a sociedade: todos colaboram para a redução da emissão de CO ₂ .
Visão econômica que considera principalmente os custos diretos da geração de energia.	Visão econômica que considera os custos diretos e indiretos (ambientais e sociais).
Despesas com mitigação e adaptação climática são externalidades que não devem ser consideradas no custo da energia.	Adaptação e mitigação são consideradas no custo da produção da energia.
Gerar energia é um fim por si só.	Gerar energia é um meio de promover o desenvolvimento da humanidade.
Baseado nas formas tradicionais de geração de energia.	Baseado em fontes renováveis de energia.

Fonte: elaborado pelo autor

4.1 Desenvolvimento de Novas Capacidades nos Estudantes de Engenharia

O fato de o sistema energético ser praticamente o mesmo desde sua criação, com inovações apenas pontuais, está relacionado, em parte, com a formação tradicional que os estudantes de engenharia recebem na universidade.

O setor energético é planejado e conduzido essencialmente por engenheiros. A engenharia é uma ciência tradicional e importante para garantir o crescimento da infraestrutura dos países, porém há a necessidade de modernização do curso, para formar profissionais com as novas capacidades requeridas pelas demandas atuais.

Muitas vezes os estudantes escolhem o curso de engenharia por possuírem um desejo de criar algo novo que promova o progresso da sociedade. Ainda não sabem o que poderão fazer, mas possuem a esperança de que o curso lhes abrirá um leque de possibilidades que permitirão realizar grandes feitos em prol da humanidade. Porém, o formato atual dos cursos de graduação em engenharia não atende completamente a essas expectativas. Nos dois primeiros anos, os estudantes cursam diversas disciplinas de cálculo e física. Apesar de serem ferramentas fundamentais para a engenharia, promovem, de forma inconsciente, um efeito colateral na criatividade dos estudantes. Em cálculo, aprendem que existe apenas uma resposta certa para os problemas. Em física, aprendem leis universais (tais como lei de Faraday, Kirchhoff, Ohm etc.) que valem hoje, sempre valeram no passado e sempre valerão no futuro. De forma indesejada, é passada a mensagem de que só existe uma solução para os problemas da humanidade, que é a solução adotada atualmente, pois foi a melhor no passado e continuará sendo a melhor no futuro. Tal efeito colateral indesejado tende a desestimular a criatividade dos estudantes. Assim, ao chegarem nas disciplinas específicas do curso, apresentam grande desinteresse por não terem mais a motivação que os fez ingressar no curso, e se preocupam mais em concluir o curso do que utilizar o conhecimento adquirido para buscar soluções inovadoras.

Para que o setor elétrico consiga alinhar-se ao esforço global de redução de emissão de gases de efeito estufa, busca de justiça social e paz mundial, é necessário que os estudantes de engenharia conheçam esses problemas e os estudem durante o curso de graduação, como um nobre desafio a ser vencido. Um novo perfil profissional deve ser formado para lidar com um novo problema, cujas soluções antigas não são mais suficientes.

A importância do estímulo à inovação e criatividade é enfatizado nas diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em engenharia [6], onde é apresentada a visão do engenheiro moderno:

Art. 3º O perfil do egresso do curso de graduação em Engenharia deve compreender, entre outras, as seguintes características:

- I - ter visão holística e humanista, ser crítico, reflexivo, criativo, cooperativo e ético e com forte formação técnica;
- II - estar apto a pesquisar, desenvolver, adaptar e utilizar novas tecnologias, com atuação inovadora e empreendedora;
- III - ser capaz de reconhecer as necessidades dos usuários, formular, analisar e resolver, de forma criativa, os problemas de Engenharia;
- IV - adotar perspectivas multidisciplinares e transdisciplinares em sua prática;

V - considerar os aspectos globais, políticos, econômicos, sociais, ambientais, culturais e de segurança e saúde no trabalho; e

VI - atuar com isenção e comprometimento com a responsabilidade social e com o desenvolvimento sustentável.

Diversas universidades ao redor do mundo já estão modernizando seus currículos para que os estudantes de engenharia de sistemas de potência possam estar preparados para os novos desafios do setor energético. Uzunovic, 2018, enfatiza que os engenheiros de amanhã deverão obter conhecimentos interdisciplinares que os possibilitem criar soluções para problemas que ainda não existem. Há a necessidade de uma mudança drástica na educação em energia, incluindo estudo de temas tais como política e economia [7].

Ray *et al*, 2018, com base em uma pesquisa realizada em 137 universidades dos Estados Unidos e Canadá, indicam que os currículos dos cursos de engenharia devem evoluir para atender às necessidades educacionais da próxima geração de engenheiros de potência. Esse profissional necessita de habilidades mais diversificadas e um maior conhecimento em outras áreas do que no passado, sendo esperado que os cursos e as pesquisas abranjam tópicos fora da área tradicional de sistemas elétricos de potência. Um dos tópicos identificados como importante para o curso é “energia e sociedade”. Concluem que os principais desafios a serem vencidos são: como motivar os estudantes para o curso de graduação em engenharia elétrica com ênfase em sistemas elétricos de potência, e como evoluir os currículos para contemplar os novos desafios do setor elétrico [8].

Nagamani *et al*, 2018, analisam os cursos de graduação nessa área na Índia. Indicam a necessidade de reformas educacionais, incluindo, entre outros, a importância de abordar temas de humanidades e ciências sociais, e enfatizam a importância de aperfeiçoar as técnicas de ensino, com ênfase em resolução de problemas, orientação a projetos e aprendizagem ativa, além de técnicas pedagógicas colaborativas e cooperativas [9].

Chicco *et al*, 2018, analisam os desafios desses cursos no Reino Unido e na Itália. Declaram que o caminho para uma economia de baixo carbono passa por uma educação em engenharia que possibilite um entendimento mais amplo de tecnologia, comportamento social e economia. Os cursos de graduação e pós-graduação devem ser atualizados para garantir que os estudantes desenvolvam as habilidades necessárias para lidar com um sistema energético baseado em fontes renováveis, armazenamento e eficiência energética. No campo do doutoramento em sistemas elétricos de potência, enfatizam a importância de centros interdisciplinares que realizem pesquisas que envolvam estudantes de humanidades, engenharia e física. Finalizam indicando que os novos currículos devem combinar disciplinas técnicas de sistemas elétricos com disciplinas mais gerais que envolvam conteúdo interdisciplinar [10].

Nair *et al*, 2018, discorrem sobre a formação dos engenheiros de sistemas elétricos de potência na Austrália e na Nova Zelândia. Enfatizam que os estudantes devem aprender a pensar, e não apenas decorar conteúdo técnico. Devem desenvolver as habilidades de pensar de forma crítica, desenvolver discernimento, fazer conexões entre problemas e as técnicas apropriadas para solucioná-los, serem automotivados a investigar problemas novos, além de desenvolver a habilidade de considerar as implicações não somente técnicas, mas também sociais das decisões de engenharia. Com base em uma pesquisa realizada nas universidades, identificaram diversos motivadores que impulsionam os alunos, entre eles: realizar pesquisas que beneficiam todo o mundo, e aprender a pensar de forma inovadora sobre assuntos estratégicos [11].

Parvania and Merrill, 2018, discorrem sobre o curso em uma universidade nos Estados Unidos. Informam que os cursos de sistemas elétricos de potência estão sendo formatados com uma grande interdisciplinaridade em seu currículo, incluindo disciplinas de sustentabilidade, abrangendo meio ambiente, economia sustentável, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Informam que o objetivo é que os profissionais possam se adaptar para resolver os problemas de hoje e de amanhã [12].

Para que o estudante de engenharia elétrica possa entender o desafio a ser superado, necessita conhecer os efeitos do aumento da emissão dos gases de efeito estufa, que estão relacionados ao aquecimento global. Ao compreender as questões sociais e ambientais relacionadas com tal tema, poderá resgatar a motivação inicial que o inspirou a cursar engenharia, e colocar a criatividade e todo seu potencial na busca de soluções.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O planejamento energético tradicional deve dar lugar a um novo formato, focado no ser humano e que busca atender às demandas da sociedade, não apenas no quesito energia, mas também relacionados às questões ambientais e sociais. Para isso, é crucial o estudo interdisciplinar da energia, em especial abordando os novos paradigmas apresentados pelo Acordo de Paris e pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, para que os novos profissionais possam fazer uma mudança profunda de rumo do setor energético.

AGRADECIMENTO

O autor agradece ao professor Dr. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira (*in memoriam*) pelas valiosas contribuições e por ter incentivado profundas reflexões durante a concepção das ideias apresentadas neste capítulo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] S. EFFENDI. *Chamado às Nações*. Editora Bahá'í do Brasil, 1980.
- [2] IEA. *Key World Energy Statistics 2017*. 2017.
- [3] ONU. *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. 2015. [Online]. Disponível em < <http://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/> >. [Accessed: 20-Jul-2018].
- [4] B. K. SOVACOOOL. *What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda*. *Energy Research and Social Science*. 2014, DOI: 10.1016/j.erss.2014.02.003.
- [5] ONU. Acordo de Paris. 2015.
- [6] CNE/CES. *RESOLUÇÃO CNE/CES 2, de 24 de abril de 2019*. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. 2019.
- [7] E. UZUNOVIC. *Education for Engineering: The Changing Future of Power Education [Guest Editorial]*. *IEEE Power Energy Mag.*, v. 16, n.º 5, pp. 24-30, Sep. 2018, DOI: 10.1109/MPE.2018.2843898.
- [8] D. RAY, N. RAY CHAUDHURI, S. BRAHMA. *Trends in Electric Power Engineering Education: An Analysis of Future Challenges*. *IEEE Power Energy Mag.*, v. 16, n.º 5, pp. 32-41, Sep. 2018, DOI: 10.1109/MPE.2018.2833264.

- [9] C. NAGAMANI, M. VENKATA KIRTHIGA, M. S. THOMAS. *Power Engineering Education: A Description of Current Academic Developments in India*. *IEEE Power Energy Mag.*, v. 16, n.º 5, pp. 42-52, Sep. 2018, DOI: 10.1109/MPE.2018.2843899.
- [10] G. CHICCO, P. CROSSLEY, C. A. NUCCI. *Electric Power Engineering Education: Cultivating the Talent in the United Kingdom and Italy to Build the Low-Carbon Economy of the Future*. *IEEE Power Energy Mag.*, v. 16, n.º 5, pp. 53-63, Sep. 2018, DOI: 10.1109/MPE.2018.2841458.
- [11] N. NAIR, D. MARTIN, T. SAHA, S. ISLAM, N. WATSON. *Electrical Power Engineering Education Down Under: Australia and New Zealand Are Adding Energy to Their University Curricula*. *IEEE Power Energy Mag.*, v. 16, n.º 5, pp. 64-73, Sep. 2018, DOI: 10.1109/MPE.2018.2844418.
- [12] M. PARVANIA. H. M. MERRILL. *Toward a 21st Century Power Education: A Bright Future Awaits Students in Utah*. *IEEE Power Energy Mag.*, v. 16, n.º 5, pp. 87-95, Sep. 2018, DOI: 10.1109/MPE.2018.2843900.

CAPÍTULO 8

Desenvolvimento de Cenários para o Planejamento da Inserção da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição. Estudo de Caso Distrito Federal

Sergio de Oliveira Frontin

Rafael Amaral Shayani

Anésio de Leles Ferreira Filho



OBJETIVO

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns indicadores relacionados ao Distrito Federal (DF) que se prestarão como subsídios para a seleção dos possíveis cenários de penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) na rede de distribuição da Companhia Energética de Brasília S/A(CEB-DIS). Com base nestes indicadores, serão selecionados os alimentadores para a realização dos estudos de casos da avaliação de impactos decorrentes da integração de GDFV na rede elétrica. Cabe destacar que, devido à integração de 150 kWp de geração fotovoltaica na Faculdade de Tecnologia (FT) da UnB, parte das análises será efetuada contemplando o Campus Universitário Darcy Ribeiro.

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro tem uma capacidade de geração instalada de cerca de 160,63 GW, dos quais aproximadamente 82,1% são essencialmente provenientes de fontes de energia renováveis. Mais especificamente, cerca de 64% da matriz elétrica é oriunda de usinas hidrelétricas [1]. Mesmo assim, o Brasil tem investido em outros tipos de fontes de energia renováveis (sobretudo eólica e solar), dado que estas fontes caracterizam-se como uma maneira de se evitar as consequências que a escassez de chuva pode provocar no fornecimento de energia [2].

Em novembro de 2018, a capacidade de energia solar instalada no Brasil foi igual a 1,7 GW (1% da matriz de energia elétrica), do qual 0,378 GW foi proveniente da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) [3]. Conforme destacado por [4], [5], esta baixa capacidade de energia solar permite definir esse tipo de fonte como inexplorada e subutilizada no Brasil, apesar dos altos níveis de radiação solar, das altas tarifas residenciais, da redução dos preços do módulo solar e das grandes reservas de quartzo para produzir módulos, células solares e silício com grande pureza.

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estabeleceu, como política de incentivo no país, a *Net Metering*, objetivando o aumento da conexão do GDFV à rede. Muito embora a regulação atualmente empregada precise de ajustes [4], o número de centrais elétricas de pequena e grande escala no Brasil aumentou consideravelmente (de três projetos em dezembro de 2012 para mais de 46.000 projetos em novembro de 2018). Com o crescimento dos sistemas de GDFV, uma faixa de impactos positivos e negativos na rede de distribuição é esperada. Estes impactos estão sujeitos à localização da instalação dos módulos FV, da configuração de rede, da operação de sistemas e das características das cargas [6].

A Aneel vem acompanhando de forma sistemática o crescimento da Geração Distribuída (GD) no Brasil. A Figura 1 exibe o crescimento anual da GDFV no Brasil. Já a Figura 2 apresenta a distribuição da potência instalada por estado.

Da Figura 2, é possível observar que, muito embora a potência instalada de GD no Brasil, em 2018, seja da ordem de 460 MW, o Distrito Federal ocupa uma posição muito tímida no cenário nacional com aproximadamente 8,8 MW, o que representa cerca de 2 % da potência total instalada de GD. Até o momento, podem-se destacar Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná como os maiores estados em capacidade instalada de GD.

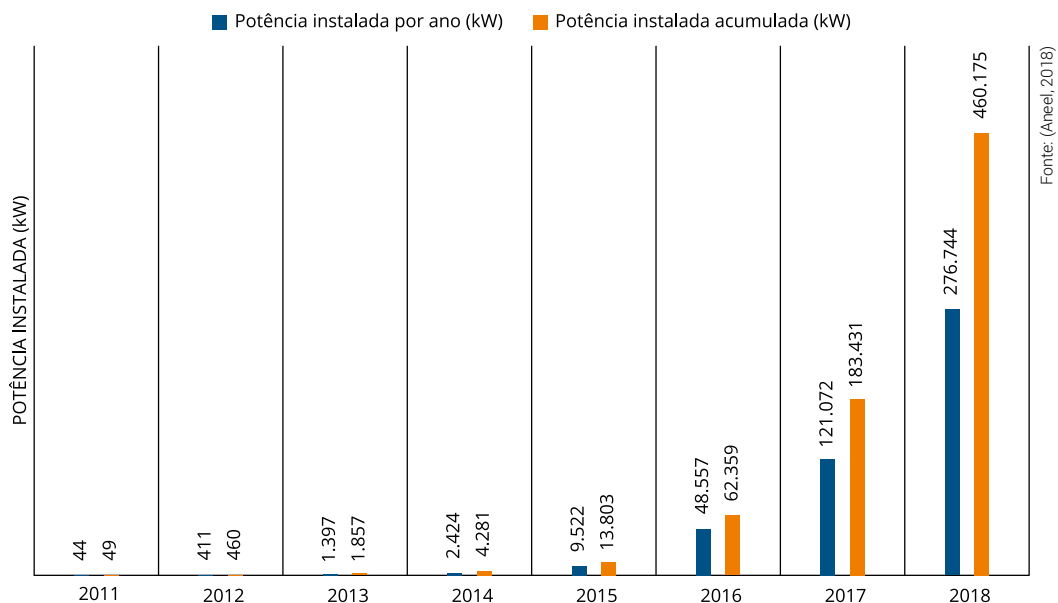


Figura 1. Crescimento anual da GDFV no Brasil

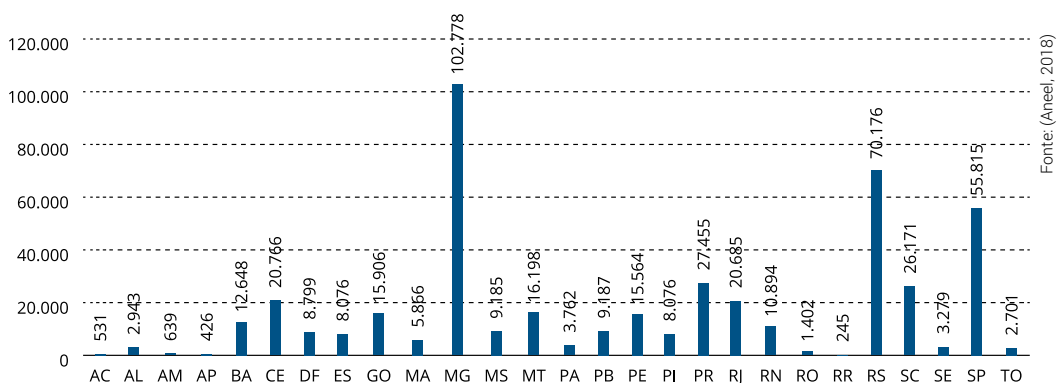


Figura 2. Potência instalada de GDFV por estado (kW)

Entretanto, o potencial de crescimento da Geração Distribuída no Distrito Federal é muito grande, motivada por diversos fatores, a saber:

- elevado índice de irradiação solar;
- alto poder aquisitivo da população que, dependendo dos benefícios e linhas de financiamento a serem apresentados, pode instalar os sistemas em suas casas e condomínios;
- os resultados do levantamento realizado pelo Programa Brasília Solar apontaram um elevado potencial para a geração de energia solar em prédios e instalações públicas do governo distrital (estações de metrô, escolas, hospitais, postos policiais e quartéis de bombeiros, dentre outros); e
- a grande quantidade de prédios públicos do governo federal existentes em Brasília, que apresentam possibilidade de instalação de módulos FV nos seus telhados.

Além destes fatores, pode-se ainda citar a Lei n.º 6.043/17 [7] que institui a política de incentivo à geração de energia limpa em prédios residenciais ou não no Distrito Federal. Esta lei indica, dentre outros, os seguintes artigos:

- o Poder Público pode promover campanha educativa de forma a esclarecer a população do DF sobre os benefícios da utilização de energia limpa;
- o Poder Público pode subsidiar e promover incentivos fiscais para a aquisição de equipamentos de captação e distribuição de energia limpa;
- os prédios a serem construídos, reformados ou alugados pelo Poder Público, se tecnicamente viável, devem utilizar energia limpa; e
- as novas edificações voltadas para programas de habitação de interesse social devem, preferencialmente, ter sistemas de captação de energia solar com a utilização de micro e/ou minigeração distribuída de energia elétrica.

Com base nestes artigos, dependendo da efetividade das ações, a CEB-DIS poderá ser demandada quanto ao acolhimento em sua rede de distribuição de fontes de energia em diferentes localidades.

Com isso, pode-se inferir que o mercado do Distrito Federal é altamente promissor no tocante à instalação de fontes de energia fotovoltaica, o que conduz à necessidade de execução de estudos detalhados de impactos nas redes de distribuição da CEB. Nesse contexto, o estudo de cenários assinala-se como importante oportunidade de escolha de alguns alimentadores da rede elétrica da CEB que, diante das perspectivas apresentadas, deverão receber elevados níveis de penetração de GDFV.

2. INDICADORES DO DISTRITO FEDERAL

Conforme mencionado, será estudado o Distrito Federal como estudo de caso. E nesse sentido serão inicialmente apresentados os principais indicadores relacionados ao uso de GD no DF, extraídos do Atlas do Distrito Federal 2017, publicado pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal (Codeplan) [8].

2.1 Indicadores Econômicos

A Figura 3 apresenta o Produto Interno Bruto (PIB) dos estados brasileiros. Desta figura, é possível concluir que o PIB *per capita* do DF permaneceu na primeira posição entre as unidades da federação em todo o período de 2010 a 2014. Considerando a população do Distrito Federal em 2014 com 2,852 milhões de habitantes, chega-se ao PIB *per capita* calculado de R\$ 69.216,80. Este valor é mais de 2,4 vezes o PIB *per capita* brasileiro de R\$ 28.500,24, 1,6 vezes o de São Paulo, o segundo maior (R\$ 42.197,87), e 6,2 vezes o do Maranhão (R\$ 11.216,37), o menor do País.

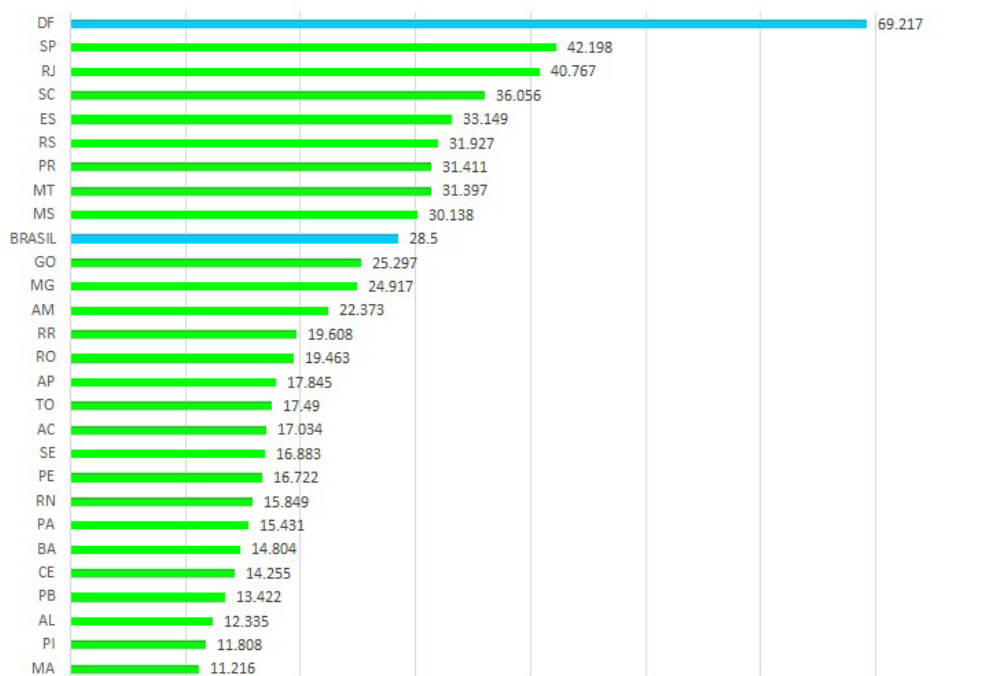


Figura 3. Produto Interno Bruto dos estados brasileiros

No DF os setores agropecuário e industrial possuem pouca representatividade, mas, em contrapartida, o setor de serviços é o principal sustentáculo da economia. No exercício de 2014, ele foi responsável por 92,9% do Produto Interno Bruto, conforme informações da Codeplan/IBGE. A Figura 4 exhibe a participação das atividades do setor de serviços no PIB do DF em 2014.

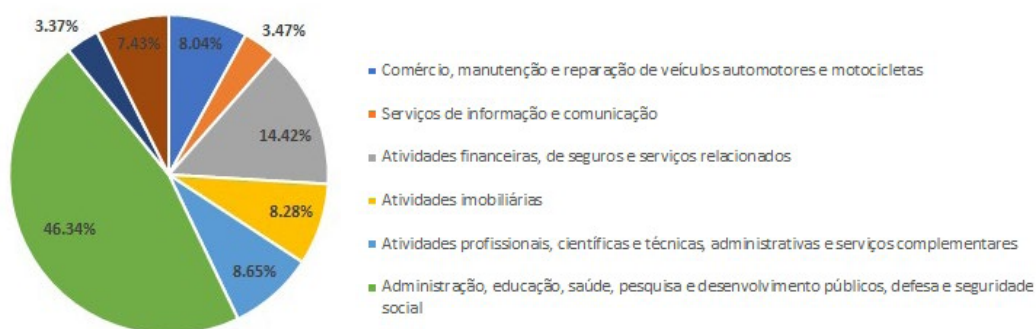


Figura 4. Participação das atividades do setor de serviços no PIB do DF em 2014

Da Figura 4 nota-se que, dentre as atividades que integram este setor, encontram-se aquelas ligadas à área pública como Administração, Educação, Saúde, Pesquisa e Desenvolvimento Públicos, Defesa e Seguridade Social. Tais atividades apresentaram a maior participação no PIB do DF, com 46,34%.

O fato de o DF possuir a mais elevada renda *per capita* do Brasil com uma expressiva participação das atividades de serviços na sua composição o caracteriza como uma potencial região para o crescimento do uso de GD.

Tabela 1. População do Distrito Federal por Região Administrativa

Número	Regiões Administrativas	Área (em ha)	População urbana 2015	Densidade demográfica
I	Plano Piloto	44.934,4	210.067	4,67
II	Gama	27.546,1	134.111	4,87
III	Taguatinga	5.943,4	207.045	34,84
IV	Brazlândia	47.042,0	51.816	1,10
V	Sobradinho	19.694,2	62.763	3,19
VI	Planaltina	153.228,8	190.495	1,24
VII	Paranoá	78.090,3	44.975	0,58
VIII	Núcleo Bandeirante	1.533,8	23.562	15,36
IX	Ceilândia	23.312,9	479.713	20,58
X	Guará	2.523,8	133.171	52,76
XI	Cruzeiro	319,3	29.535	92,50
XII	Samambaia	9.999,5	258.457	25,85
XIII	Santa Maria	10.908,2	125.559	11,51
XIV	São Sebastião	28.942,6	99.525	3,44
XV	Recanto das Emas	10.261,5	146.906	14,32
XVI	Lago Sul	7.605,6	28.981	3,81
XVII	Riacho Fundo	1.817,3	40.098	22,06
XVIII	Lago Norte	6.376,3	36.394	5,71
XIX	Candangolândia	660,2	15.641	23,69
XX	Águas Claras	2.496,5	138.562	55,50
XXI	Riacho Fundo II	3.846,2	51.709	13,44
XXII	Sudoeste/Octogonal	646,5	52.990	81,96
XXIII	Varjão	205,4	8.453	41,15
XXIV	Park Way	10.775,6	19.803	1,84
XXV	SCIA (1)	738,7	38.429	52,02
XXVI	Sobradinho II	20.958,2	100.683	4,80
XXVII	Jardim Botânico	33.401,8	26.882	0,80
XXVIII	Itapoã	3.346,9	67.238	20,09
XXIX	SIA (2)	2.904,5	1.990	0,69
XXX	Vicente Pires	4.403,6	72.733	15,52
XXXI	Fercal	12.374,4	8.288	0,67
	Totais	576.838,6	2.906.574	5,04

Fonte: Codeplan

Além da densidade demográfica, pode-se ainda considerar a renda domiciliar *per capita* das Regiões Administrativas do DF, conforme indicada a seguir (Codeplan).

- **Grupo I - Alta Renda – (renda domiciliar acima de R\$ 10.000,00).**
Lago Sul, Park Way, Sudoeste/Octogonal, Plano Piloto, Jardim Botânico e Lago Norte.
- **Grupo II - Média-Alta Renda – (renda domiciliar entre R\$ 10.000,00 e R\$ 5.000,00).**
Águas Claras, Vicente Pires, Guará, Cruzeiro, SIA, Sobradinho II, Taguatinga, Sobradinho, Núcleo Bandeirante.
- **Grupo III - Média-Baixa Renda – (renda domiciliar entre R\$ 5.000,00 e R\$ 2.500,00).**
Riacho Fundo, Gama, Candangolândia, Samambaia, Brazlândia, Planaltina, Santa Maria, Riacho Fundo II, São Sebastião, Ceilândia, Recanto das Emas, Paranoá, Itapoã.
- **Grupo IV - Baixa Renda – (renda domiciliar abaixo de R\$ 2.500,00).**
Fercal, Varjão, SCIA – Estrutural.

A seguir, serão apresentadas algumas características dos apartamentos, casas, escolas, hospitais e postos de saúde do DF. Trata-se de locais que, com a aprovação da Lei n.º 6.043/17, têm elevada probabilidade de receberem módulos FV.

2.3 Apartamentos, Casas, Escolas, Hospitais e Postos de Saúde do DF

Os telhados de residências e edifícios constituem locais que, em geral, podem receber módulos fotovoltaicos. Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta a quantidade de apartamentos e casas por Região Administrativa, de acordo com levantamento realizado pela Codeplan em 2013.

Tabela 2. População, quantidade de apartamentos e casas por Região Administrativa

Regiões Administrativas	População	Quantidade de apartamentos	Quantidade de casas
Brasília	216.307	61.528	7.977
Brazlândia	50.490	495	14.223
Candangolândia	17.560	370	4.090
Ceilândia	454.335	3.195	122.960
Cruzeiro	31.836	7.455	2.331
Fercal	8.180	10	2.195
Gama	134.547	6.579	31.605
Guará	119.340	18.360	18.450
Itapoã	59.772	147	15.291
Jardim Botânico	25.335	90	7.380
Lago Norte	34.300	2.240	8.100
Lago Sul	31.472	48	8.720
Núcleo Bandeirante	24.315	3.885	3.195
Paranoá	46.256	952	11.144
Park Way	19.476	72	5.220
Planaltina	185.591	1.507	48.301
Recanto das Emas	138.072	264	35.816
Riacho Fundo	37.158	2.728	8.008
Riacho Fundo II	40.060	240	10.540
Samambaia	229.500	6.750	56.250
Santa Maria	122.304	1.617	31.605
SCIA	35.520		7.760
SIA	1.851	78	390
Sobradinho	63.050	3.975	13.625
Sobradinho II	98.700	1.530	24.990
Sudoeste/Octogonal	53.250	16.900	
São Sebastião	98.120	660	25.355
Taguatinga	210.966	20.370	44.394
Varjão	10.116	252	1.878
Vicente Pires	72.336	1.012	18.062
Águas Claras	118.567	26.513	11.005
Totais	2.788.682	189.822	600.860

Fonte: Codeplan – Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílio 2013

Dentre os prédios públicos, as escolas têm sido os locais usualmente apontados para a instalação de painéis solares, não somente com o objetivo da redução do consumo de energia, mas também como laboratório para divulgação da tecnologia dentre os alunos e professores.

A infraestrutura do sistema educacional do DF, em 2014, conforme dados da Secretaria de Educação, contava com 1.161 escolas, sendo 662 escolas da rede pública, localizadas nas zonas urbana e rural. A Figura 6 mostra o mapa da distribuição das escolas públicas pelas Regiões Administrativas do DF.

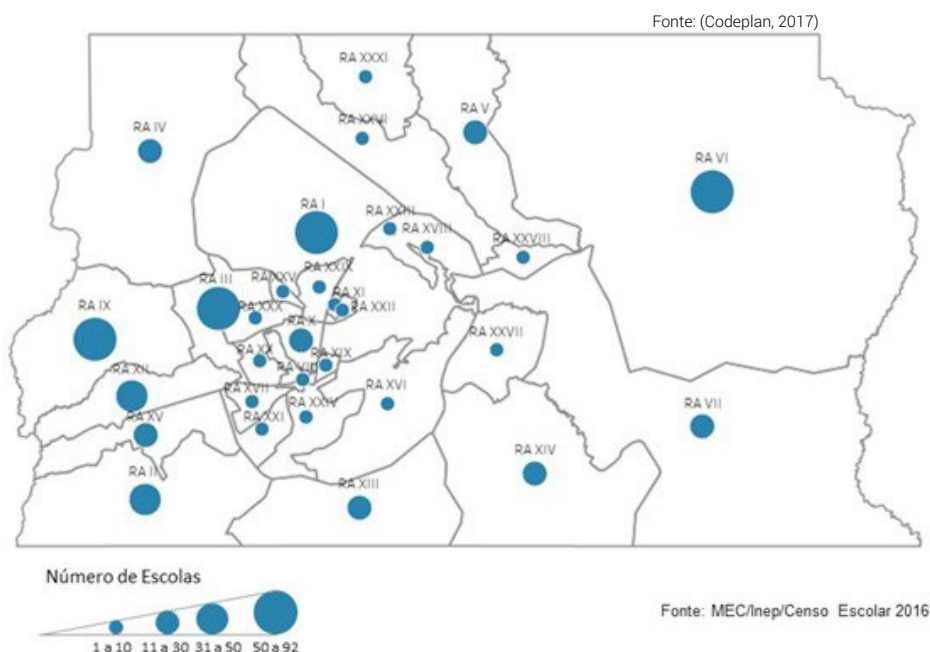


Figura 6. Localização das escolas públicas pelas Regiões Administrativas do DF

Os hospitais e as demais unidades de saúde são igualmente pontos focais para instalação de painéis solares. Nesse sentido, faz-se necessário determinar a localização destes painéis com vistas às suas utilizações no estabelecimento de cenários para a avaliação dos impactos da integração de GDFV na rede elétrica. De acordo com levantamento realizado pela Codeplan (2017), a rede hospitalar do DF conta, conforme dados de 2015, com 22 hospitais públicos: 16 são de responsabilidade da Secretaria de Saúde, quatro são militares, e dois são da Administração Federal. O Plano Piloto concentra cinco dos 16 hospitais geridos pela Secretaria de Saúde do DF, a saber:

- Hospital Regional da Asa Sul (HRAS – Materno Infantil);
- Hospital Regional da Asa Norte (HRAN);
- Hospital de Base do Distrito Federal (HBDF);
- Hospital de Apoio de Brasília (HAB); e
- Hospital da Criança de Brasília (HCB).

Os hospitais regionais estão distribuídos nas seguintes regiões: Brazlândia, Ceilândia, Gama, Guará, Paranoá, Planaltina, Samambaia, Santa Maria, Sobradinho e Taguatinga.

Os hospitais públicos não administrados pela Secretaria de Saúde são:

- Plano Piloto;
- Hospital Naval;
- Hospital Sarah Kubitscheck (Público Federal);
- Hospital Universitário de Brasília (HUB - Público Federal) RA XI – Cruzeiro;
- Hospital das Forças Armadas (HFA); e
- Hospital Militar de Área de Brasília.

Lago Sul

- Hospital de Força Área de Brasília.

A Tabela 3 apresenta as unidades de saúde da Secretaria de Estado de Saúde por tipo e por Região Administrativa em 2014.

Tabela 3. Unidades de saúde da Secretaria de Estado de Saúde por tipo e por Região Administrativa

Regiões Administrativas	Unidades de saúde					Total
	Hospitais	Centros de Saúde	Posto de Saúde Urbano	Postos de Saúde Rural	Unidade Pronto Atendimento	
Plano Piloto	5	7	-	-	-	12
Gama	1	7	1	2	-	11
Taguatinga	2	8	-	-	-	10
Brazlândia	1	2	2	2	-	7
Sobradinho	1	3	-	4	-	8
Planaltina	1	5	3	6	-	15
Paranoá	1	1	-	5	-	7
Núcleo Bandeirante	-	1	-	-	1	2
Ceilândia	1	11	1	1	1	15
Guará	1	3	2	-	-	6
Cruzeiro	-	2	-	-	-	2
Samambaia	1	4	1	-	1	7
Santa Maria	1	2	3	-	-	6
São Sebastião	-	1	2	1	-	4
Recanto das Emas	-	2	1	-	1	4
Lago Sul	-	1	-	-	-	1
Riacho Fundo	-	1	-	-	-	1
Lago Norte	-	1	-	-	-	1
Candangolândia	-	1	-	-	-	1
Águas Claras	-	-	1	-	-	1
Riacho Fundo II	-	1	2	1	-	4
Varjão	-	1	-	-	-	1
Park Way	-	-	-	1	-	1
SCIA (1)	-	1	-	-	-	1
Itapoã	-	-	1	-	-	1
Distrito Federal	16	66	20	23	4	129

As Figuras 7 e 8 (mapas) apresentam as localizações físicas dos hospitais e dos centros de saúde do DF.

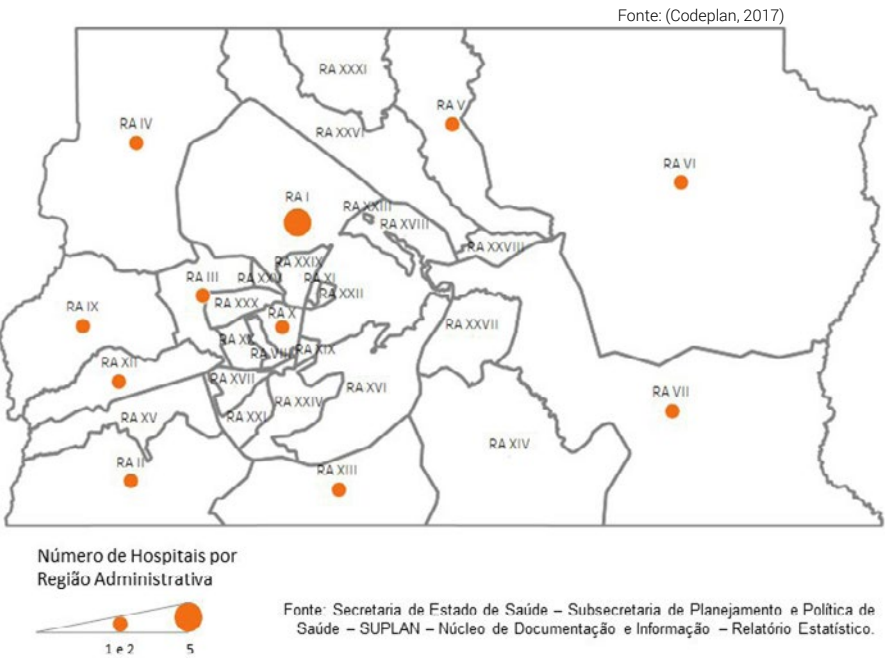


Figura 7. Mapa dos Hospitais no Distrito Federal

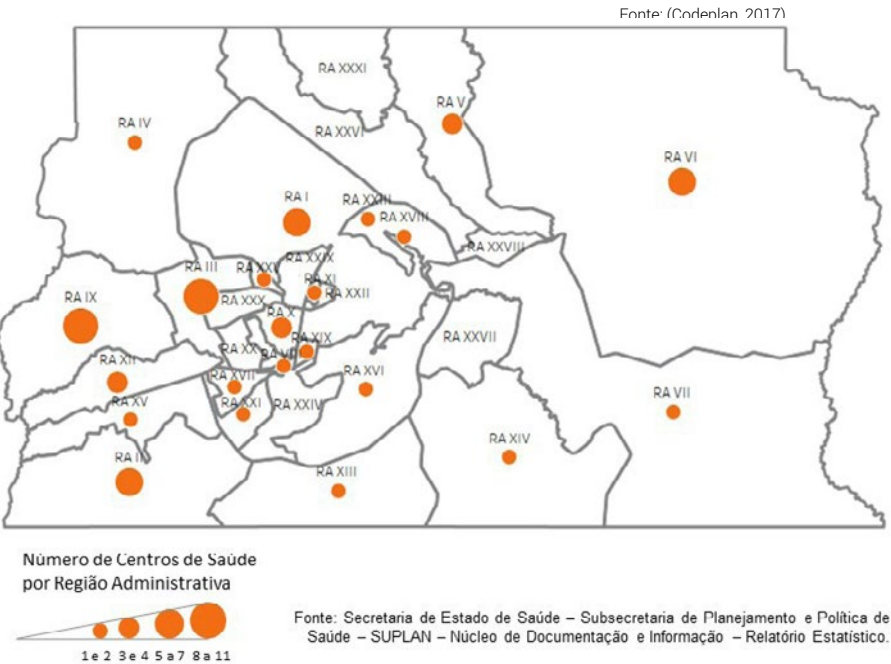


Figura 8. Centros de Saúde no Distrito Federal

2.4 Edifícios da Polícia Militar e dos Bombeiros do DF

As Figuras 9 e 10 exibem, respectivamente, o número de batalhões da Polícia Militar por Região Administrativa do DF. Destas figuras, é possível observar que o Plano Piloto concentra um número significativamente maior de batalhões. Isso ocorre porque, com algumas exceções, esta região contém praticamente a totalidade dos órgãos do Poder Federal e Local, além das Representações Diplomáticas dos Países e Entidades Internacionais. Em seguida, em termos de número de batalhões, têm-se: Ceilândia, Taguatinga, Gama e São Sebastião. Trata-se de regiões com áreas mais extensas e/ou com maior número de habitantes.

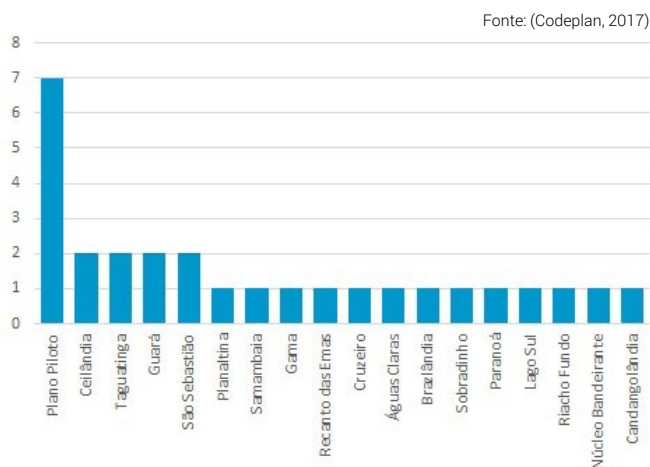


Figura 9. Número de Batalhões da Polícia Militar no DF

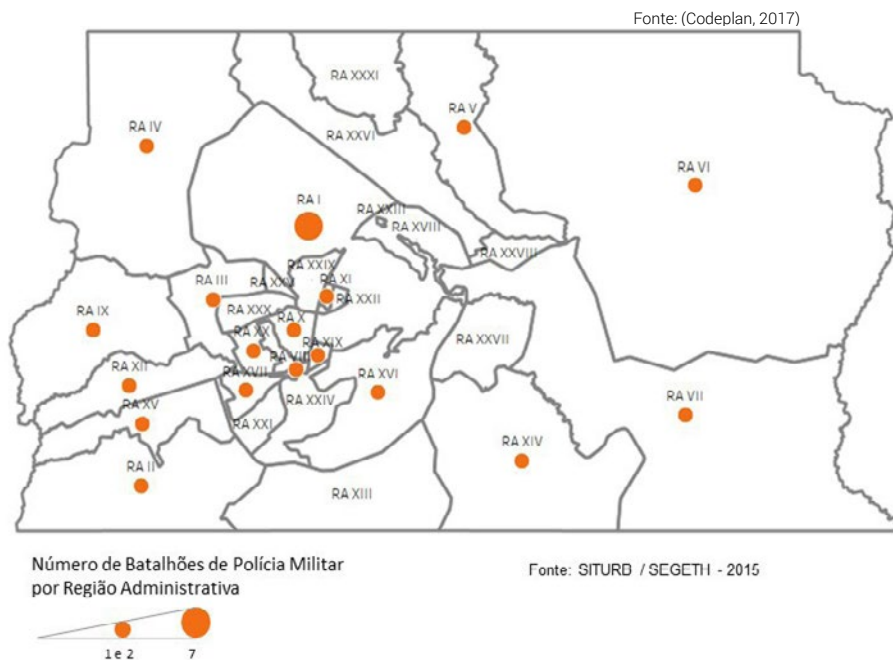


Figura 10. Localizações dos Batalhões da Polícia Militar no DF

As Figuras 11 e 12 exibem, nesta ordem, o número de grupamentos de Bombeiro Militar por Região Administrativa do DF e suas localizações.

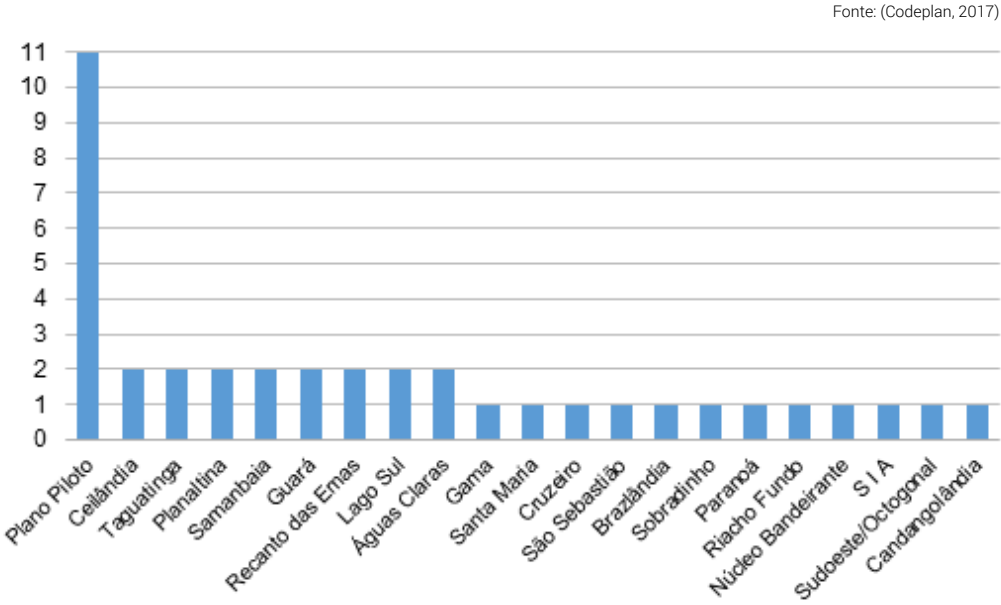


Figura 11. Número de Grupamentos de Bombeiro Militar no DF

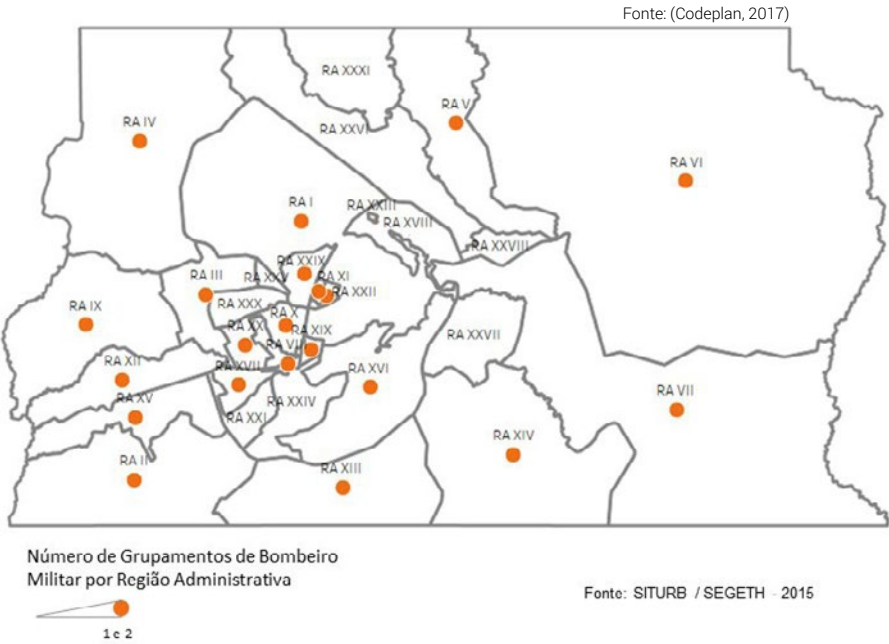


Figura 12. Localizações dos Grupamentos de Bombeiro Militar no DF

Tal como ocorre para os batalhões da Polícia Militar, o Plano Piloto possui o maior número de grupamentos de Bombeiro Militar no DF.

2.5 Estações do Metrô de Brasília

O Metrô de Brasília é operado pela Companhia do Metropolitano do Distrito Federal. Ele tem hoje duas linhas em operação, a saber: a Linha Verde e a Linha Laranja, que somam 24 estações e 42,38 km de extensão. A Figura 13 exibe as estações e suas localizações.

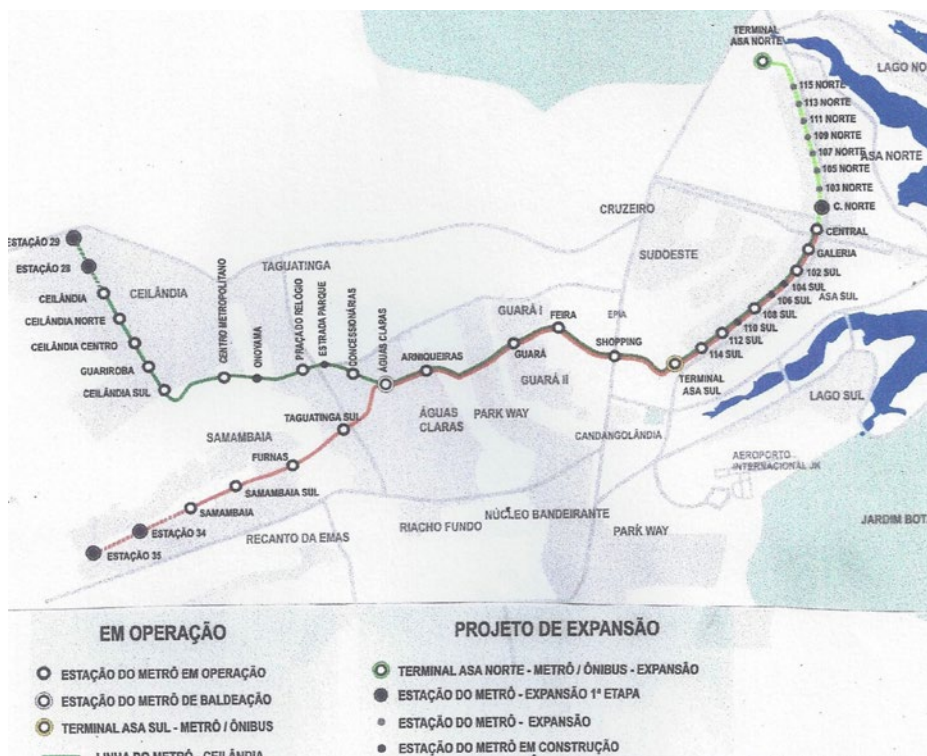


Figura 13. Linhas do Metrô de Brasília

Atualmente, o Metrô de Brasília conta com duas estações providas de instalações de energia solar fotovoltaica: Samambaia Sul (Figura 14) e Guariroba em Ceilândia (Figura 15).



Figura 14. Planta solar na estação de Metrô de Samambaia Sul



Figura 15. Planta solar na estação de Metrô de Guariroba

Na estação de Samambaia foram instalados 561 painéis com capacidade de gerar 308 MWh /ano. Na estação de Guariroba foram instaladas 578 placas gerando 288 kWh/ano. Em ambas as estações, a geração é equivalente a 100 % do consumo local.

As estações do Metrô de Brasília em operação e as planejadas constituem locais que se apresentam com grande probabilidade para a instalação de fontes de energia solar.

2.6 Edifícios do Governo Federal em Brasília

Como já anteriormente mencionado, os prédios do governo federal localizados em Brasília são outros pontos focais para a instalação de painéis solares. Podem-se indicar principalmente os ministérios e os seus anexos, além dos prédios dos tribunais, Congresso Nacional, autarquias, bancos etc.

Nesse sentido, deve-se destacar a miniusina piloto instalada no telhado do prédio do Ministério de Minas e Energia. Esta usina tem a capacidade de 50 kWp e supre 7 % do consumo do prédio.

Outro exemplo é o projeto de eficiência energético da sede da Aneel lançado em 2016. Este projeto, em parceria com a CEB-DIS, visa modernizar os sistemas de iluminação e climatização além da instalação de um sistema de microgeração distribuída. Serão instalados na cobertura dos três prédios do conjunto 1.760 painéis solares com potência instalada de 510,40 kWp. A expectativa é de que cerca de 20 % da energia utilizada pela Aneel seja atendida por esta microgeração.

3. CAMPUS UNIVERSITÁRIO DARCY RIBEIRO

O Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) elaborado em 2017, pelo aluno J. V. Gregório, intitulado "Modelagem do Sistema Elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para Avaliação da Inserção de Sistemas Fotovoltaicos" [14], apresenta em detalhes o sistema de alimentação de energia elétrica do Campus.

A Figura 16, abaixo, apresenta uma parte do Campus Darcy Ribeiro que possui uma área total de 3.950.579 m² com uma área construída de 552.172 m².

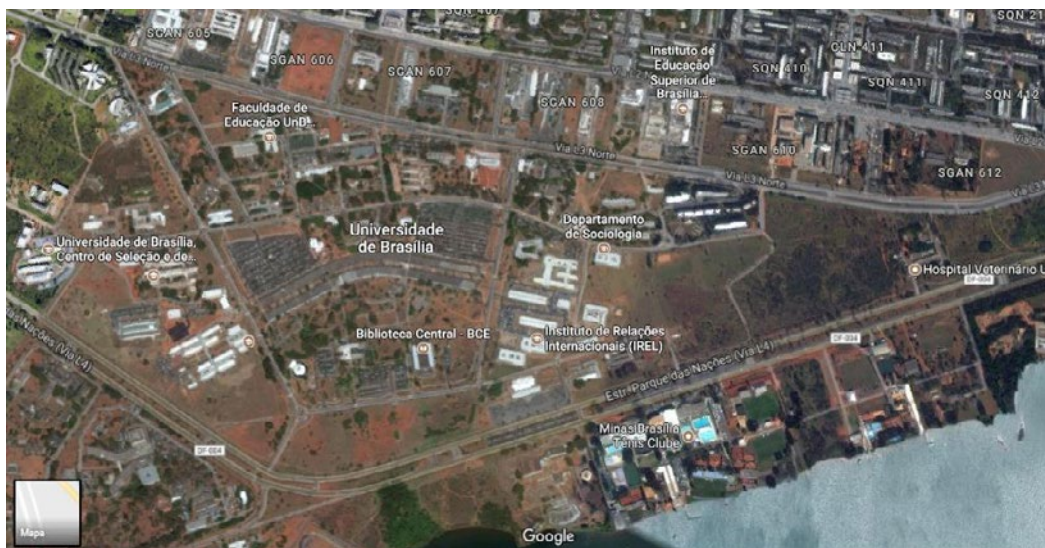


Figura 16. Parte do Campus Darcy Ribeiro da UnB

O Campus é alimentado por um sistema de distribuição de média tensão conforme disposição espacial apresentada na figura a seguir.



Figura 17. Disposição espacial dos alimentadores do Campus

Os diagramas unifilares a seguir apresentam detalhes das conexões.

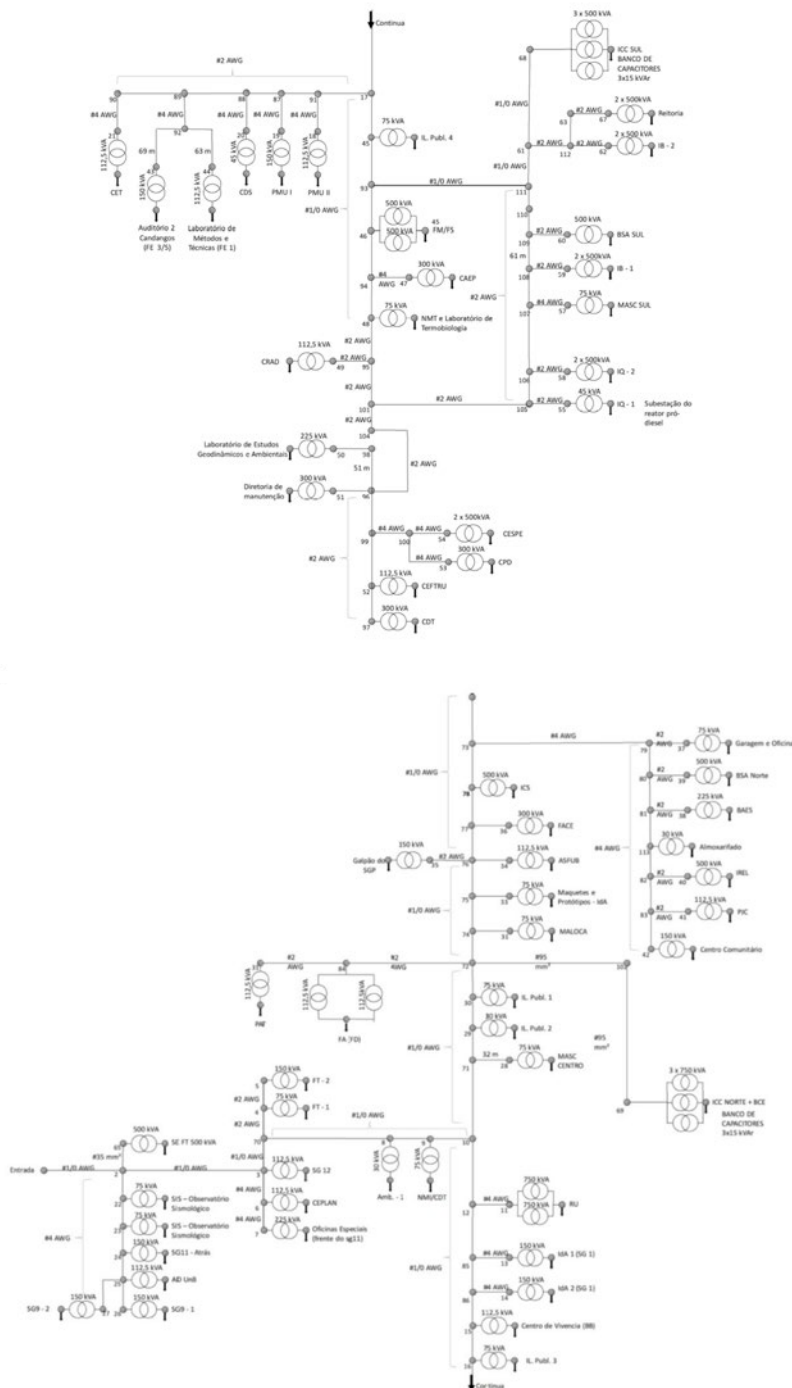


Figura 18. Diagramas unifilares dos alimentadores do Campus Darcy Ribeiro

Com base neste Trabalho de Conclusão de Curso, será selecionado um alimentador considerando a planta solar de 150 kW para os estudos de impactos da rede existente.

4. O SISTEMA ELÉTRICO DA COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA

O Relatório da Administração e Demonstrações Financeiras da CEB-DIS de 2017, publicado no Diário Oficial do Distrito Federal em 20 de abril de 2018, apresenta os seguintes dados do sistema elétrico de distribuição da empresa:

4.1 Dados Gerais

- A área de concessão da CEB-DIS abrange todo o Distrito Federal, com uma extensão de 5.801,937 km² dividida em 31 Regiões Administrativas.
- O sistema de alta tensão encontra-se interligado com o sistema de Furnas e constitui-se de 41 subestações, sendo 22 alimentadas em 138 kV; 5 em 69 kV; e 14 em 34,5 kV, perfazendo uma capacidade instalada de transformação de 2.788 MVA.
- Para a alimentação destas subestações, é utilizado um sistema constituído de circuitos de 138 kV, 69 kV e 34,5 kV, totalizando 1.078 km.
- Em 2017 a empresa atingiu 10.072 km de extensão de redes de distribuição de 15 kV (alimentadores).

4.2 Dados de Consumo de Energia Elétrica

A Tabela 4 exibe o consumo de eletricidade do DF por tipo de unidade consumidora. Da Tabela 4 infere-se que 38,4% do consumo da CEB-DIS é residencial, 32,6% comercial e 10,5% está vinculado ao Poder Público.

Cabe destacar que 5.200 domicílios do DF são atendidos pelo sistema elétrico da CEB-DIS por meio de ligações clandestinas (gambiarras), o que corresponde a aproximadamente 17 mil habitantes se beneficiando desse sistema irregular (dados de 2015).

Tabela 4. Consumo Energético do Distrito Federal em 2017

Classe	Unidades consumidoras	%	Consumo (GWh)	%
Residencial	927.342	87,8	2.187	38,4
Industrial	1.548	0,1	150	2,6
Comercial	110.596	10,5	1.860	32,6
Rural	10.556	1,0	144	2,5
Poder Público	6.328	0,6	596	10,5
Iluminação Pública	19	0,0	458	8,0
Serviço Público	337	0,0	306	5,4
Próprio	47	0,0	1	0,0
Total	1.056.773	100	5.702	100,0%

4.3 Análise do DEC e FEC da Rede de Distribuição da CEB-DIS

O indicador Duração Equivalente de Interrupção (DEC) em 2017 foi de 8,43 horas, que representa uma queda de 12,8 % em relação ao ano de 2016, abaixo do valor de 9,46 pactuado com a Aneel.

O indicador Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) em 2017 foi de 7,10 interrupções, que igualmente representou uma queda de 11,7 % em relação ao ano de 2016. Abaixo do valor de 7,91 interrupções pactuado com a Aneel.

4.4 Análise das Perdas na Rede de Distribuição da CEB-DIS

As perdas totais de energia sobre a energia requerida em 2017 foram de 892 GWh, enquanto que em 2016 somaram 836 GWh. O percentual de perdas totais sobre a energia requerida, calculada pela média móvel dos últimos 12 meses, passou de 11,75 % em 2016 para 12,56 % em 2017.

4.5 Dados de Geração Distribuída no DF

A Tabela 5 apresenta a quantidade e a potência da geração FV por tipo de unidade consumidora no DF. Estes dados foram coletados da página da Aneel em outubro de 2019 [10].

Tabela 5. Quantidade e potência de GD por tipo de unidade consumidora

Unidades Consumidora	Quantidade	kW
Residencial	1.126	7.337,23
Comercial	137	7.584,27
Poder Público	25	3.119,97
Rural	16	732,94
Industrial	5	187,10
Total	1.398	18.961,51

Da Tabela 5, pode-se constatar que:

- 1.398 unidades consumidoras possuem fontes de energia própria perfazendo o total de 18.961,51 kW de potência instalada; e
- 1.396 unidades consumidores contam com geração FV com potência instalada de 18.435,27 kWp e duas unidades com fonte térmica a biogás correspondente a 526,24 kW de potência.

Dentre as instalações existentes, podem-se citar os seguintes consumidores:

- Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel);
- Companhia de Água e Saneamento de Brasília (Caesb);
- Escola Thomas Jefferson;
- Ministério de Minas e Energia;
- Condomínio Garvey Park Norte;
- Origem – 1 MW;
- Senai Taguatinga;
- Quartel General do Exército – Setor Militar Urbano;
- Embaixada da Suíça; e
- Embaixada da Itália.

A Figura 19 exibe o mapa com a localização das diversas unidades consumidoras que possuem fontes próprias de energia elétrica.

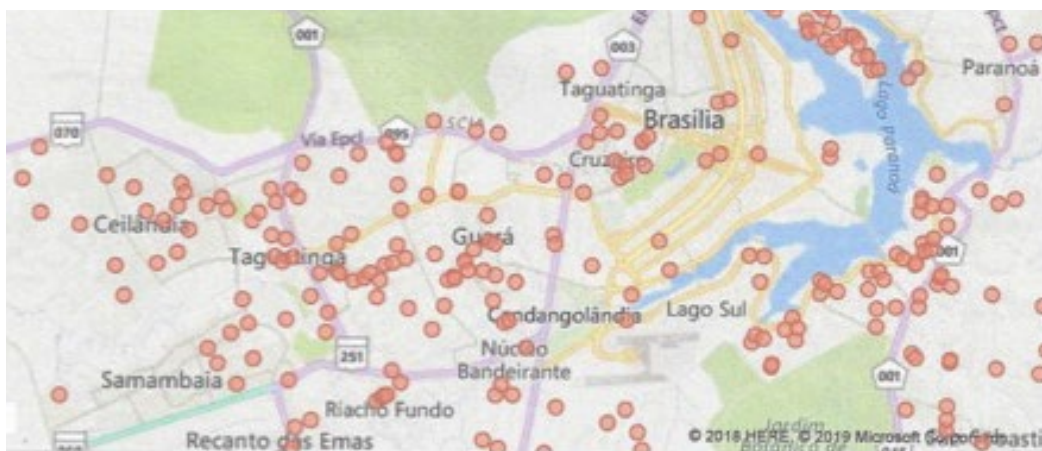


Figura 19. Mapa com a localização das diversas unidades consumidoras que possuem instalações solares

5. POTENCIAL SOLAR DE BRASÍLIA

Considerando o recurso solar médio anual do Distrito Federal de 5,8 kWh/m² dia, pode-se calcular que seria necessária uma área de 24 km² de instalação de painéis solares para suprir toda a demanda do DF, estimada em 6.085 GWh/ano (2015).

Como o Distrito Federal tem uma área total de 5.802 km², seria necessário somente utilizar 0,41 % desta área para gerar toda a eletricidade da região com energia solar fotovoltaica.

Para o consumo residencial, que é de 2.275 GWh/ano, seria necessária uma área de 9 km² coberta com módulos fotovoltaicos.

Esses são dados provenientes do estudo realizado pela *World Wide Fund for Nature* (WWF-Brasil) em parceria com a Universidade de Brasília [9], para as Regiões Administrativas: Plano Piloto, Cruzeiro, Lago Norte, Lago Sul e Park Way, que foram selecionadas tendo em vista serem regiões com os maiores indicadores de renda *per capita* e, portanto, com maiores possibilidades de investimento em energia solar fotovoltaica. Estas regiões correspondem às residências de 12 % da população do DF, sendo que o Plano Piloto e Cruzeiro apresentam elevada quantidade de apartamentos, enquanto o Lago Sul, Lago Norte e Park Way possuem principalmente casas.

Mapeados os telhados disponíveis nestas regiões, determinou-se o valor de 17,7 km², área esta com possibilidade de cobertura de painéis solares, o que corresponde a 73 % da área necessária para suprimimento de toda a demanda de Brasília.

Em 2015, o Governo do Distrito Federal criou o Grupo de Trabalho Brasília Solar, com os seguintes objetivos estratégicos: [11]

- instalar capacidade de governança política, jurídica e institucional entre os tomadores de decisão para a geração descentralizada de energia solar e eficiência energética no DF;
- instalar capacidade de gestão técnica e financeira;
- disseminar o conceito de energia renovável/solar por meio de processos de capacitação, comunicação e mobilização social; e
- tornar Brasília *showroom* de projetos demonstrativos de geração descentralizada de energia solar e eficiência energética.

Este grupo apresentou igualmente análise do potencial de energia solar de Brasília, a partir das características da irradiação solar da região e das possibilidades de telhados solarizáveis em algumas Regiões Administrativas do DF, chegando a conclusões semelhantes àquelas apresentadas pela organização WWF-Brasil em parceria com a UnB.

6. METODOLOGIA PARA ESTABELECIMENTO DE CENÁRIOS

A partir da identificação e análise dos diversos indicadores apresentados anteriormente, pode-se construir uma metodologia com o objetivo de estabelecer os possíveis cenários de penetração de GDFV na rede de distribuição da CEB-DIS.

Com base nas premissas apresentadas por esta metodologia, seria então desenvolvido um aplicativo para a seleção dos possíveis cenários, que poderia complementarmente indicar, com base em parâmetros de hierarquização a serem definidos, os cenários mais promissores.

Seria necessário utilizar para este aplicativo técnicas de geoprocessamento (GIS), para alocar geograficamente os alimentadores da CEB-DIS, cruzando as 31 Regiões Administrativas do DF.

Neste mapa então seriam inseridas diversas camadas com a apresentação de pontos de possíveis instalações de fontes de energia distribuída no Distrito Federal. São exemplos de camadas:

- pontos atualmente existentes de fontes de geração solar;
- pontos que estão atualmente em processo de análise pela CEB-DIS;
- densidade demográfica da população;
- renda domiciliar *per capita*;
- escolas públicas e privadas;
- hospitais e postos de saúde;
- postos da Polícia Militar e Corpo de Bombeiros;
- estações de metrô;
- prédios públicos do governo distrital; e
- prédios públicos do governo federal.

Outra possibilidade futura de instalação de fontes de energia distribuída poderá advir da indicação local de interesse da própria CEB-DIS, que poderá identificar pontos de energia solar que possam facilitar a operação da sua rede de distribuição, como por exemplo: pontos da rede passíveis de reduzir as perdas técnicas; pontos que possam promover a melhoria dos indicadores DEC e FEC; e pontos de difícil controle das perdas não técnicas.

Formado e consolidado este conjunto de informações, o mapa de alimentadores seria sucessivamente submetido a cada uma das camadas apresentadas, quando seria possível visualizar as possibilidades que cada alimentador poderia ter que receber no caso de viabilizados os pontos de energia indicados.

Esta análise permitiria, assim, estabelecer os possíveis cenários de penetração de GD no sistema de distribuição da CEB-DIS.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na ausência desta metodologia e aplicativo decorrente, que poderiam auxiliar na seleção dos alimentadores que apresentam fortes perspectivas de serem submetidos à entrada de diversas fontes de energia, os estudos de penetração de GD serão realizados considerando os dois alimentadores, conforme descritos no Capítulo 11.

8. REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *BIG - Banco de Informações de Geração - Capacidade de Geração do Brasil*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Consultado em novembro de 2018.
- [2] AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; DE QUEIROZ, A. R.; JUNIOR, P. R.; FONSECA, M. N. *An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience*. *Renew. Sustained. Energy Rev.*, v. 70, n.º. October 2015, pp. 1090-1098, 2017.
- [3] MME - Ministério de Minas e Energia. *Resenha Energética Brasileira 2018 – Ano Base 2017*.
- [4] DE FARIA, H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. *Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects*. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, v. 75, n.º. September 2015, pp. 469-475, 2017.
- [5] JANNUZZI, G. M.; DE MELO, C. A. *Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030*. *Energy Sustain. Dev.*, v. 17, n.º. 1, pp. 40-46, 2013.
- [6] ADEFARAI, T.; BANSAL, R. C. *Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review*. *IET Renewable. Power Generation.*, v. 10, n.º. 7, pp. 873-884, 2016.
- [7] LEI N.º 6.043/17. *Institui a Política de Incentivo à Geração de Energia Limpa em Prédios, Residências ou não no Distrito Federal*. Consultada em 22 de dezembro de 2017.
- [8] ATLAS DO DISTRITO FEDERAL 2017. Companhia de Planejamento do Distrito Federal.
- [9] POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA DE BRASÍLIA. WWF. Brasília, DF, 2016.
- [10] ANEEL. Página da Aneel. *Informações técnicas, geração distribuída, unidades consumidoras com GD e informações compiladas e mapa*. Consultada em 2 de janeiro de 2019.
- [11] GOVERNO DE BRASÍLIA. Secretaria de Meio Ambiente. Programa Brasília Solar. Consulta Pública. Brasília, 2016.
- [12] CEB. *Relatório da Administração e Demonstrações Financeiras 2017*. Publicado em 20 de abril de 2018.
- [13] CODEPLAN–GDF. *Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios do Distrito Federal*. Brasília, DF, 2015.
- [14] GREGÓRIO, J. V. *Modelagem do Sistema Elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para Avaliação da Inserção de Sistemas Fotovoltaicos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Orientador Professor Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira. Brasília, DF, 2017.

CAPÍTULO 9

Simulações em Tempo Real Envolvendo Geração Distribuída

Jorge Andrés Cormane Angarita

Anésio de Leles Ferreira Filho

Fernando Cardoso Melo

Lélio Soares Ribeiro

Victor do Prado Brasil

Marcos Diego de Castro e Silva

Ruan Pedro Araújo Tenório



OBJETIVO

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar as principais características do ambiente para simulação em tempo real de redes de distribuição e microrredes. Este ambiente de simulação torna-se uma excelente solução para a integração de tecnologias emergentes à infraestrutura do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da Universidade de Brasília, em razão do seu poder computacional e a flexibilidade de integração. Dentre as suas diversas aplicações, encontra-se a avaliação dos impactos da integração de recursos distribuídos à rede elétrica, e mais especificamente da integração de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV). Além de possibilitar a análise dos citados impactos, a tecnologia de simulação de tempo real tem o propósito de potencializar a execução de novas pesquisas de relevância para o setor elétrico brasileiro, em áreas em que poucas instituições nacionais têm atuado.

O capítulo inicia apresentando o levantamento dos trabalhos presentes na literatura atinente que versam sobre as aplicações de simulação em tempo real em sistemas elétricos de potência. As aplicações foram agrupadas em sistemas de transmissão e sistemas de distribuição, uma vez que cada um desses tipos possui especificidades próprias que demandam diferentes abordagens para a sua execução. Na sequência, são apresentadas as principais e mais recentes contribuições que contemplam Geração Distribuída Fotovoltaica conectadas aos sistemas de distribuição no âmbito nacional e internacional.

Adicionalmente, é exposto um outro levantamento que trata das instituições de pesquisa que possuem infraestrutura laboratorial necessária para a execução de simulações em tempo real. Por fim, é apresentada uma descrição do ambiente para simulação em tempo real de sistemas de distribuição de energia elétrica e microrredes.

1. INTRODUÇÃO

Visando fomentar a capacitação laboratorial em instituições públicas de ensino e pesquisa, foi prevista neste projeto a expansão do Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica (hoje chamado de Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes) da Universidade de Brasília, de modo a incorporar à infraestrutura laboratorial já existente um sistema para emular uma rede de distribuição real em baixa tensão (ou microrrede) que permita avaliar os impactos da integração de tecnologias à rede elétrica.

Para tanto, o primeiro passo desta empreitada consiste em identificar e especificar os equipamentos que devem ser empregados no laboratório para avaliação dos impactos da integração de fontes renováveis à rede elétrica. Do levantamento do estado da arte efetuado para a identificação de estudos nesta linha, observou-se que se caracteriza como uma tendência mundial para projeto, análise e teste de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, o uso de conceitos e tecnologias de simulação em tempo real. Tais conhecimentos são usados para minimizar o risco de investimento mediante a execução de simulações que permitam observar instantaneamente (do ponto de vista das tensões, correntes e potências) os impactos na rede elétrica quando influências internas ou externas a ela alteram o seu padrão de operação.

Na sequência, apresentam-se algumas vantagens e funcionalidades decorrentes da utilização de uma plataforma para simulação de tempo real para análise de impactos da integração de novas tecnologias à rede elétrica:

- interação entre modelos de simulação e equipamentos reais. Com isso, evita-se a modelagem imprecisa de sistemas complexos e se minimiza o risco de interrupções que um novo dispositivo mal especificado pode causar à rede elétrica. São exemplos de tecnologias que podem ser integradas à rede elétrica: inversores de sistemas fotovoltaicos, sistemas de carregamento de veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia, relés de proteção, transformadores, reguladores de tensão e quaisquer outros dispositivos que façam parte do conjunto de tecnologias associadas aos recursos energéticos distribuídos (REDs);
- flexibilidade típica das simulações computacionais totalmente digitais, onde é possível simular diversas configurações do sistema e condições de contorno, de forma a garantir que todos os fenômenos que ocorrem no dispositivo sob teste sejam contemplados;
- capacidade de recriar cenários de operação e situações de contingência com maior precisão. São exemplos destas situações que podem ser simuladas: novas estratégias de controle de dispositivos, coordenação e verificação de atuação de dispositivos de proteção, mudanças na topologia da rede, condições de falta causadas por defeitos na infraestrutura ou ações maliciosas, condições adversas do tempo ou manobras durante a operação;
- interatividade entre o usuário e o sistema, promovendo experiências concretas que, por sua vez, aprimoram o processo de aprendizagem. Esta tecnologia possibilita efetuar medições e observações *on-line* no equipamento sob teste, bem como a alteração dos parâmetros durante a execução da simulação; e
- redução do tempo de execução de simulações. Uma arquitetura com vários núcleos para processamento em paralelo viabiliza a execução de simulações de múltiplas redes elétricas de grande extensão em intervalos de tempo de referência definidos como tempo real.

Como se trata de uma tecnologia ainda recente, na primeira parte desta seção são exibidos os resultados do levantamento dos trabalhos presentes na literatura atinente que versam sobre o assunto. Após a apresentação do estado da arte, são apresentadas as principais características da tecnologia especificada e implantada na Universidade de Brasília para se avaliarem os impactos da integração de sistemas fotovoltaicos na rede.

2. ESTADO DA ARTE

Nesta seção são apresentados os resultados dos levantamentos bibliográficos das aplicações de simulação em tempo real em sistemas elétricos de potência, assim como das instituições com infraestrutura laboratorial que permite desenvolver experimentos aplicando os conceitos de microrredes e simulação em tempo real.

2.1 Aplicações de Simulação em Tempo Real Vinculadas a Sistemas Elétricos de Potência

Nesta seção, um levantamento dos trabalhos presentes na literatura atinente que versam sobre simulações em tempo real é exibido em três partes. A primeira e a segunda parte consistem em uma descrição das aplicações relacionadas diretamente com sistemas de transmissão e sistemas de distribuição, uma vez que cada um desses grupos de trabalhos possui especificidades próprias que demandam diferentes abordagens para a sua execução. Na terceira parte são apresentadas as principais e mais recentes contribuições que contemplam Geração Distribuída Fotovoltaica conectadas aos sistemas de distribuição no âmbito nacional e internacional.

Em aplicações de sistemas elétricos de potência, no que diz respeito às aplicações de tempo real envolvendo sistemas de transmissão, constata-se que as principais contribuições objetivam o estudo de transitórios eletromagnéticos e os testes de integração de novas tecnologias ao sistema elétrico de potência. Estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de grande porte demandam uma importante quantidade de recursos computacionais para simulação. Em vista disso, são executadas simulações híbridas que combinam análises de transitórios eletromagnéticos para componentes específicos do sistema, enquanto que os demais componentes são simulados no domínio fasorial. Estudos sobre a interoperabilidade entre tecnologias de proteção e medição fasorial têm sido executados. Nestes casos, dispositivos de proteção e esquemas de controle baseados em dados de medição fasorial são testados sob diversos cenários de contingência. Em sistemas de transmissão em corrente contínua, as simulações de tempo real são empregadas para testar diferentes tecnologias de eletrônica de potência [1].

Em relação aos sistemas de distribuição, considera-se que os novos desafios gerados pela integração à rede elétrica de novas tecnologias (inversores fotovoltaicos, carregadores de baterias, carregadores para veículos elétricos etc) demandam estratégias inovadoras de gerenciamento. Nesse cenário, boa parte das investigações envolvendo simulações de tempo real visam à avaliação de desempenho dos dispositivos durante a operação do sistema de distribuição. Em geral são avaliados os tempos de resposta, as oscilações de estado estacionário e a convergência na região de operação de máxima potência sob condições estáticas e dinâmicas. No caso das simulações de tempo real de microrredes, algoritmos voltados para a gestão da operação de microrredes são testados por meio da integração de dispositivos de acionamento e controle aos modelos de microrredes [2].

Dos aspectos ora citados, verifica-se que as aplicações de simulação em tempo real em redes elétricas estão em constante desenvolvimento. Isto ocorre em razão da exigência de soluções avançadas e de sofisticadas ferramentas de análises para tratar a complexidade das redes

elétricas modernas. Com base no exposto, apresenta-se a seguir um levantamento bibliográfico das mais recentes e importantes contribuições nacionais e internacionais sobre simulação em tempo real que tratam diretamente sobre Geração Distribuída Fotovoltaica conectadas aos sistemas de distribuição. As contribuições no que diz respeito à simulação HIL foram classificadas segundo a abordagem da aplicação em quatro conjuntos, os quais são descritos a seguir.

Na primeira deles, são encontrados os trabalhos que tratam da substituição de modelos simplificados de Geração Distribuída Fotovoltaica por dispositivos reais, de forma a contornar a complexidade existente no processo de modelagem da eletrônica de potência envolvida [3][4][5][6]. Em seguida, são apresentados o conjunto de estudos que avaliam o tempo de convergência e a precisão dos algoritmos para o rastreamento do ponto de máxima da potência [7][8][9][10][11][12][13]. A terceira abordagem trata da avaliação da escalabilidade do sistema de medição e a cobertura da rede, por meio de testes de integração de tecnologias de monitoramento e controle automático para diferentes cenários operacionais da Geração Distribuída Fotovoltaica [14][15][16]. Por fim, são exibidos projetos de bancadas de simulação HIL para ensaios laboratoriais que visam à familiarização de estudantes com a integração de novas tecnologias à rede elétrica, entre elas a Geração Distribuída Fotovoltaica, bem como os seus benefícios, desafios e perspectivas [17].

Na literatura consultada, também é comum encontrar simulações SIL ou cossimulação, nas quais um outro *software* é incorporado ao *loop* de simulação em tempo real. Ditos trabalhos exploram a ideia de que um ou mais subsistemas podem ser simulados em *loop* fechado, entre duas ferramentas de simulação em tempo real. Usualmente, essa estratégia de simulação é utilizada quando se deseja simular o sistema elétrico de potência em vários domínios [18][19][20]. Em [21], abordou-se o conceito de cossimulação distribuída. Este tipo de simulação pode ser dividido em duas categorias: a local e a geograficamente distribuída. A ideia por trás da cossimulação geograficamente distribuída é utilizar a capacidade de simulação dos vários simuladores espalhados ao redor do mundo, comunicados por intermédio da internet ou por *links* diretos de VPN cooperando na mesma simulação.

Com base no levantamento executado, é possível perceber que existe um número limitado de trabalhos disponíveis na literatura acerca da utilização de plataformas de simulação em tempo real para avaliar os impactos da integração à rede da Geração Distribuída Fotovoltaica, quando comparados com aplicações consolidadas, como as simulações de transitórios eletromagnéticos em sistemas de grande porte e as de sistemas de eletrônica de potência.

2.2 Instituições com Infraestrutura Laboratorial Orientada a Microrredes e Simulação em Tempo Real

Durante a última década, tem-se disseminado pelo mundo a ideia de construir infraestruturas laboratoriais que combinam os conceitos de simulação de tempo real e de microrredes, como uma condição necessária para elevar o nível da pesquisa ou, pelo menos, tentar equipará-lo ao patamar imposto pelos grandes centros de pesquisa e desenvolvimento do mundo. Demonstra-se, então, a importância do estabelecimento e consolidação de uma infraestrutura propícia para os estudos específicos das redes elétricas inteligentes e, conseqüentemente, para a atualização dos profissionais e pesquisadores do setor elétrico.

Na Tabela 1 são citados alguns dos laboratórios e centros de pesquisa que utilizam a tecnologia de simulação em tempo real para replicar a operação do sistema elétrico em escala reduzida.

Tabela 1. Laboratórios e centros de pesquisa em microrredes (última atualização em 1/11/2019)

Localização	Laboratório ou Centro de pesquisa
Estados Unidos	• Energy System Research Laboratories (Florida International University) • UB-BSC Smart Grid Lab (Buffalo State College/University at Buffalo) • Sensorweb Research Laboratory (Georgia State University) • Cyber-Physical Systems Security Laboratory for the Smart Grid (Iowa State University) • University of Michigan • Michigan technological university
Singapura	• Clean Energy Research Laboratory (Nanyang Technological University)
Inglaterra	• Duhram University Smart Grid Laboratory (Durham University) • Smart Grid Lab and Energy Storage Test Bed (Newcastle University) • Control and Power research group (Imperial College London)
Alemanha	• Institute for Automation of Complex Power Systems (RWTH Aachen University) • E.ON Energy Research Center (RWTH Aachen University) • Smart Energy Simulation and Automation Laboratory (University of Oldenburg)
China	• China Electric Power Research Institute • Nagoya Institute of Technology
Noruega	• Norwegian university of science and technology
Dinamarca	• Marine Power Systems Laboratory (Aalborg University)
África do sul	• Cape Peninsula University of Technology
Itália	• Center of Power Electronics and Drivers (Roma Tre University - University of Rome Tor Vergata)
França	• Super-Grid Institute

Existem outros exemplos de laboratórios de redes inteligentes implementados no mundo, entretanto os laboratórios e centros de pesquisa apresentados na Tabela 1 possuem plataformas para a simulação em tempo real similares à adquirida neste projeto. Observa-se ainda que, em todos os casos citados, além de serem incentivadas pesquisas que objetivam desenvolver aspectos inovadores para o sistema, esses ambientes são também utilizados para fins acadêmicos, favorecendo uma maior compreensão dos novos paradigmas do sistema elétrico de potência para estudantes em nível de graduação e pós-graduação. No caso do Brasil existem universidades, centros de pesquisa e organizações que também possuem tecnologia e aparato laboratorial para a execução de simulações em tempo real similares à adquirida neste projeto. A Tabela 2 apresenta alguns destes casos.

Tabela 2. Laboratórios e centros de pesquisa brasileiros com tecnologia para simulação de tempo real (última atualização em 1/11/2019)

Instituições	Laboratório ou Centro de pesquisa
Universidades	UFCEG, UFPB, UFSC, UFSM, UnB
Centros de Pesquisa	Parque Tecnológico Itaipu, CEPEL
Organizações	ONS

Conforme mencionado, com a utilização desta tecnologia, pretende-se reduzir os riscos de investimento e oferecer uma ferramenta capaz de realizar testes sem a necessidade de intervenções que afetem o fornecimento de energia elétrica por parte das concessionárias. A seguir, são descritas a infraestrutura atual do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes e os principais componentes do ambiente para simulação de tempo real selecionado para uso neste projeto.

3. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO DE TEMPO REAL PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E MICRORREDES

Neste âmbito, a rápida evolução das tecnologias para simulações em tempo real tem permitido elevar o nível das pesquisas acadêmicas e industriais em razão da sua capacidade de recriar cenários reais com maior precisão. Com isso, identifica-se um amplo conjunto de oportunidades para o desenvolvimento de pesquisas em torno de aplicações que objetivam avaliar as particularidades e exigências derivadas da operação dos sistemas de distribuição, quando da integração de recursos distribuídos e mais especificamente da Geração Distribuída Fotovoltaica.

3.1 Conceitos e Definições

Para uma simulação ser reconhecida como de tempo real, se faz necessário resolver as equações que determinam os estados dos modelos que representam o sistema em um intervalo de tempo menor ou igual àquele definido como tempo real. Caso a duração de execução das operações exceda o intervalo de tempo de referência predefinido (ou *time-step*), a simulação será denominada de tempo discreto ou *off-line*. Em geral, nas simulações de tempo discreto, o intuito é obter o resultado o mais rápido possível em função da capacidade computacional disponível e da complexidade do modelo utilizado.

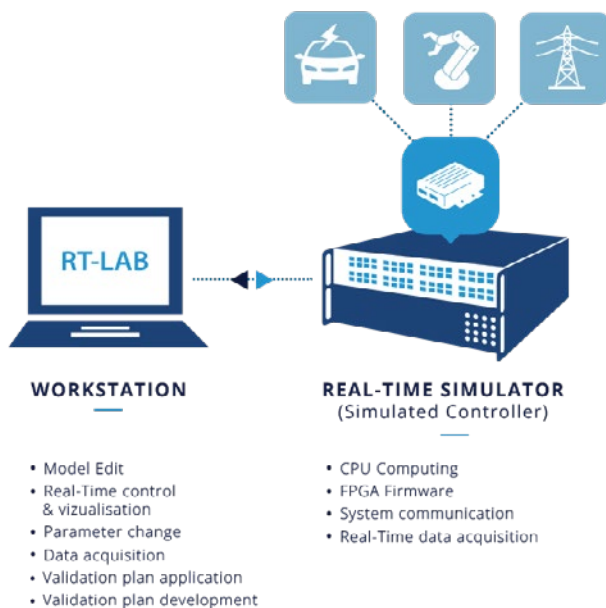
A execução de simulações de tempo real pode apresentar algumas restrições a depender do tamanho da rede e da capacidade de processamento do *hardware* e do *software* disponíveis. Observa-se que a capacidade computacional da plataforma de simulação de tempo real para este tipo de aplicações é definida como a relação entre a quantidade de nós do modelo e a resolução de tempo da simulação. Simulações de modelos de eletrônica de potência, por exemplo, são caracterizadas por intervalos de tempo de processamento menores e uma reduzida quantidade de nós. Entretanto, as simulações de modelos de uma rede elétrica de distribuição são reconhecidas pela grande quantidade de nós processados em intervalos de tempo de processamento maiores. As abordagens mais comuns para contornar ditas restrições são descritas a seguir. A primeira abordagem, que contempla um aumento do valor do intervalo de tempo para o qual a simulação progredirá na próxima etapa (tempo de referência definido como tempo real). A segunda abordagem, que trata da redução da quantidade de nós do modelo do sistema simulado, por meio da aplicação de técnicas de redução de circuitos elétricos.

Em geral, as plataformas para simulação de tempo real são frequentemente configuradas para serem escaláveis. Durante sua implementação, a capacidade de processamento pode ser incrementada por meio da adição de unidades de processamento individuais, que operam em paralelo, e que compartilham memórias ou barramentos para minimizar os atrasos na comuni-

cação entre elas. Em vários casos, modelos de sistemas complexos podem ser divididos em múltiplos subsistemas e distribuídos em diferentes núcleos paralelos. As plataformas de simulação de tempo real disponíveis comercialmente trabalham com sistemas operacionais próprios para a simulação em tempo real e são conhecidos como *Real-Time Operating System* (RTOS). Cabe ressaltar que existem também plataformas de simulação de tempo real projetadas e construídas para pesquisas com propósitos específicos. Adicionalmente, códigos e instruções desenvolvidos em diversas linguagens de programação podem ser incorporados para automatizar a simulação.

Ao adentrar na seara das possíveis aplicações de simulações em tempo real, são expostas duas grandes vertentes, a saber: i) simulação de tempo real do tipo *Software-in-the-Loop* (SIL), e ii) simulação de tempo real do tipo *Hardware-in-the-Loop* (HIL). Em geral, as simulações SIL e HIL são frequentemente empregadas para a identificação e a prototipagem rápida de sistemas, respectivamente.

Uma simulação SIL não envolve interface com o exterior, e esta requer que todo o sistema seja modelado dentro do simulador. A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento de uma simulação SIL.

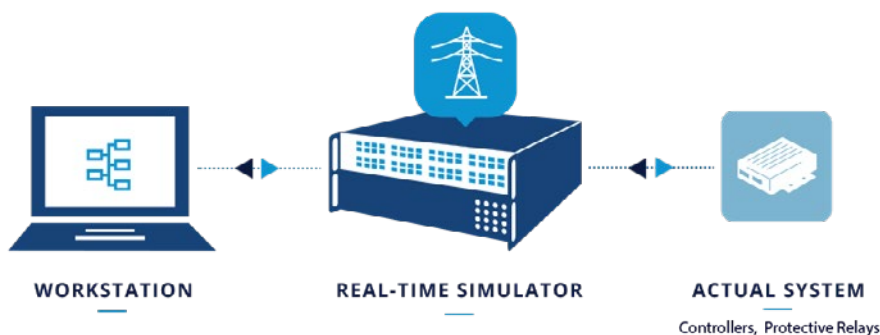


Fonte: <https://www.opal-rt.com/software-in-the-loop/>

Figura 1. Princípio de funcionamento de uma simulação SIL

Em simulações SIL, múltiplos *softwares* são integrados no mesmo ambiente de simulação. Nesse sentido, podem ser utilizadas para testar os algoritmos e procedimentos a fim de encontrar possíveis falhas ou “bugs” e evitar problemas em fases futuras e mais críticas de um projeto. As simulações SIL que trabalham com valores de *time-step* diferentes são conhecidas como simulações híbridas ou multitaxa (*multi-rate simulation*). Neste caso, para garantir a acurácia e a estabilidade da simulação, é importante particionar o sistema em subsistemas e escolher os valores de *time-step* cautelosamente. Vale a pena destacar que nesta situação existe uma preocupação com o sincronismo dos dados, visto que algumas etapas da simulação podem obter resultados mais rápidos que outras.

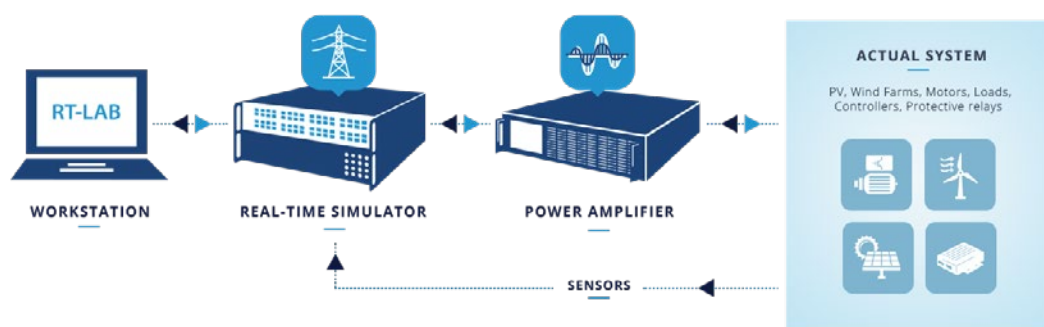
Por outro lado, a simulação HIL refere-se à condição em que partes da simulação SIL são substituídas por componentes físicos reais chamados de *Hardware-under-Test* (HuT). Estes componentes são conectados por meio de interfaces entrada-saída à plataforma de simulação. Nas simulações HIL a intenção é reproduzir o ambiente e as condições aos quais o HuT estará exposto, visando avaliar a resposta deste a condições reais de operação. A Figura 2 ilustra o princípio de funcionamento de uma simulação HIL.



Fonte: <https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>

Figura 2. Princípio de funcionamento de uma simulação HIL

Por sua vez, as simulações HIL são divididas em duas subcategorias. Uma conhecida como *Controller Hardware-in-the-loop* (CHIL), que envolve um controlador externo que interage com o modelo dentro do simulador trocando sinais de controle sem transferência de potência. Por outro lado, qualquer simulação HIL que envolva transferência de potência entre o simulador e o HuT é conhecida como *Power Hardware-in-the-Loop* (PHIL). Nesta configuração, a rede elétrica ou sistema elétrico de potência é modelado no simulador, enquanto que a outra parte consiste em um dispositivo de potência conectado externamente [22]. A Figura 3 apresenta o princípio de funcionamento e as características de uma simulação PHIL.



Fonte: <https://www.opal-rt.com/power-hardware-in-the-loop/>

Figura 3. Princípio de funcionamento de uma simulação PHIL

3.2 Metodologia para o Desenvolvimento de Simulações

A seguir são descritas as etapas que compõem a metodologia desenvolvida para execução de simulações em tempo real. Esta metodologia objetiva a avaliação dos impactos da inserção de Geração Distribuída Fotovoltaica em alimentadores de distribuição, porém pode ser aplicada para a avaliação dos impactos da integração de outras tecnologias.

Etapa 1 – Modelagem da rede elétrica

Nesta etapa, os dados dos alimentadores são oriundos do programa ProgGeoPerdas, o qual é utilizado pela Aneel para o cálculo das perdas de distribuição.

O programa ProgGeoPerdas executa o cálculo das perdas técnicas segundo o Módulo 7 do PRODIST, que estabelece a metodologia e os procedimentos para obtenção das informações e dados necessários para cálculo das perdas dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Em outras palavras, as informações referentes aos dados físicos e de energia nas unidades consumidoras fornecidas pela distribuidora para a Aneel, visando-se viabilizar os cálculos das perdas técnicas, são aqui empregadas para o cálculo dos impactos que a integração de geração fotovoltaica causa na rede elétrica.

De posse desses dados, são criados os arquivos no formato do *software Open Distribution System Simulator (OpenDSS)*, necessários para a modelagem da baixa e média tensão de cada alimentador que constitui o sistema da distribuidora.

O *OpenDSS* é um programa de código aberto destinado às análises no domínio da frequência (estado estacionário senoidal) de sistemas de distribuição de energia elétrica, desenvolvido pela *Electric Power Research Institute (EPRI)*. O programa foi concebido principalmente para executar estudos de fluxo de potência desequilibrado e harmônico voltados para a integração de recursos distribuídos na rede, usuais no atual contexto das redes elétricas modernas. O programa possui os modelos dos componentes empregados nas redes de distribuição (tais como condutores, transformadores, reguladores de tensão, bancos de capacitores etc) que, por sua vez, são parametrizados com os valores coletados diretamente da infraestrutura física das concessionárias. Destaca-se que, pelo fato de ser programa de código aberto, a utilização do *OpenDSS* não imputa custos adicionais ao órgão e às empresas que optam pelo uso do programa.

Etapa 2 – Redução de circuitos

A quantidade de barramentos ou nós que compõem o modelo da rede elétrica pode comprometer a execução da simulação no intervalo de tempo de referência (*time step*) definido como tempo real, porque as ferramentas computacionais (*software e hardware*) empregadas possuem limitações no que diz respeito à quantidade de cálculos a serem realizados no intervalo de tempo predefinido. Em geral, os alimentadores de distribuição possuem uma quantidade de barramentos muito superiores ao limite da capacidade de processamento do sistema para a simulação em tempo real. Em vista disto, se faz necessária a simplificação dos modelos utilizados, de forma a atender aos requerimentos da simulação.

Os métodos usados para a simplificação dos modelos devem preservar as características dos modelos. Para tanto, deve existir a equivalência entre os resultados provenientes do modelo simplificado e do modelo original.

O método utilizado fundamenta-se na definição e conservação de barramentos denominados como de “críticos” [23]. Um barramento é identificado como crítico quando, caso seja removido, este pode alterar a topologia do sistema ou quando nele estão conectados equipamentos essenciais para o funcionamento do circuito (transformadores, reguladores de tensão, capacitores etc). O método permite que o usuário selecione os barramentos críticos de acordo com os requerimentos das análises. Por exemplo, o usuário pode optar por definir como críticos os barramentos utilizados para avaliar os impactos da integração da Geração Distribuída Fotovoltaica.

Este método de redução de circuitos envolve a eliminação das barras não críticas intermediárias e finais. Ao ser eliminada uma barra não crítica final, a carga que estava conectada a ela passa a estar conectada na imediatamente anterior. Quando se trata da eliminação de uma barra não crítica intermediária, a carga que estava conectada a ela passa a ser distribuída entre os barramentos adjacentes. Este processo de eliminação de barras é repetido até que não existam mais barras não críticas intermediárias e finais no circuito. Vale a pena destacar que este método é aplicável apenas aos circuitos equilibrados e com valores de cargas fixos.

Em [24], uma versão do método [23] foi proposta para circuitos desequilibrados. Esta nova versão do método possibilitou a simulação para vários cenários de cargas e de geração sem o retrabalho de reduzir o circuito original novamente para as novas condições de operação/carga.

Etapa 3 – Conversão de modelos para o formato de simulação em tempo real

Visto que as redes das distribuidoras estão modeladas no *OpenDSS*, se faz necessário realizar a conversão direta destes modelos para o formato dos simuladores de tempo real RT-LAB® e ePHASORSIM® ou eMEGASIM®. Em [25], os autores trataram exatamente desta conversão. Não obstante, o método faz uso de restrições, tais como uma estrutura de dados fixa e somente considera elementos com conexões trifásicas. Ditas restrições tornam-se uma dificuldade que inviabiliza a aplicação do método, em razão de que a modelagem de um circuito no *OpenDSS* não é dada em um padrão único.

De forma a generalizar o processo de conversão de formato, foi implementada uma estratégia alternativa que recebe como entradas os dados dos circuitos após a execução do algoritmo de redução descrito na etapa anterior. Esta estratégia desenvolvida permite a conversão de circuitos sem restrições relacionadas com o padrão de declaração dos elementos nem com seu tipo de conexão.

Etapa 4 – Simulação do tipo SIL

A necessidade de aproximar o resultado da simulação da realidade do circuito sugere que dados externos na forma de séries temporais, tais como o perfil de variação diária das cargas, irradiância e temperatura, sejam incorporados à lógica de simulação do fluxo de potência. Ditas séries temporais correspondem às sequências de valores de potências ativa e reativa, por fase, para cada uma das cargas conectadas ao circuito, bem como às sequências de valores de irradiância e temperatura do local onde se encontra localizado circuito.

A geração fotovoltaica é representada por um modelo que associa os modelos dos módulos fotovoltaicos e do inversor. O ponto de conexão à rede elétrica fornece uma tensão de referência como entrada para o modelo do inversor, enquanto que a corrente de saída do inversor é retornada para barramento. Observa-se que vários tipos de dados são processados simultaneamente a cada *time-step* da simulação, como, por exemplo, valores eficazes de magnitude, valores de ângulo de fase e formas de onda. Para contornar esta condição da simulação, se faz necessária a implementação de um método que permita a transição entre os domínios da frequência e do tempo, como, por exemplo, a implementação de um algoritmo de estimação fasorial.

O *software* de simulação de tempo real é responsável por sincronizar as informações de entrada e saída a cada iteração da simulação. Ditas informações correspondem aos valores das séries temporais importados, aos sinais de referência gerados e aos sinais de medição coletados. Finalmente, é gerado um relatório da simulação contendo as grandezas de saída (tensão, corrente e potências em todos os barramentos do circuito) para cada condição do circuito. A partir deste ponto o laço de simulação considera-se fechado, caracterizando uma simulação do tipo SIL.

Etapa 5 – Simulação do tipo HIL

Nesta etapa, considera-se que um ou vários dos modelos usados na simulação SIL sejam substituídos por dispositivos reais. Para isso, deve ser adicionada uma interface para a adequação da potência que permita a interação entre os dispositivos reais e os modelos de simulação. Esta interface possibilita que o sinal de referência, originado no barramento da rede simulada, seja transmitido até o dispositivo real com o nível de potência requisitado, da mesma forma que os sinais de medição coletados no ponto de conexão sejam retornados até a plataforma de simulação, segundo as características de potência do padrão de comunicação da plataforma. A infraestrutura do ambiente de simulação será amplamente discutida na seção a seguir.

3.3 Infraestrutura do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes

O Laboratório de Qualidade da Energia (LQEE) foi criado em 2001 por um conjunto de professores e pesquisadores da Universidade de Brasília interessados em investigar os fenômenos de desequilíbrios de tensão, harmônicas, inter-harmônicas, cortes de tensão e variações momentâneas de tensão, no que diz respeito aos seus efeitos sobre equipamentos do sistema elétrico, seus protocolos de medição/monitoração, e outros aspectos técnicos e econômicos

decorrentes das suas presenças no sistema elétrico. Inicialmente, este laboratório dispunha de uma fonte controlada de tensão de 30 kVA, instrumentos de medição e motores e transformadores dedicados às citadas avaliações de efeitos. A partir de 2012, este espaço recebeu novos investimentos oriundos de projetos em parceria com o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI), empresas do setor elétrico (P&D Aneel) e órgãos como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF).

Estes investimentos viabilizaram a especificação e montagem de uma bancada eólica e a obtenção de uma nova fonte controlada capaz de gerar diversos fenômenos de qualidade da energia, inclusive inter-harmônicas. Após a expansão e atualização tecnológica da infraestrutura laboratorial, foi possibilitada a execução de pesquisas cujas abordagens eram complementares ao escopo da qualidade da energia elétrica. Por este motivo, o Laboratório de Qualidade da Energia foi renomeado para Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes.

Em virtude de sua natureza multidisciplinar, o Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da Universidade de Brasília consiste em um ambiente integrativo com infraestrutura compartilhada entre áreas de processamento de sinais, sistemas de potência, controle e automação, telecomunicações e redes de comunicação. O principal elemento do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes para o desenvolvimento de estudos relacionados com as redes inteligentes baseia-se em uma rede de baixa tensão ou uma microrrede de pequena escala, para a integração de dispositivos de monitoramento, automação e controle, geração com fontes alternativas de energia, diferentes cargas controláveis, sistemas de armazenamento de energia, entre outros.

Um ponto importante no que diz respeito à microrrede consiste na capacidade de interagir com uma plataforma para simulação em tempo real que, por meio de modelos computacionais, executa a simulação de uma rede elétrica convencional em larga escala. Esta característica torna possível a execução de investigações em temas estratégicos para o setor elétrico, tais como procedimentos de interligação de fontes descentralizadas, gerenciamento pelo lado da demanda, caracterização do estado do sistema de distribuição, análise de perfis de geração de diferentes fontes distribuídas, interoperabilidade entre tecnologias, controle distribuído, ilhamento intencional e autorrecuperação, comportamento do sistema com a presença de fluxo bidirecional de energia, entre outros.

Uma visão geral da arquitetura laboratorial concebida para o Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes está ilustrada na Figura 4, onde é possível perceber a presença de três barramentos trifásicos. Um barramento dedicado à conexão de uma microrrede, outro dedicado para a conexão da rede convencional e um último dedicado à conexão de diferentes fontes alternativas e fontes de distúrbios de tensão.

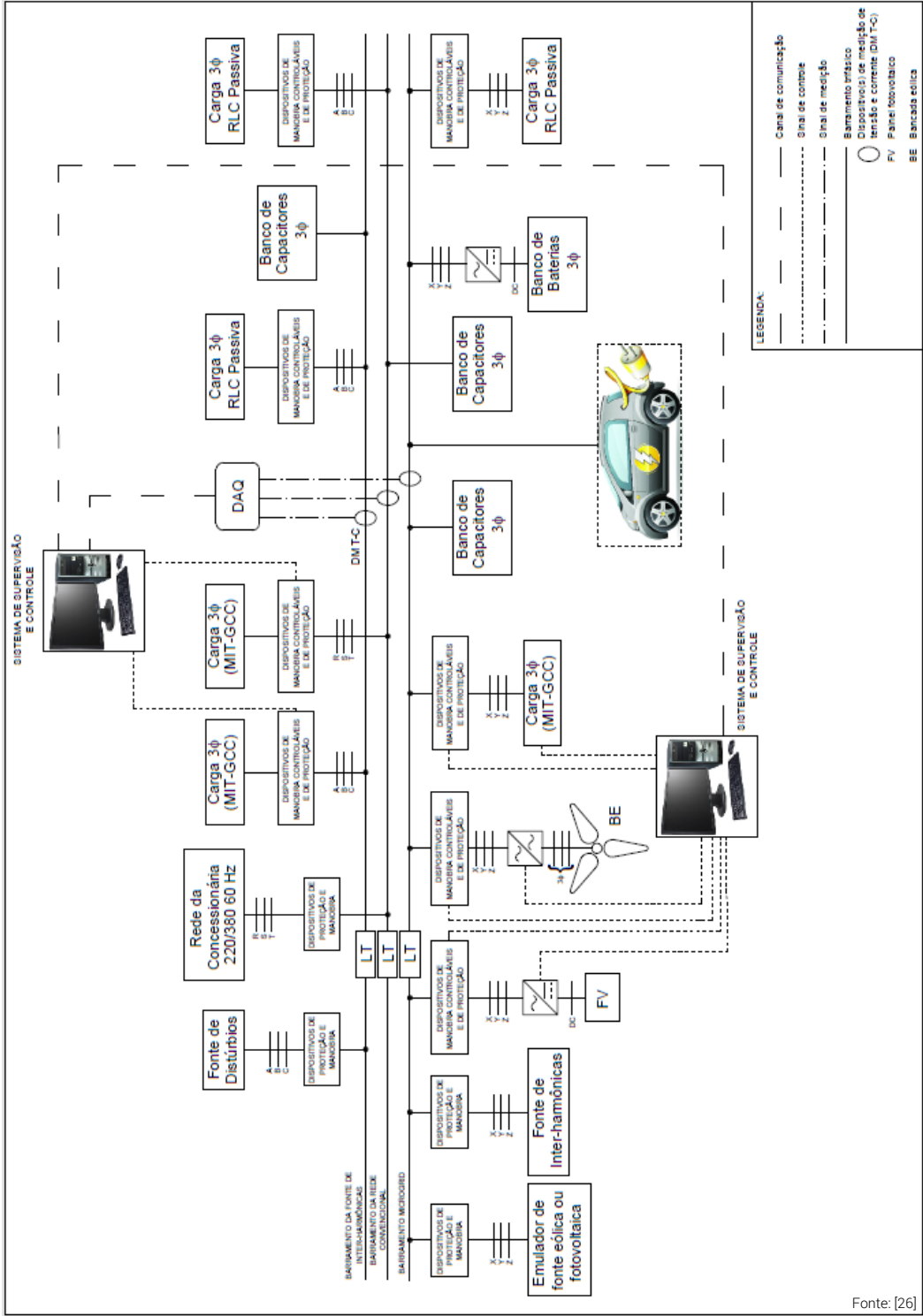


Figura 4. Diagrama unifilar da arquitetura laboratorial concebida para o Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes

Da Figura 4, pode-se perceber a presença de uma série de componentes vistos como importantes para estudos, em escala laboratorial, das redes elétricas inteligentes. Dentre os primeiros que podemos citar estão as diversas cargas controladas e não controladas conectadas a cada um dos barramentos, além do banco de capacitores. Componentes comuns aos três barramentos também podem ser citados, como, por exemplo, o gerador fotovoltaico e a bancada eólica. Com esses equipamentos, é possível verificar diretamente o funcionamento de fontes renováveis dentro de um contexto mais amplo e dinâmico, bem como avaliar seus perfis de geração e como eles podem atuar na rede para responder regimes de demanda variável.

Ao lado dessa estrutura de fontes renováveis, é importante também a presença de um banco de baterias, que deve simular os sistemas de armazenamento de energia vislumbrados como importantes aliados no fortalecimento de fontes variáveis. Nesse contexto, sugere-se a ligação de um veículo elétrico por meio de seu sistema de recarga. O veículo por si só já seria de grande valia para uma série de estudos, mas se poderiam verificar os impactos de seu carregamento para a rede, bem como a viabilidade de utilizá-lo, em paralelo ao banco de baterias, em um sistema de armazenamento, capaz de injetar energia à rede quando necessário.

O barramento da rede da concessionária conta apenas com as cargas e os sistemas de supervisão (aquisição de dados e controle), porém o que se espera é que ele possa funcionar não apenas em regime de comparação com a microrrede, mas que possa interagir com ela no sentido de possibilitar testes, como no caso de ilhamento intencional seguido de resincronização com a rede, entre outros.

No caso das fontes de distúrbios, estas serão usadas para provocar diversas condições de operação, para a avaliação do comportamento das cargas e dispositivos frente a essa alimentação deficiente. Ainda, seria possível verificar a efetividade dos algoritmos de processamento de sinais no caso da quantificação e da mitigação dos efeitos, bem como na identificação de condições que levam o sistema a ficar fora dos padrões de qualidade estabelecidos.

Os barramentos citados anteriormente conectam todos os componentes da arquitetura da microrrede construída a um simulador de tempo real capaz de executar simulações cujas condições sejam muito próximas da realidade de uma rede elétrica. O simulador de tempo real é um equipamento visto como de grande potencialidade para a integração de todos os componentes de um sistema elétrico de potência.

Por fim, tem-se um *cluster* de computadores dedicados à execução de estudos (simulações computacionais que empregam o *software OpenDSS*) de impactos da inserção de fontes renováveis na rede.

A montagem de uma infraestrutura laboratorial como a descrita anteriormente, demanda da especificação e a aquisição de uma grande quantidade de equipamentos. A seguir, apresenta-se a Tabela 3, que exhibe os equipamentos associados com a arquitetura laboratorial concebida para o Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da Universidade de Brasília. Na coluna da esquerda, apresentam-se os equipamentos vistos como importantes para o estabelecimento de uma infraestrutura laboratorial compatível com as demandas da pesquisa do setor elétrico, enquanto que, na coluna da direita, apresenta-se a listagem completa dos equipamentos hoje existentes no laboratório. A listagem da Tabela 3 é usada como referência para a aquisição e renovação de equipamentos para o laboratório de redes elétricas inteligentes. A Figura 5 exhibe parte da infraestrutura atual do mencionado laboratório.

Tabela 3. Listagem dos equipamentos associados com a arquitetura laboratorial concebida para o Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes

Equipamentos necessários	Equipamentos existentes
Carga linear variável	Bancada trifásica RLC Bancada trifásica resistiva Bancada trifásica indutiva
Carga não linear programável	Carga Eletrônica CA Programável
Medidor eletrônico de energia e Analisadores de redes elétricas	Medidor de Grandezas de qualidade da energia QEE ION Dois Analisadores de Energia 4500 Elspec Black Box Registrador de Qualidade de Energia Fluke 1744
Sensores, sistema de aquisição de dados para diversos padrões de comunicação (PCI NI, USB NI, Ethernet NI etc)	Unidade de Aquisição de Dados HP34970A Placa DAQ PCI Adam 4520 Osciloscópios Multímetros True RMS Fluke 179 Encoder Veeder-Root Sensores de Torque MKDC Câmera Térmica FLIR SC325
Fonte CC controlável	Fonte Eletrônica CC 30 V
Fonte CA variável	Variac Trifásico e Monofásico
Fonte de distúrbios	Fonte de Distúrbios California Instruments 5001ix 30 kVA Fonte controlada de 12 kVA capaz de gerar inter-harmônicas Fonte controlada de alta precisão
Máquinas CC e CA	Motor de indução trifásico de 1 CV Motor de indução trifásico de 3 CV Bancada motor CA – gerador CC de 1 CV Gerador síncrono de 12 kVA
Fontes de geração de energia renovável	Sistema fotovoltaico 1 kW Bancada eólica
Plataforma computacional para processamento em paralelo	Cluster para processamento paralelo
Plataforma para simulação em tempo real	Simulador OP5707-8 da OPAL-RT
Sistema de adequação da potência	Conversor com arquitetura <i>back-to-back</i> de 17 kW
Infraestrutura de instalações elétricas	BUS WAY 3ph, com um barramento (outros barramentos em fase de aquisição) Quadros de controle individualizados e geral Dispositivos de manobra e controle Sistema de proteção e aterramento
Banco de baterias, veículo elétrico	Em fase de aquisição



Figura 5. Imagem panorâmica do Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes da UnB

Da Figura 5, verificam-se os sistemas, subsistemas e componentes relacionados com a implementação e operação da microrrede do laboratório. Estes elementos tornam-se importantes para a execução dos mais diversos estudos, especialmente quando se trata de um assunto não apenas amplo, mas extremamente dinâmico e de veloz desenvolvimento.

3.4 Arquitetura do Ambiente de Simulação

Após uma abrangente avaliação técnica e econômica, especificou-se um ambiente para simulação de tempo real, de forma a integrar o conjunto de equipamentos que constituem a microrrede do laboratório de redes elétricas inteligentes da Universidade de Brasília. Dito ambiente permite a simulação de diferentes cenários de operação das redes elétricas, do mesmo modo que possibilita a avaliação simultânea e individual de dispositivos. A Figura 6 apresenta de forma ilustrativa o ambiente de simulação de tempo real implementado no laboratório de redes elétricas inteligentes.

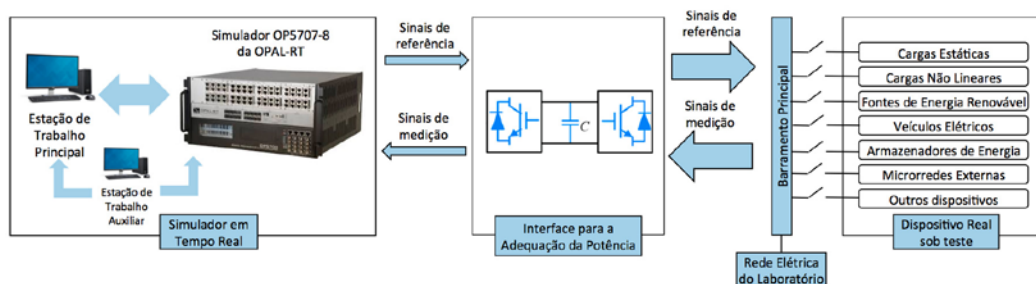


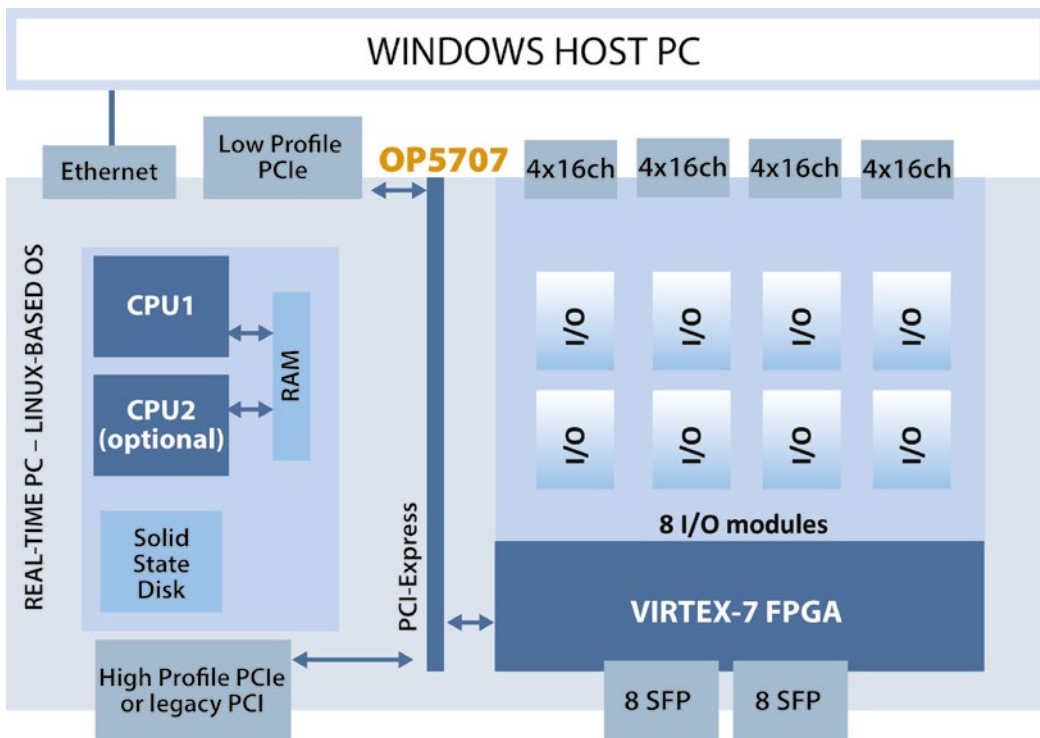
Figura 6. Esquema ilustrativo do ambiente de simulação de tempo real inserido na infraestrutura do laboratório de redes elétricas inteligentes da UnB

Da Figura 6, observa-se que a estrutura do ambiente de simulação de tempo real projetada proporciona meios para a execução de simulações SIL e HIL em quaisquer das suas categorias, sendo o principal objetivo do projeto a execução de simulações PHIL.

Os requisitos necessários para a implementação de simulações PHIL são definidos pelas características operacionais da interface de adequação da potência e pela natureza da plataforma de simulação, onde o método de amplificação de sinais e o tipo de conexão definem a função de transferência do sistema e, consequentemente, a estratégia de controle empregada. A seguir serão descritos os componentes principais do ambiente de simulação de tempo real do laboratório de redes elétricas inteligentes da Universidade de Brasília.

Plataforma de simulação em tempo real

A plataforma de simulação de tempo real corresponde ao modelo OP5707-8 pertencente à série OP5700 da OPAL-RT®. A arquitetura deste dispositivo combina as capacidades de um FPGA Xilinx® Virtex®-7 de última geração com oito núcleos de processamento Intel® Xeon® de alto desempenho para atender aos requisitos de cálculo em tempo real de simulações SIL e HIL. Um desenho ilustrativo da arquitetura do modelo OP5707-8 é exibido na Figura 7.



Fonte: <https://www.opal-rt.com/simulator-platform-op5707/>

Figura 7. Desenho ilustrativo da arquitetura computacional do simulador OP5707 da OPAL-RT.

Da Figura 7 é possível observar que o modelo OP5707-8 conta com *slots* de expansão integrados que acomodam até oito módulos de entrada-saída analógica e digital. Também suporta até 16 módulos de fibra óptica multimodo SFP (*small form-factor pluggable*) para comunicação e sincronização em alta velocidade (5 Gbps) com outros sistemas baseados em FPGA ou entre dispositivos externos e unidades de expansão.

Dentre as características operacionais mais importantes, observa-se que o dispositivo conta com oito núcleos de processamento, habilitados por meio de licenças. Adicionalmente, destaca-se que a resolução do relógio de 5 ns da FPGA Xilinx® Virtex®-7 suporta intervalos de tempo de simulação de até 145 ns. Da mesma forma, conta com os protocolos de comunicação ABB PS935, IEC 61850-8-1, IEC 61850-9-2, IEEE C37.118, DNP3, Modbus, OPC Unified Architecture, IEC 60870-104, Siemens S7, TCP/IP e o RS-485.

A descrição das principais características da interface entrada-saída da plataforma computacional adquirida para a construção do ambiente de simulação em tempo real é apresentada de forma resumida na Tabela 4.

Tabela 4. Resumo das principais características das interfaces de entrada-saída para interação com dispositivos externos

Tipo de cartão I/O	Quantidade	Descrição
Entradas analógicas	1	16 canais, 16 bits, 500 kS/s/canal para amostragem simultânea, ± 20 V, 400 kOhms de impedância de entrada
Saídas analógicas	2	16 canais, 16 bits, 1 MS/s/canal para amostragem simultânea, ± 16 V, 15 mA
Entradas digitais	1	32 canais, optoacoplados, 4.5 V a 50 V, 16 frequências PWM ou programáveis no tempo, 16 entradas estáticas
Saídas digitais	1	32 canais, <i>push-pull</i> , FET, 5 V a 30 V, 200 ns a 65 ns, 16 frequências PWM ou programáveis no tempo, 16 entradas estáticas

Fonte: <https://www.opal-rt.com/>

Para o gerenciamento de dispositivos externos durante a simulação em tempo real, foram adquiridas três interfaces gráficas de programação, a seguir: RT-LAB®, eMEGASIM® e ePHASORSIM®. O *software* RT-LAB® é a plataforma na qual os outros sistemas de simulação da OPAL-RT®, tais como o eMEGASIM® e o ePHASORSIM®, são baseados. Esta plataforma consiste em um ambiente de simulação que possibilita, por meio de bibliotecas otimizadas, explorar o potencial da arquitetura do modelo OP5707-8 durante a interação, em tempo real, entre os modelos computacionais e os dispositivos reais. As principais características das ferramentas computacionais adquiridas para a construção do ambiente de simulação de tempo real são apresentadas de forma resumida na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo das principais características das ferramentas computacionais ePHASORSIM® e eMEGASIM®

Características	ePHASORSIM®	eMEGASIM®
Aplicações relacionadas	Simulações de estabilidade transitória para sistemas elétricos de potência	Simulações da resposta transitória para sistemas de potência e eletrônica de potência
Tipos de simulação	No domínio fasorial	No domínio do tempo
Resolução de tempo típica	1-10 ms	Sistemas elétricos de potência: 10-100 μ s Sistemas de eletrônica de potência: 200 ns – 2 μ s
Compatibilidades de modelamento	Simulink®, Excel®, PSS/E, CYME, Power Factory, FMU (Open Modelica)	Simulink®, Simscape Power System
Maior tamanho de rede para simulações em tempo real	30.000 nós	900 nós
Maior tamanho de rede para simulações off-line	100.000 nós	5.000 nós

Fonte: adaptação da <https://www.opal-rt.com/system-emegasim/>

Os aspectos ora citados verificam que as aplicações da simulação de tempo real aos sistemas elétricos de potência estão em constante desenvolvimento e que surgem como uma ferramenta de análise, dada a complexidade das redes elétricas modernas.

Interface de adequação da potência

O princípio da simulação PHIL exige que os sinais elétricos do sistema físico (corrente e tensão) sejam replicados de forma idêntica pelo simulador em tempo real. O sistema físico é composto pelo amplificador, que recebe sinais de referência (tensão ou corrente), os quais foram calculados a partir da simulação em tempo real, operando como interface de amplificação de potência. Por meio desta interface, os sinais medidos no ponto de conexão do dispositivo externo são enviados de volta ao simulador como um sinal de resposta (corrente ou tensão medidas). A Figura 8 mostra a interface de amplificação de potência especificada para a simulação PHIL proposta neste projeto.

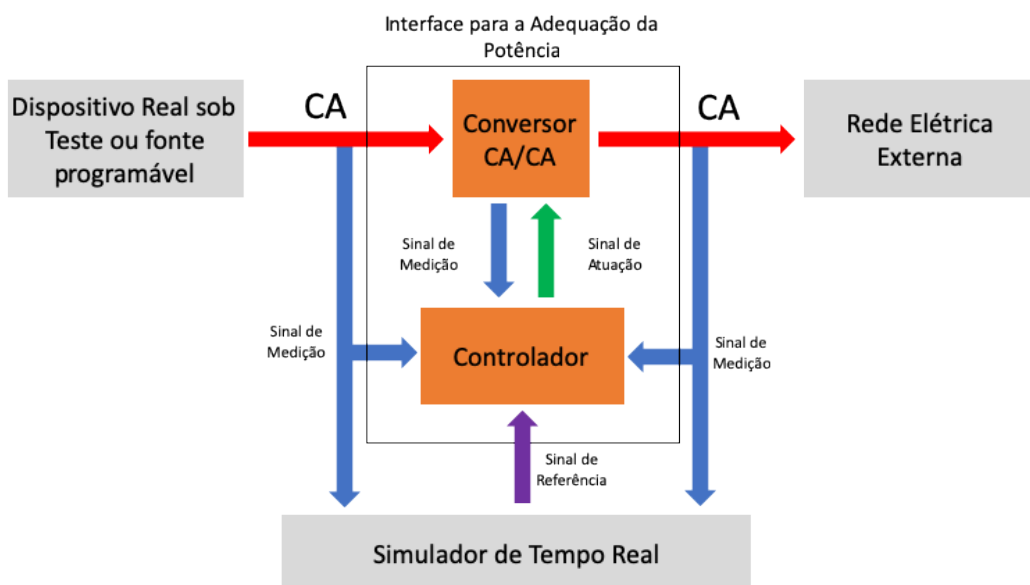


Figura 8. Arquitetura da interface de adequação da potência especificada para a simulação PHIL, onde são testados diferentes dispositivos conectados ao sistema

Para que a estrutura laboratorial permita a realização das simulações PHIL, foi utilizada a interface de amplificação, ilustrada na Figura 8. Ela é responsável por regular o escoamento da potência gerada pelo equipamento sob teste à rede elétrica trifásica real. No caso da substituição desse equipamento sob teste por uma carga convencional, a energia consumida por ela escoaria no sentido contrário.

A interação entre o dispositivo sob teste e a rede elétrica é dada por meio de uma interface de amplificação de potência, o qual “cria” uma rede elétrica trifásica (microrrede), com os mesmos parâmetros elétricos do barramento do laboratório, para uma certa inserção de energia fotovoltaica, a qual varia conforme a irradiação e a temperatura. O sistema fotovoltaico da estrutura laboratorial é composto por quatro módulos com potência de pico de 275 Wp cada (totalizando 1,1 kWp), sendo utilizado um microinversor trifásico APsystems YC 1000 (1000 W), o qual apresenta quatro algoritmos de MPPT (*Maximum Power Point Tracking* – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência).

A interface é constituída por um conversor de topologia *back-to-back*, modelo Semikron SKS 88F (B6CI)2P 61 V12, com as chaves semicondutoras IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e os *gate-drivers* (dispositivos necessários para o disparo dessas chaves) incorporados, ilustrado na Figura 9 (a). Ele é constituído por um estágio retificador, responsável por converter a energia disponível da rede elétrica trifásica real (corrente alternada, CA), a qual está presente no ponto de conexão B, para corrente contínua (CC), gerando-se uma tensão necessária para alimentar o barramento CC do conversor, como mostra a Figura 9 (b). A partir do barramento CC, tem-se um conversor CC-CA conectado, o qual é necessário para disponibilizar as tensões trifásicas ao ponto de conexão A, após a passagem por um filtro passivo eliminando as componentes de alta frequência devido ao chaveamento das chaves semicondutoras.

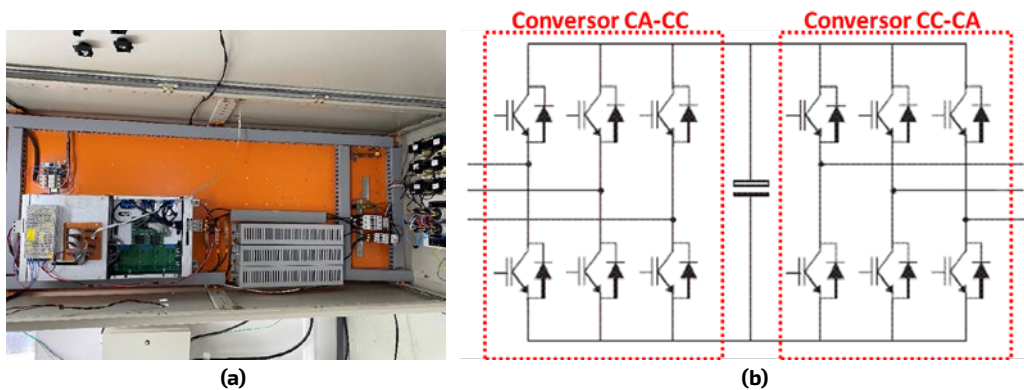
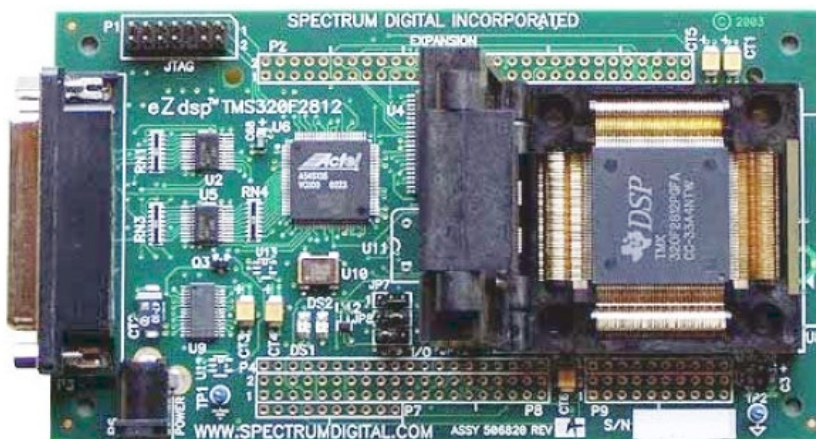


Figura 9. (a) Conversor *back-to-back* e (b) estrutura laboratorial da implementação do conversor

Essas tensões de saída do conversor CC-CA são controladas de modo a seguirem as referências impostas pelo simulador em tempo real (OPAL 5707), resultantes das leituras dos sinais de tensões e correntes no ponto de conexão A, no qual se efetua a interação entre o equipamento sob teste e a interface de amplificação.

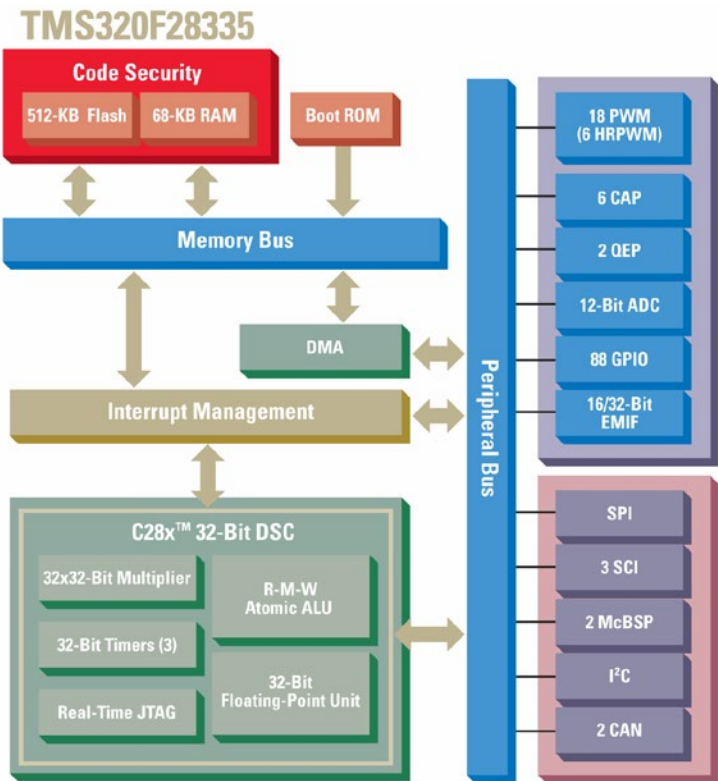
Desse modo, para que a simulação em tempo real seja executada, é necessário que os sinais de referência com os mesmos parâmetros da barra simulada pelo OPAL 5707 saiam do conversor DA (Digital-Analógico) do simulador em tempo real com os valores de tensões condicionados. Esses sinais, por sua vez, alimentam as entradas AD (Analógico-Digital) da placa de desenvolvimento eZDSP F28335 da Spectrum Digital®, baseada no DSC (*Digital Signal Controller*) da Texas Instruments®, modelo TMS320F28335, a qual está ilustrada na Figura 10.



Fonte: <https://www.element14.com/community/docs/DOC-68189/1/tms320f2812-ezdsp-starter-kit-dsk-socketed-version>

Figura 10. Placa de desenvolvimento eZDSP F28335

A Figura 10 mostra a placa de desenvolvimento utilizada neste trabalho. Trata-se de um processador de 32 bits, unidade lógica aritmética de ponto flutuante, *clock* da CPU de 150 MHz (150 milhões de instruções por segundo) e 512 KB de memória *flash*. Possui diversos dispositivos periféricos, com destaque para os 16 canais de entradas analógicas de 12 bits e as 16 saídas PWM convencionais, como mostra o diagrama de blocos apresentado na Figura 11.



Fonte: <https://www.bdti.com/InsideDSP/2007/08/22/Ti>

Figura 11. Diagrama de blocos do DSC TMS320F28335 da Texas Instruments®

Da Figura 11, nota-se que, por meio desse microcontrolador, são executadas todas as lógicas de controle do conversor *back-to-back* através do *firmware* implementado em linguagem C. Nesses conjuntos de instruções de controle, foi implementada a técnica de sincronismo do sistema de amplificação com os sinais de referência do OPAL 5707, utilizando o PLL trifásico (DSOGI-PLL, *Double SOGI - Phase Locked Loop*), de maneira que a tensão de saída do estágio inversor esteja em sincronismo com as formas de onda das tensões da barra selecionada na rede simulada [27],[28]. Além disso, outra técnica imprescindível para a operação do conversor *back-to-back* como um sistema de amplificação para a execução de simulações PHIL é a modulação das chaves semicondutoras IGBT denominada SVPWM (*Space Vector Pulse-Width Modulation*) [29]. Com isso, o conversor *back-to-back* irá operar com baixa distorção harmônica da tensão gerada, a ser disponibilizada ao equipamento sob teste, com os mesmos níveis de tensão RMS e respectivas defasagens angulares da barra simulada.

Além disso, esse dispositivo recebe as medições provenientes dos sensores de tensão e corrente instalados nos pontos de conexão A e B, os quais são necessários para que o circuito de controle da interface de amplificação opere em malha fechada, em função das referências da simulação em tempo real. Desse modo, para que o sistema efetue as medições de tensões e correntes, são utilizados sensores/transdutores e circuitos de condicionamento de suas respectivas amplitudes, possibilitando que os dispositivos de processamento de sinais, ou seja, tanto o controlador da interface de amplificação (DSC) quanto da plataforma de simulação em tempo real (OPAL 5707) possam manipular tais informações.

A Figura 12 apresenta as placas de instrumentação desenvolvidas e implementadas na primeira etapa de prototipagem, sendo que na etapa final do projeto serão otimizadas as placas no que diz respeito à precisão e ao tamanho dos componentes eletrônicos.

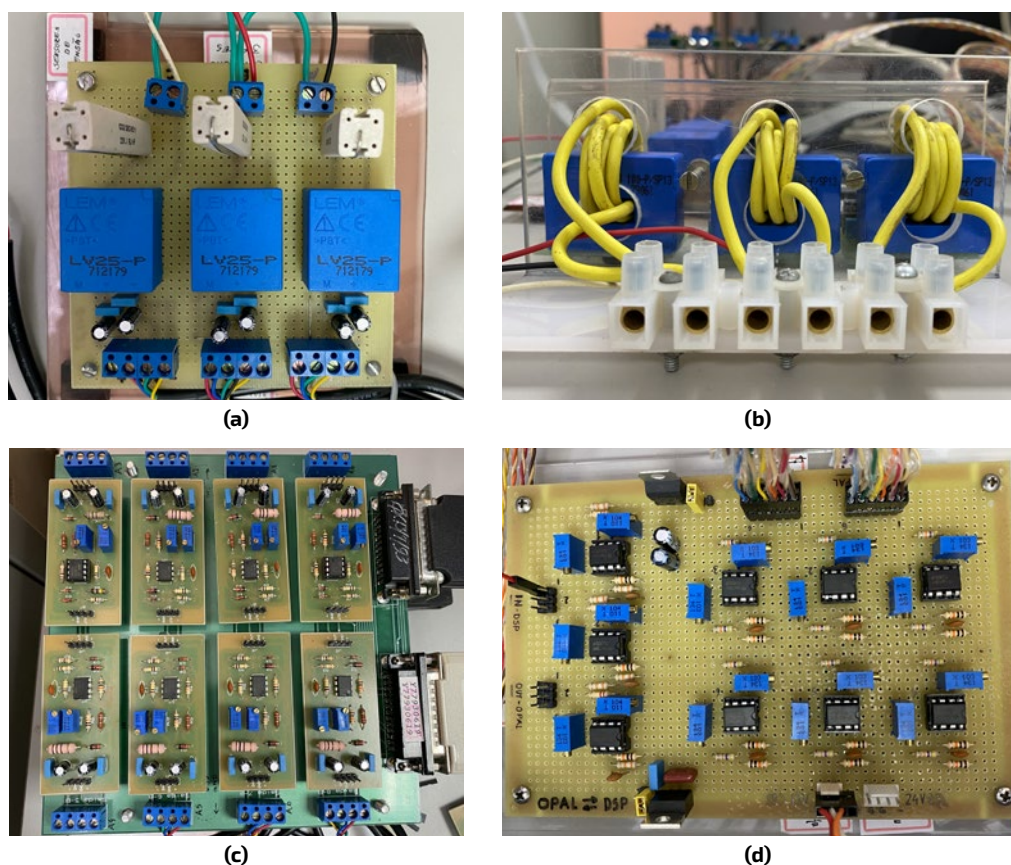


Figura 12. Placas de instrumentação de sinais. (a) Transdutores de tensão por efeito Hall; (b) Transdutores de corrente por efeito Hall; (c) Placas de condicionamento dos níveis de tensão resultantes dos transdutores de tensão e corrente a serem enviados ao DSC; e (d) Placa de condicionamento dos níveis de tensão entre OPAL e DSC

Para efetuar as medições de tensão, são utilizados os transdutores LEM LV20-P e LV25-P; e para medições de corrente, os transdutores LEM LTA50-P/SP1 e LA 100-P/SP13, conforme ilustram as Figuras 12 (a) e (b), respectivamente. Esses transdutores operam pelo efeito Hall, o que garante a isolamento galvânica. Além disso, como mostra a Figura 12 (c), foram desenvolvidos condicionadores de sinais para converter as correntes geradas pelos transdutores em tensões com níveis adequados para as entradas AD (Analogico-Digital) dos dispositivos de processamento digital, ou seja, tanto do DSC (que controla a interface de amplificação) quanto do OPAL 5707 (que controla a simulação em tempo real). As placas apresentadas nas Figuras 12 (c) e (d) têm a função de efetuar o condicionamento dos sinais entre o OPAL e o DSC e de condicionar os níveis dos sinais recebidos pelos transdutores, respectivamente.

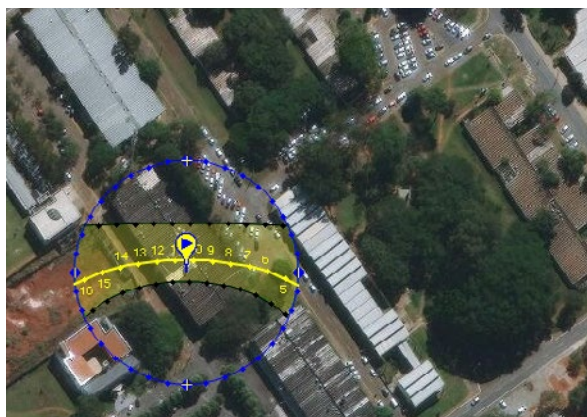
Sistema e cenário para testes

A simulação PHIL é executada para o alimentador da CEB-D que fornece energia para o Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília que, por sua vez, possui uma área total de 3.950.579 m² e 552.171 m² de área construída. A rede do campus apresenta níveis de tensão que estão dentro das margens nacionais. O lado de média tensão do alimentador possui tensão de 13.8 kV; e o lado de baixa tensão, conectado ao secundário dos transformadores, tensão de 380 V. Em [30]. O autor apresenta detalhadamente como se dá o processo de modelagem do circuito do alimentador do Campus Universitário Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília no formato do software *OpenDSS*. A rede elétrica modelada é apresentada de forma ilustrativa na Figura 13.



Figura 13. Foto panorâmica que ilustra o circuito alimentador do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília

Os parâmetros do ponto de conexão onde será inserido o dispositivo sob teste (valores de tensão, corrente e curva de carga) são os correspondentes ao barramento do laboratório de redes elétricas inteligentes localizado no prédio SG11 da Faculdade de Tecnologia (FT), tal e como se apresenta na Figura 14.



Fonte: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=pt

Figura 14. Localização do sistema fotovoltaico – cobertura do bloco SG-11

Na Figura 14, observa-se o local de instalação do sistema fotovoltaico, o qual se situa na cobertura do bloco SG-11. Essa cobertura apresenta desvio azimutal de -35° em relação ao Norte e acesso solar sem sombras ao longo de todo o ano. O dispositivo sob teste para a implementação laboratorial é composto por uma fonte de geração fotovoltaica, o qual será utilizado para efetuar avaliação dos impactos da inserção deste tipo de geração na rede elétrica da Universidade de Brasília.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alinhado à experiência dos laboratórios mais modernos do mundo, é possível constatar que a rápida evolução das plataformas de simulação de tempo real tem permitido elevar o nível das pesquisas acadêmicas e industriais em razão da sua capacidade de recriar cenários reais com maior precisão. Com isso, identifica-se um amplo conjunto de oportunidades para o desenvolvimento de pesquisas em torno de aplicações de simulações de tempo real do tipo SIL e HIL, que objetivam avaliar as particularidades e exigências específicas derivadas da operação dos sistemas de distribuição, quando da integração da Geração Distribuída Fotovoltaica, bem como de outras tecnologias.

5. REFERÊNCIAS

- [1] GUILLAUD, X.; FARUQUE, M. O.; TENINGE, A.; HARIRI, A. H.; VANFRETTI, L.; PAOLONE, M.; DINAVAH, V.; MITRA, P.; LAUSS, G.; DUFOUR, C.; FORSYTH, P.; SRIVASTAVA, A. K.; STRUNZ, K.; STRASSER, T.; DAVOUDI, A. *Applications of real-time simulation technologies in power and energy systems*. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, v. 2, n.º 3, pp. 103–115, Sep., 2015.
- [2] BELANGER, VENNE e PAQUIN 2010 BELANGER, J.; VENNE, P.; PAQUIN, J.-N. *The what, where and why of real-time simulation*. *Planet Rt*, v. 1, n.º 1, pp. 25–29, 2010.
- [3] KOTSAMPOPOULOS, P.; LEHFUSS, F.; LAUSS, G. F.; BLETTERIE, B.; HATZIARGYRIOU, N. *The limitations of digital simulation and the advantages of phil testing in studying distributed generation provision of ancillary services*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 1–1, 08 2015.
- [4] DYCK, M.; NZIMAKO, O. *Real-time simulation of large distribution networks with distributed energy resources*. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, v. 2017, n.º 1, pp. 1402–1405, 2017. ISSN 2515-0855.
- [5] HERNANDEZ, M. E.; RAMOS, G. A.; LWIN, M.; SIRATARNOPHON, P.; SANTOSO, S. *Embedded real-time simulation platform for power distribution systems*. *IEEE Access*, v. 6, pp. 6243–6256, 2018. ISSN 2169-3536.
- [6] KOTSAMPOPOULOS, P.; LAGOS, D.; HATZIARGYRIOU, N.; FARUQUE, M. O.; LAUSS, G.; NZIMAKO, O.; FORSYTH, P.; STEURER, M.; PONCI, F.; MONTI, A.; DINAVAH, V.; STRUNZ, K. *A benchmark system for hardware-in-the-loop testing of distributed energy resources*. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, v. 5, n.º 3, pp. 94–103, Sep., 2018. ISSN 2332-7707.
- [7] VENTURI, C.; LIMA, N.; BARROSO, D.; MACHADO, P. A.; OLIVEIRA, J. G. *Hardware in the loop simulation of dg integration to the distribution grid using rtds and dspace*. In: *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. pp. 1–6.
- [8] REZKALLAH, M.; HAMADI, A.; CHANDRA, A.; SINGH, B. *Real-time hil implementation of sliding mode control for standalone system based on pv array without using dumpload*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 6, n.º 4, pp. 1389–1398, Oct., 2015. ISSN 1949-3029.
- [9] BOUNECHBA, H.; BOUZID, A.; SNANI, H.; LASHAB, A. *Real time simulation of mppt algorithms for pv energy system*. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 83, pp. 67–78, 12, 2016.
- [10] MUSSE, B. F.; SILVA, N. L.; SILVA, D. C.; DE OLIVEIRA, L. W.; DE OLIVEIRA, J. G. *Controller-hardware-in-the-loop simulation of a distribution system with pv penetration using rtds and dspace*. In: *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*. [S.l.: s.n.], 2017. pp. 1–6.

- [11] ARCHETTI, J. A. G.; MUSSE, B.; FERNANDES, M. de C.; SILVA, D. C.; OLIVEIRA, L.; DE OLIVEIRA, J. G. *Simulation and analysis of a distribution system with pv penetration using rtds*. In: [S.l.: s.n.], 2018, pp. 1–6.
- [12] KIM, Y.J.; WANG, J. *Power Hardware-in-the-Loop Simulation Study on Frequency Regulation Through Direct Load Control of Thermal and Electrical Energy Storage Resources*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n.º 4, Jul., 2018.
- [13] IMAN-EINI, H.; TENNAKON, S. B. *Investigation of a cascaded h-bridge photovoltaic inverter under non-uniform insolation conditions by hardware-in-the-loop test*. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 105, pp. 330–340, 2019. ISSN 0142-0615.
- [14] CELEITA, D.; HERNANDEZ, M.; RAMOS, G.; PEÑAFIEL, N.; RANGEL, M.; BERNAL, J. D. *Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids*. *Electric Power Systems Research*, v. 130, p. 156, 01, 2016.
- [15] BLAAUWBROEK, N.; NGUYEN, P.; SLOOTWEG, H.; NORDSTRÖM, L. *Interfacing solutions for power hardware-in-the-loop simulations of distribution feeders for testing monitoring and control applications*. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 11, n.º 12, pp. 3080–3087, 2017. ISSN 1751-8687.
- [16] NAGARAJAN, A.; NELSON, A.; PRABAKAR, K.; HOKE, A.; ASANO, M.; UEDA, R.; NEPAL, S. *Network reduction algorithm for developing distribution feeders for real-time simulators*. In: *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2017. pp. 1–5. ISSN 1944-9933.
- [17] KOTSAMPOPOULOS, P. C.; KLEFTAKIS, V. A.; HATZIARGYRIOU, N. D. *Laboratory education of modern power systems using phil simulation*. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 32, n.º 5, pp. 3992–4001, Sep., 2017. ISSN 0885-8950.
- [18] BIAN, D.; KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S.; WU, Y. *Real-time co-simulation platform using opal-rt and opnet for analyzing smart grid performance*. In: *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2015, pp. 1–5.
- [19] LUNDSTROM, B.; CHAKRABORTY, S.; LAUSS, G.; BRÜNDLINGER, R.; CONKLIN, R. *Evaluation of system-integrated smart grid devices using software- and hardware-in-the-loop*. In: *2016 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. [S.l.: s.n.], 2016, pp. 1–5.
- [20] KRATA, J. *A real-time co-simulation platform for distribution grid voltage control*. In: *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. [S.l.: s.n.], 2017, pp. 1–6. ISSN 2474-1507.
- [21] FARUQUE, M. O.; SLODERBECK, M.; STEURER, M.; DINAVAH, V. *Thermo-electric co-simulation on geographically distributed real-time simulators*. In: *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2009, pp. 1–7.
- [22] LAUSS, G. F.; FARUQUE, M. O.; SCHODER, K.; DUFOUR, C.; VIEHWEIDER, A.; LANGSTON, J. *Characteristics and design of power hardware-in-the-loop simulations for electrical power systems*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 63, n.º 1, pp. 406–417, Jan., 2016. ISSN 0278-0046.
- [23] RENO, M. J.; COOGAN, K.; BRODERICK, R.; GRIJALVA, S. *Reduction of distribution feeders for simplified PV impact studies*, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 2337–2342, 2013.
- [24] PECENAK, Z. K.; DISFANI, V. R.; RENO, M. J.; KLEISSL, J. *Multiphase Distribution Feeder Reduction*, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 33, n.º 2, pp. 1320–1328, 2018.
- [25] CHAMANA, M.; PRABAKAR, K.; PALMINTIER, B.; BAGGU, M. M. *Conversion and validation of distribution system model from a qsts-based tool to a real-time dynamic phasor simulator*. In: *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. [S.l.: s.n.], 2017, pp. 219–225.
- [26] CORREIA, P. F. F. *A participação da universidade na pesquisa e no ensino profissional acadêmico no desenvolvimento do Smart Grid*. In: Universidade de Brasília, Brasília, DF. [S.l.: s.n.], 2014, pp. 1–183.
- [27] RODRÍGUEZ, P.; TEODORESCU, R.; CANDELA, I.; TIMBUS, A. V.; LISERRE, M.; BLAABJERG, F. *New positive sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions*, *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1-7, 2006.
- [28] TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [29] HAVA, A. M.; KERKMAN, R. J.; LIPO, T. A. *Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI Drives*. In: *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 14, n.º 1, pp. 49-61, Jan., 1999.
- [30] GREGÓRIO, J. V. *Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para a avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos*. In: Universidade de Brasília, Brasília, DF. [S.l.: s.n.], 2017, pp. 1–173.

CAPÍTULO 10

Métodos de Redução de Circuitos para Simulação de Redes de Distribuição

Jorge Andrés Cormane Angarita

Anésio de Leles Ferreira Filho

Victor do Prado Brasil

Pedro Augusto Montel de Carvalho

Marcos Diego de Castro e Silva



OBJETIVO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos relacionados aos métodos de redução de circuitos aplicáveis à avaliação de impactos da integração de sistemas fotovoltaicos em redes de distribuição. Para tanto, inicialmente, são expostos alguns aspectos introdutórios relacionados aos cenários de aplicação dos métodos. Em seguida, têm-se o estado da arte de métodos de redução de sistemas elétricos de potência e a exibição detalhada dos métodos selecionadas para reprodução neste projeto.

1. INTRODUÇÃO

Frente à necessidade da modernização do sistema elétrico, os conceitos tradicionais de planejamento, operação, manutenção e controle de redes elétricas devem ser revistos. Para tal fim, as empresas do setor precisam de ferramentas computacionais adequadas que permitam acompanhar e avaliar os efeitos da renovação da infraestrutura. Diante deste cenário, os ambientes para a simulação em tempo real surgem como um meio de grande potencial para conseguir tais objetivos e tornaram-se uma tendência mundial em diversos setores da indústria.

Do ponto de vista das simulações, observa-se que existem restrições no que diz respeito à quantidade de nós a serem calculados. Em vista desta condicionante, torna-se necessária a simplificação dos sistemas com o propósito de atingir a quantidade de nós que viabilize a execução da simulação sem comprometer a precisão do resultado. Por fim, destaca-se que diversos métodos de redução de circuitos constam na literatura, cada uma com suas características e especificidades.

2. ESTADO DA ARTE

Estudos do sistema elétrico de potência são continuamente demandados pelas operadoras dos sistemas de energia elétrica. Ditos estudos exigem soluções de sistemas matriciais de dimensões elevadas, o que em alguns dos casos os tornam inviáveis devido ao alto custo computacional envolvido. A busca de soluções para esse impasse tecnológico tem culminado na utilização de formas alternativas de análise, como a implementação de modelos reduzidos equivalentes.

Nesta seção, será apresentado um resumo do levantamento dos trabalhos relacionados aos métodos de redução de circuitos disponíveis na literatura atinente. O levantamento foi organizado de forma a apresentar, inicialmente, as contribuições relacionadas aos estudos em regime permanente e estado transitório para sistemas de transmissão e distribuição respectivamente.

2.1 Aplicações de Simulação de Métodos de Redução de Circuitos Vinculadas aos Sistemas de Transmissão

Em geral, os métodos de redução de circuitos quando aplicados a estudos de regime permanente objetiva a análise do estado do sistema elétrico por meio da avaliação dos fluxos de potência ativa e reativa e dos valores de tensão em cada barra, para diferentes condições de carga e de geração. Também buscam-se preservar as características elétricas da rede original, tais como os perfis de tensões e perdas elétricas.

O primeiro trabalho publicado na literatura sobre este tema data de 1949 [1]. O método proposto é dependente do ponto de operação, acarretando a necessidade de se repetir o processo de redução a cada mudança das condições de carga e geração. Adicionalmente, considera a redistribuição fracionada das injeções de potência ativa e reativa dos geradores eliminados entre as barras remanescentes, tornando inviável a identificação da contribuição desses elementos, uma vez que um mesmo barramento recebe frações de diversos geradores distintos [2].

Métodos similares para a redução de circuitos que independem do ponto de operação e que são capazes de preservar as propriedades topológicas do sistema original são apresentados em [3] e [4]. Em ambos os casos, é empregada uma abordagem fundamentada no cálculo do fluxo de potência DC e o agrupamento das barras em zonas. Os métodos utilizam o conjunto de valores das reatâncias das linhas equivalentes que interligam as zonas, aqueles que resultam no erro mínimo entre os fluxos dos sistemas reduzido e original. Destaca-se que o sistema é simplificado por meio da redução da matriz de Fator de Distribuição da Potência Transferida.

Em [5], apresentou-se um método para o cálculo de equivalentes dinâmicos utilizados na simulação de faltas trifásicas em sistemas de transmissão. O método aborda a identificação de geradores coerentes e sua associação em um único barramento, seguido da redução topológica da região do circuito por meio da aplicação do método de eliminação Gaussiana na matriz de admitâncias.

2.2 Aplicações de Simulação de Métodos de Redução de Circuitos Vinculadas aos Sistemas de Distribuição

Métodos de redução de circuito destinados a sistemas de transmissão podem não ser aplicáveis às redes de distribuição. Em função disso, nos últimos anos, é possível identificar um significativo aumento do número de trabalhos que versam sobre métodos direcionados para alimentadores de distribuição. Isso se deve ao contínuo aumento do número de unidades consumidoras interligadas nos grandes centros de consumo, à integração de Geração Distribuída aos alimentadores e, ainda, a uma busca de acessibilidade e praticidade em termos de simulação computacional. A seguir, é apresentado o resultado deste levantamento.

De forma a reduzir o esforço computacional para a alocação ótima de bancos de capacitores ou geradores distribuídos, bem como para reconfiguração de redes, em [6] é proposto um método que consiste em calcular um circuito equivalente em que há, para cada carga do alimentador, apenas uma admitância interligando tal barramento ao ramo principal. Dito método é uma adaptação do método apresentado em [7] e [8].

O crescente uso de sistemas fotovoltaicos no sistema elétrico tem intensificado a necessidade de se avaliarem os possíveis impactos e melhorias oriundos da integração de tais geradores na rede. Como resultado, diversos métodos de redução foram propostos buscando incluir e representar os efeitos da Geração Distribuída Fotovoltaica nos alimentadores. Nesse sentido, os autores em [9] empregaram um método de redução envolvendo um algoritmo que identifica i) os ramos principal e laterais do alimentador e, ainda, ii) as interconexões entre eles. As linhas de interconexões de barramentos pertencentes ao ramo principal são reduzidas, sequencialmente, do início do alimentador até o seu terminal. Em seguida, repete-se o mesmo procedimento nos ramos laterais, iniciando-se das respectivas junções intermediárias do alimentador. Ao final deste procedimento, apenas os barramentos de interesse são mantidos. Em [10], é desenvolvido um método que está fundamentado na distribuição da carga de um barramento intermediário em seus barramentos adjacentes de forma ponderada, o que preserva a impedância resultante entre esses barramentos remanescentes e permaneça igual. Em [11], é apresentado um método de redução que se baseia na aplicação de uma ferramenta voltada à análise e manipulação de grafos. Desse modo, os autores vincularam vértices e arestas de um grafo a barramentos e linhas de uma rede de distribuição radial. O algoritmo percorre todas as laterais da rede de distribuição iniciando a partir de um nó de início selecionado de forma arbitrária. Os nós que contêm cargas com geração fotovoltaica são retidos no modelo final reduzido. Em [12], o circuito é reduzido para um equivalente de dois barramentos, de modo a representar a potência vista pela rede de transmissão, mesmo quando da ocorrência de mudanças aleatórias nas cargas do sistema de distribuição. Em [13], é desenvolvido um método que considera os barramentos de interesse e os barramentos que podem alterar a topologia como barramentos críticos a serem preservados. Neste método, a eliminação de um barramento considerado não crítico ocorre por meio da redistribuição de sua carga entre os barramentos adjacentes à barra em questão. As parcelas da carga realocadas são ponderadas com base nos valores das impedâncias das linhas conectadas a esse barramento.

Em [14], é proposto um método de redução capaz de preservar o comportamento dinâmico (transitório) de sistemas de distribuição por meio de truncamentos equilibrados. O método consiste em agrupar os geradores coerentes em barramentos equivalentes. Métodos como *Weak Links*, *Two Time Scale* e *Linear Time Simulation*, foram empregados com a finalidade de agrupar geradores, enquanto que as metodologias *Classical Aggregation* ou *Detailed Aggregation* foram usadas para agregar os geradores de cada grupo em um único gerador equivalente. Na consolidação do processo de redução, foram aplicados dois métodos, a saber, a *Singular Value Decomposition* e o *Moment Machine Method*. Segundo os autores, a escolha do método mais apropriada para cada aplicação deve ser efetuada com base nos objetivos da análise e na estrutura do sistema em avaliação. A avaliação comparativa entre os resultados das simulações envolvendo os sistemas original e reduzido mostraram que existe um limite para a redução dos circuitos, que garante a proximidade entre as respostas dinâmicas oriundas dos circuitos original e reduzido.

Este levantamento apresentou um resumo dos trabalhos que descrevem o desenvolvimento dos métodos de redução de circuitos, assim como as aplicações e particularidades de cada uma delas. De acordo com os estudos ora mencionados, é possível verificar que, além da equivalência entre os resultados obtidos dos circuitos reduzido e original, é desejável que possíveis variações na carga e na geração sejam refletidas no modelo do circuito reduzido sem a necessidade de se repetir o processo de redução. Cabe destacar que, a depender do objetivo do estudo, buscam-se como resultados os fluxos de potência ativa e reativa, as tensões nos barramentos ou, ainda, as respostas dinâmicas dos geradores.

3. MÉTODO DE REDUÇÃO DE CIRCUITOS PARA SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL

Uma das etapas da avaliação dos impactos da integração de tecnologias na rede, por meio de ambientes de simulação em tempo real, corresponde à aplicação de métodos de redução de circuitos nos alimentadores a serem avaliados, visto que os *softwares* para modelagem e simulação em tempo real possuem restrições relacionadas à quantidade de nós calculados durante o intervalo de tempo de referência definido como de tempo real. Em função disso e com base no levantamento dos trabalhos existentes na literatura, dois métodos foram selecionados para desenvolvimento e aplicação neste projeto, conforme discutido a seguir.

No método de redução proposto em [10], as barras são classificadas em barras críticas (BC) e barras não críticas (BNC). As BNCs são aquelas que serão eliminadas e, por sua vez, podem ser divididas em finais (BNCF) ou intermediárias (BNCI). De forma similar, são definidas as BCs segundo os critérios a seguir: i) são selecionados pelo usuário, ii) contêm equipamentos especiais (tais como transformadores, reguladores de tensão, geradores, capacitores etc), ou iii) são necessárias para manutenção da topologia, como, por exemplo, as barras de junção. Assim sendo, o método pode ser dividido em três etapas principais, uma que trata da definição das barras críticas e outras duas que abordam a eliminação das barras finais e intermediárias. Para tanto, os autores assumiram que as cargas podem ser modeladas usando o modelo de corrente constante. Assim, ao eliminar uma BNCF, sua carga é transferida à barra anterior. Esse processo se repete até que não restem outras BNCFs. Por outro lado, ao eliminar uma BNCI, sua carga é distribuída entre as adjacentes seguindo a formulação de um divisor de corrente. Nesse sentido, o circuito equivalente é o resultado da adição das linhas antes conectadas à BNCI. Este procedimento garante que os valores das tensões resultantes do cálculo do fluxo de potência no sistema reduzido sejam muito próximos aos obtidos quando do cálculo do fluxo de potência no sistema original. Todavia, esse método é aplicável apenas para sistemas equilibrados e para os valores de carga utilizados no processo de redução. Caso haja mudanças nos valores das cargas (como, por exemplo, em uma simulação *time-series*), a redução precisa ser repetida para cada condição simulada.

Em [13], estendeu-se o método proposto em [10] para sistemas desequilibrados e se possibilitou a simulação de vários cenários de carga e de geração sem a necessidade de se repetir a redução. Para tanto, todas as equações algébricas baseadas no equivalente monofásico foram substituídas por equações matriciais, contemplando todas as fases do sistema. Adicionalmente, os autores propuseram o uso de uma matriz de pesos, denominada de W , que relaciona os valores de carga do sistema original com aqueles resultantes da redução. Uma outra matriz de pesos, similar à W , pode ser construída para avaliação da geração fotovoltaica. Dessa forma, o processo de redução não precisa ser repetido caso haja mudanças nas cargas ou na geração.

3.1 Método de Redução Simplificado

Em [10], foi proposto um método de redução de sistemas, baseada nas ideias discutidas em [15], onde se considera que as cargas de um sistema de distribuição podem ser modeladas usando o modelo de corrente constante. Para tanto, o sistema é considerado equilibrado e o seu equivalente monofásico é utilizado no processo de redução. A Figura 1 ilustra um sistema radial de três barras conectadas a uma subestação que será utilizado para a explanação do método proposto.

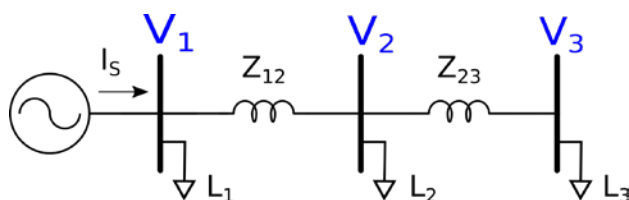


Figura 1. Sistema radial de três barras usado para a descrição dos métodos de redução de circuitos selecionado para simulação em tempo real

Da Figura 1, observa-se que as tensões e as cargas associadas a cada uma das barras estão identificadas como V_1 , V_2 , V_3 , L_1 , L_2 e L_3 respectivamente. Destaca-se que o circuito atende às leis de tensão e corrente de Kirchhoff.

Dado que as cargas são modeladas como corrente constante, a corrente equivalente será proporcional à potência nominal da carga reduzida. Para tanto, deseja-se que o sistema reduzido preserve o valor das tensões das barras remanescentes e da corrente que flui da subestação. Dessa forma, a soma das correntes de carga deve obedecer à equação (1).

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{eq1} + I_{eq2} \quad (1)$$

3.1.1 Eliminação de uma Barra Não Crítica Final (BNCF)

Baseados na topologia do circuito mostrado na Figura 1, considera-se a premissa de que apenas as barras 1 e 2 sejam críticas, portanto a barra 3 será uma barra não crítica final. Nesse sentido, observam-se que as tensões das barras 1 e 2 podem ser expressas em função da tensão na barra 3, conforme as equações (2) e (3).

$$V_1 = V_3 + (I_2 + I_3)Z_{12} + I_3Z_{23} \quad (2)$$

$$V_2 = V_3 + I_3Z_{23} \quad (3)$$

Subtraindo-se (2) de (3), obtém-se a relação entre V_1 e V_2 , conforme a equação (4), em que a soma das correntes $I_2 + I_3$ pode ser interpretada como a corrente demandada por uma carga equivalente conectada à barra 2.

$$V_1 = V_2 + \underbrace{(I_2 + I_3)}_{I_{2eq}} Z_{12} \quad (4)$$

O circuito equivalente obtido neste caso é mostrado na Figura 2.

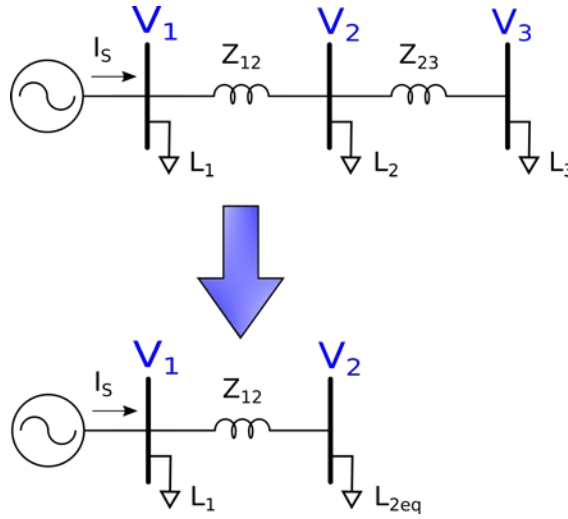


Figura 2. O circuito original e seu equivalente após a eliminação de uma barra não crítica final

O circuito mostrado na Figura 2 é formado pelas barras 1 e 2, as quais estão conectadas pela linha cuja impedância é dada por Z_{12} . A potência complexa L_2 é atualizada para L_{2eq} como mostra a equação (5), pois, uma vez que as cargas são modeladas como corrente constante, a relação entre as potências das cargas originais e das equivalentes é igual à relação entre as correntes.

$$L_{2eq} = L_2 + L_3 \quad (5)$$

3.1.2 Eliminação de uma Barra Não Crítica Intermediária (BNCI)

Retomando o exemplo da Figura 1, porém considerando apenas a barra 2 como não crítica, desenvolve-se o procedimento de eliminação de barras não críticas intermediárias. Para tanto, as tensões V_1 e V_3 são reescritas em função de V_2 , conforme as equações (6) e (7), respectivamente.

$$V_1 = V_2 + (I_2 + I_3)Z_{12} \quad (6)$$

$$V_3 = V_2 - I_3Z_{23} \quad (7)$$

Subtraindo-se (7) de (6), obtém-se a equação (8), a qual apresenta a relação entre as tensões V_1 e V_3 em função da corrente equivalente I_{3eq} e da linha equivalente cuja impedância é dada por Z_{13eq} , as quais são dadas pelas equações (9) e (10).

$$V_1 = V_3 + Z_{13eq}I_{3eq} \quad (8)$$

$$Z_{13eq} = Z_{12} + Z_{23} \quad (9)$$

$$I_{3eq} = I_3 + Z_{13eq}^{-1}Z_{12}I_2 \quad (10)$$

O circuito equivalente obtido neste caso é mostrado na Figura 3.

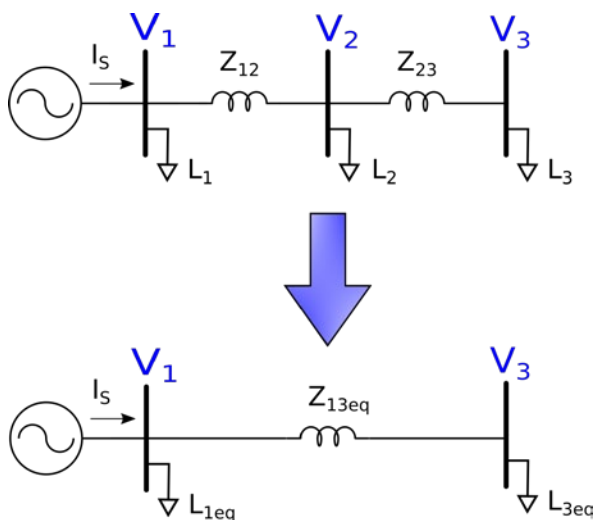


Figura 3. O circuito original e seu equivalente após a eliminação de uma barra não crítica intermediária

Dado que a corrente da subestação I_s é preservada na redução, a equação (11) deve ser válida. Aplicando-a em (10), obtém-se a corrente I_{1eq} conforme a equação (12).

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{1eq} + I_{3eq} \quad (11)$$

$$I_{1eq} = I_3 + Z_{13eq}^{-1} Z_{23} I_2 \quad (12)$$

O emprego do modelo de corrente constante para representar as cargas garante que a potência das cargas equivalentes preserve a relação apresentada para as correntes nas equações (10) e (12). Por fim, as expressões para as potências complexas (L) são mostradas em (13) e (14).

$$L_{3eq} = L_3 + Z_{13eq}^{-1} Z_{12} L_2 \quad (13)$$

$$L_{1eq} = L_3 + Z_{13eq}^{-1} Z_{23} L_2 \quad (14)$$

3.2 Método de Redução Polifásico

Proposto em [13], o método de redução polifásico estendeu o método descrito em [10] para sistemas polifásicos desequilibrados. Este método mantém a premissa de representar as cargas por meio de modelos de corrente constante. De forma similar ao apresentado na seção anterior, o método pode ser dividido em três etapas principais: i) identificação da topologia do sistema, ii) eliminação fora do ramo principal (equivalente à eliminação das barras finais); e iii) eliminação dentro do ramo principal (equivalente à eliminação das barras intermediárias).

3.2.1 Identificação da topologia

Na primeira etapa, a rede é comparada a uma árvore genealógica para facilitar sua identificação. As barras adjacentes à barra “i” formam o conjunto vizinhança N_i . Dentre as barras de N_i , aquela mais próxima à subestação é denominada de barra pai P_i . As demais são consideradas as filhas de i e formam o conjunto C_i . Caso C_i seja um conjunto vazio, então i é uma barra final ou barra terminal. Mais dois conjuntos ainda devem ser definidos, o conjunto descendência (D_i) e o ancestral (A_i). O conjunto D_i é composto pelas uniões das barras filhas de i, das filhas de suas filhas, e assim sucessivamente. Em outras palavras, as barras posteriores à barra i formam o conjunto D_i . De forma oposta ao conjunto D_i , é formado o conjunto A_i . Este por sua vez é formado pela união dos pais de i, dos pais dos seus pais, e assim sucessivamente. Desse modo, as barras entre a subestação e a barra i formam o conjunto A_i .

O ramo principal do alimentador é definido pelo conjunto de barras pertencentes aos possíveis caminhos entre a subestação e as barras críticas finais (BCF). Para facilitar o entendimento e assimilação das definições decorrentes do método exibido, a seguir é apresentado um exemplo ilustrativo com base no sistema mostrado na Figura 4.

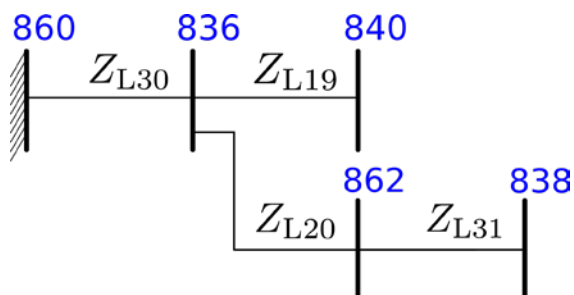


Figura 4. Exemplo ilustrativo da aplicação dos conceitos de identificação topológica

O conjunto vizinhança da barra 836 é igual a $N_{836} = \{860, 840, 862, 838\}$. A barra pai, os conjuntos dos filhos, dos ancestrais e dos descendentes são dados por $P_{836} = 860$, $C_{836} = \{840, 862\}$, $A_{836} = \{860\}$ e $D_{836} = \{840, 862, 838\}$, respectivamente, observando o sistema no sentido subestação em direção a alguma barra terminal.

O ramo principal neste caso será formado pelas barras 860, 836, 840 e 862. A barra 838 não pertencerá ao ramo principal e será classificada como uma barra não crítica final (BNCF). Por fim, considere que as barras 840 e 862 sejam selecionadas como barras críticas (BC). Dessa forma, a barra 836 é necessária para manter a topologia do sistema, sendo, portanto, uma barra crítica.

3.2.2 Eliminação fora do ramo principal

Na segunda parte do método, as barras fora do ramo principal são eliminadas. Isto pode ser feito seguindo-se uma ordem arbitrária. Contudo, em geral, adota-se o procedimento padrão de iniciar a eliminação pelas barras finais. Como resultado desta etapa, não é necessário realizar nenhuma eliminação de barra intermediária nesta etapa.

Considerando novamente o sistema da Figura 4, observa-se que, caso apenas a barra 840 seja selecionada como BC, então o ramo principal será constituído pelas barras 860, 836 e 840. As barras 838 e 862 não fazem parte do ramo principal e terão de ser eliminadas. Caso a barra 862 seja reduzida primeiro que a barra 838, será necessário executar o procedimento de eliminação de uma BNCF. No caso em que se inicie o processo de eliminação pela barra 838, será executada uma eliminação de uma BNCF. O processo de eliminação de BNCF será o mesmo procedimento apresentado na seção 4.1.1, aplicado para cada nó das barras envolvidas. Em seguida, a barra 862 se tornará uma BNCF e poderá ser eliminada seguindo o mesmo procedimento empregado para a 838. O procedimento de eliminação de BNCF é ilustrado na Figura 5.

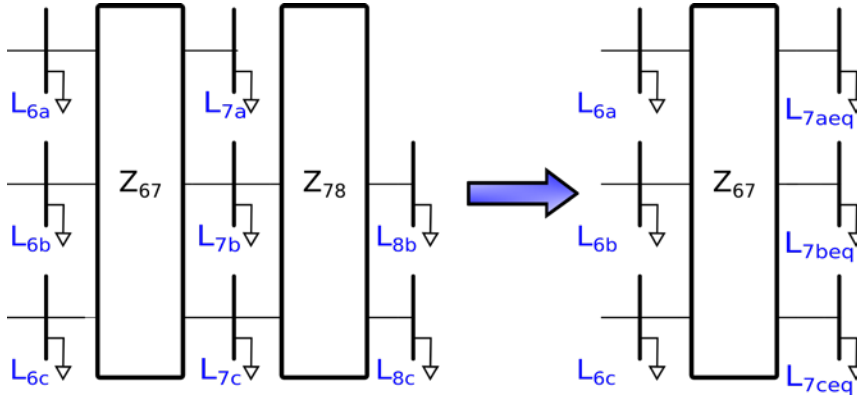


Figura 5. Exemplo ilustrativo da eliminação de uma barra não crítica final para um sistema trifásico

Da Figura 5, observa-se que, ao eliminar a barra 8, a linha entre as barras 6 e 7 permanecerá inalterada. Por outro lado, as cargas equivalentes da barra 7 serão iguais às antigas somadas com as da barra 8, conforme mostram as equações (15), (16) e (17). Um procedimento análogo é executado nos casos em que alguma das demais fases não existe na barra 8.

$$L_{7aeq} = L_{7a} \quad (15)$$

$$L_{7beq} = L_{7b} + L_{8b} \quad (16)$$

$$L_{7ceq} = L_{7c} + L_{8c} \quad (17)$$

Na implementação computacional, diferentemente do proposto em [10], o método de redução polifásico não calcula as cargas equivalentes imediatamente após cada eliminação. Esse cálculo é feito ao final por meio de uma matriz de pesos $W_{3n,3n'}$, onde "n" é o número de barras do sistema. Dessa forma, uma mudança na potência das cargas originais pode ser mapeada para as equivalentes por meio de W , sem a necessidade de reduzir novamente o sistema.

Vale ressaltar que o elemento $W(i,j)$ se refere ao mapeamento da carga conectada ao nó j do sistema original para a carga equivalente conectada ao nó i do sistema reduzido. Para facilitar a construção da matriz W , ela é calculada a partir de submatrizes $W_{3,3}$ definidas para duas barras específicas do sistema. Em outras palavras, o mapeamento das cargas conectadas na barra 8 do sistema original para as cargas conectadas à barra 7 do sistema reduzido é dado pela submatriz $W_{7,8}$ para um sistema trifásico.

Inicialmente, a matriz W é uma matriz identidade. Após a eliminação de uma barra terminal i , as linhas de W correspondentes aos nós de i são adicionadas às linhas correspondentes aos nós da barra P_i . Em seguida, substituem-se por zeros as linhas de W correspondentes aos nós de i . No exemplo em que a barra 8 é eliminada, as submatrizes $W_{8,8}$ e $W_{7,8}$ serão dadas pelas equações (18) e (19), respectivamente.

$$W_{8,8} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$W_{7,8} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

O procedimento apresentado nesta seção é repetido até que sejam eliminadas todas as barras fora do ramo principal. Em seguida, passa-se à eliminação dentro do ramo principal.

3.2.3 Eliminação dentro do ramo principal

Uma vez que todas as BNCFs foram eliminadas, o processo de redução no ramo principal continua por meio da eliminação das BNCLs. Para explicar esse procedimento, considere que a barra 7 é uma BNCL do sistema ilustrado na Figura 6, em que L_{6a} é o valor da carga conectada à fase “a” da barra 6, Z_{67} e Z_{78} são as matrizes de impedância da linha conectando as barras 6-7 e 7-8, respectivamente.

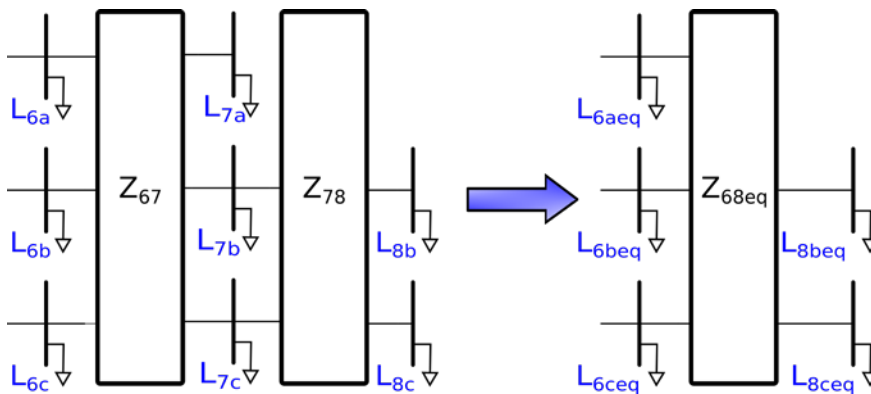


Figura 6. Exemplo ilustrativo da eliminação de uma barra não crítica intermediária para um sistema trifásico

Após a eliminação da barra 7, a linha equivalente terá sua impedância dada pela equação (20), que corresponde às matrizes de impedância das linhas sem os elementos da fase “a” (que é a fase faltante). Observa-se que o sobrescrito “red” refere-se à eliminação dos elementos correspondentes às fases faltantes. Enquanto que os números subscritos se referem às barras que estão sendo conectadas; e que as letras subscritas se referem às fases cujos efeitos são observados. Por exemplo, Z_{67bc} é a impedância mútua entre as fases “b” e “c” da linha que conecta as barras 6 e 7.

$$\mathbf{Z}_{68eq}^{red} = \mathbf{Z}_{67}^{red} + \mathbf{Z}_{78}^{red} = \begin{bmatrix} Z_{67bb} + Z_{78bb} & Z_{67bc} + Z_{78bc} \\ Z_{67bc} + Z_{78bc} & Z_{67cc} + Z_{78cc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Para determinar as cargas equivalentes, será necessário repetir o procedimento descrito na seção 4.1.2, considerando as tensões e correntes na forma de vetores. As tensões de cada nó ou fase da barra 6 e da barra 8 são reescritas conforme as equações (21) e (22).

$$\mathbf{V}_6 = \mathbf{V}_7 + \mathbf{Z}_{67}(\mathbf{I}_7 + \mathbf{I}_8) \quad (21)$$

$$\mathbf{V}_8^{red} = \mathbf{V}_7^{red} - \mathbf{Z}_{78}^{red} \mathbf{I}_8^{red} \quad (22)$$

Subtraindo (22) de (21) e analisando-se apenas as grandezas relativas às fases presentes nas três barras (6, 7 e 8), obtém-se a equação (23). As impedâncias e corrente do novo arranjo são dadas pelas equações (24) e (25), respectivamente.

$$\mathbf{V}_6^{red} = \mathbf{V}_8^{red} + \mathbf{Z}_{68}^{red} \mathbf{I}_{8eq}^{red} \quad (23)$$

$$\mathbf{Z}_{68}^{red} = \mathbf{Z}_{67}^{red} + \mathbf{Z}_{78}^{red} \quad (24)$$

$$\mathbf{I}_{8eq}^{red} = \mathbf{I}_8^{red} + (\mathbf{Z}_{68}^{red})^{-1} + \mathbf{Z}_{67}^{red} \mathbf{I}_7^{red} \quad (25)$$

Deve-se notar que, tanto no circuito original como no reduzido, a barra 8 permanece sem a fase “a”. Para eliminar a fase “a” da barra 7, adota-se o procedimento apresentado para redução de BNCF. Dessa forma, a carga desse nó é adicionada ao nó da sua barra pai. Considerando-se que em cada fase a corrente da subestação deve-se manter, então a equação (26) deve ser obedecida.

$$\mathbf{I}_6 + \mathbf{I}_7 + \mathbf{I}_8 = \mathbf{I}_{eq1} + \mathbf{I}_{eq2} \quad (26)$$

Substituindo a equação (25) em (26), obtém-se a corrente equivalente da carga da barra 6 como mostra a equação (27).

$$\mathbf{I}_{6eq} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{6a} + \mathbf{I}_{7a} \\ \mathbf{I}_6^{red} + (\mathbf{Z}_{68}^{red})^{-1} + \mathbf{Z}_{78}^{red} \mathbf{I}_7^{red} \end{bmatrix} \quad (27)$$

As cargas do sistema original podem sofrer modificações, como, por exemplo, em uma simulação do tipo *time-series*. A proposta para lidar com essas variações de carga, sem precisar repetir o processo de redução, é utilizar a matriz de pesos W para fazer o mapeamento das cargas do sistema original para o seu equivalente. Conforme apresentado na seção 4.2.2, W é obtida iterativamente ao longo do processo de redução. Inicialmente, W é uma matriz identidade. Após a eliminação de uma BNCF, ela deve ser modificada seguindo o procedimento descrito na seção 4.2.2. No caso de eliminação de uma BNCI, a matriz W resultante é de dimensão 9×9 e possui a forma da expressão (28), onde os elementos correspondentes aos valores de carga equivalentes são aqueles obtidos nas equações (25) e (27).

$$\begin{bmatrix} L_{6aeq} \\ L_{6beq} \\ L_{6ceq} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ L_{8aeq} \\ L_{8beq} \\ L_{8ceq} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (\mathbf{Z}_{68}^{\text{red}})^{-1} \mathbf{Z}_{78}^{\text{red}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\mathbf{Z}_{68}^{\text{red}})^{-1} \mathbf{Z}_{67}^{\text{red}} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_W \begin{bmatrix} L_{6a} \\ L_{6b} \\ L_{6c} \\ L_{7a} \\ L_{7b} \\ L_{7c} \\ L_{8a} \\ L_{8b} \\ L_{8c} \end{bmatrix} \quad (28)$$

De posse do procedimento supracitado, será possível reduzir qualquer sistema contendo linhas e cargas. Barras contendo outros equipamentos, tais como transformadores, capacitores *shunt*, reguladores de tensão etc, não são reduzidas pelo fato de serem consideradas barras críticas. Todavia, barras contendo geradores podem ser eliminadas seguindo o mesmo procedimento descrito para as cargas.

No caso de eliminação de barras com geradores, deve-se ter a precaução de criar uma outra matriz de pesos específica para os geradores (W_{gen}). Dita matriz terá como elementos a potência dos geradores do circuito equivalente e seguirá uma configuração similar à da matriz das cargas mostrada na expressão (28).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os métodos de redução de circuitos elétricos usados para a implementação de simulações em tempo real. Verificou-se que o embasamento matemático do método proposto em [10] pode ser aplicado para a redução de sistemas equilibrados, em razão da sua abordagem monofásica do problema. Enquanto que o método proposto em [13] evidenciou seu potencial na redução de circuitos desequilibrados, em virtude do tratamento polifásico do problema. Nos casos de sistemas desequilibrados desacoplados, ou seja, onde não há impedâncias mútuas, o método monofásico proposto em [10] pode ser aplicado para cada fase individualmente, obtendo resultados equivalentes aos obtidos com o método de redução polifásico, porém existem casos em que há desequilíbrio e impedâncias mútuas, onde apenas a redução polifásica pode ser aplicada.

Vale ressaltar que, para sistemas equilibrados, o método simplificado é vantajoso, pois sua implementação é mais simples e o custo computacional é menor. Todavia, os erros gerados em sistemas desequilibrados inviabilizam sua aplicação nesses casos. Dessa forma, apenas o método polifásico pode ser aplicado com precisão para qualquer caso.

5. REFERÊNCIAS

- [1] WARD, J. B. *Equivalent Circuits for Power-Flow Studies*, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 68, n.º 1, pp. 373–382, 1949. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5059947>>.
- [2] CHENG, X.; OVERBYE, T. J. *PTDF-based power system equivalents*, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n.º 4, pp. 1868–1876, 2005.
- [3] OH, H. *A New Network Reduction Methodology for Power System Planning Studies*, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n.º 2, pp. 677–684, 2010.
- [4] SHI, D.; TYLAVSKY, D. J. *A Novel Bus-Aggregation-Based Structure-Preserving Power System Equivalent*, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n.º 4, pp. 1977–1986, 2015.
- [5] YANG, J. P.; CHENG, G. H.; XU, Z. *Dynamic reduction of large power system in PSS/E*, *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, v. 2005, pp. 1–4, 2005.
- [6] COELHO NETO, A.; RODRIGUES, A. B.; PRADA, R. B.; DA SILVA, M. D. G. *External equivalent for electric power distribution networks with radial topology*, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, n.º 3, pp. 889–895, 2008.
- [7] DIMO, P. *Nodal analysis of power systems*. International Scholarly Book Services, Inc., Forest Grove, OR, 1975.
- [8] TINNEY, W.; POWELL, W. *The rei approach to power network equivalents*, in *Proc. PICA Conference*, v. 314, 1977.
- [9] SHAPOVALOV, A.; SPIEKER, C.; REHTANZ, C. *Network reduction algorithm for smart grid applications*, *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–5, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6725348>>.
- [10] RENO, M. J.; COOGAN, K.; BRODERICK, R.; GRIJALVA, S. *Reduction of distribution feeders for simplified PV impact studies*, *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 2337–2342, 2013.
- [11] NAGARAJAN, A.; AYYANAR, R. *Application of Minimum Spanning Tree Algorithm for Network Reduction of Distribution Systems*, *North American Power Symposium (NAPS)*, 2014.
- [12] RAO, S.; TYLAVSKY, D. *Nonlinear network reduction for distribution networks using the holomorphic embedding method*, *NAPS 2016 - 48th North American Power Symposium, Proceedings*, 2016.
- [13] PECENAK, Z. K.; DISFANI, V. R.; RENO, M. J.; KLEISSL, J. *Multiphase Distribution Feeder Reduction*, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 33, n.º 2, pp. 1320–1328, 2018.
- [14] ISHCHENKO, A.; JOKIC, A.; MYRZIK, J.; KLING, W. *Dynamic Reduction of Distribution Networks with Dispersed Generation*, *2005 International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam, pp. 1–8, 2005.
- [15] EPRI, *Distribution Green Circuits Collaboration*, Tech. Rep., 2010. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/1020740/?lang=en-US>>.

CAPÍTULO 11

Quantificação dos Impactos Técnicos da Inserção de Geração Fotovoltaica em Redes Elétricas de Distribuição

Priscilla Araújo Juá Stecanella
Anésio de Leles Ferreira Filho
Rafael Amaral Shayani
Hudson de Paula Romualdo
Juliano Vieira Gregório
Gustavo Henrique de Souza Leão
Sergio de Oliveira Frontin



OBJETIVO

Este capítulo apresenta estudos de casos relativos à inserção da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) conectada à rede de distribuição. Um dos casos se refere à quantificação dos impactos da inserção de diferentes montantes de GDFV na rede elétrica do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, e outro caso apresenta os resultados de um estudo para um alimentador radial real da CEB-DIS, em que se analisou a influência da localização de GDFV no que tange às perdas técnicas do sistema. Em seguida, um método robusto para quantificar os impactos em redes reais de distribuição é apresentado.

1. INTRODUÇÃO

A quantificação dos impactos que a GDFV causa na rede elétrica de distribuição é um relevante tema que ganha cada vez mais importância à medida que a quantidade de unidades consumidoras com Geração Distribuída aumenta, sobretudo por conta da possibilidade de compensação financeira prevista na Resolução Normativa Aneel n.º 482/2012. Em especial, o fato de não se ter a informação, a priori, de onde a GDFV será instalada, e com qual valor de potência, traz uma complexidade adicional ao problema. O presente capítulo apresenta um método que permite lidar com essa questão.

Inicialmente é apresentado o estado da arte da quantificação dos impactos da GDFV em redes de distribuição. Em seguida, um estudo de caso para o alimentador de média tensão do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília é apresentado. Por ser um alimentador pequeno, com dezenas de barras, é possível identificar possíveis locais e potências para instalação da Geração Distribuída (GD), e a tensão em todas as barras pode ser analisada individualmente. Em seguida, um alimentador real da CEB-DIS é considerado quanto ao efeito das perdas técnicas em função do aumento da penetração da GDFV. Por possuir milhares de unidades consumidoras, um método probabilístico é utilizado para alocar a geração ao longo do alimentador. Ambos os estudos de caso consideram uma situação específica, conservadora, de irradiação solar. Por fim, um método robusto é apresentado, que permite simular alimentadores reais, com milhares de barras, e apresentar os resultados de forma consolidada, com indicadores que indicam a variação de tensão das barras, a redução de demanda e as perdas, considerando, probabilisticamente, o local de alocação da GD e também uma amostra maior de irradiação solar, a fim de obter resultados mais representativos.

2. ESTADO DA ARTE

São apresentados, a seguir, estudos relacionados aos impactos técnicos resultantes da integração de GDFV em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Vieira (2016) avalia os impactos técnicos da GDFV conectada à rede (perdas técnicas, potência de pico e níveis de tensão), com o objetivo de se obter um tipo de incentivo regulatório que maximize os benefícios da energia fotovoltaica no sistema elétrico [1]. Cohen e Callaway (2016) relatam que a magnitude dos impactos da alta penetração de GDFV pode variar consideravelmente dependendo da topologia do alimentador, do clima e do nível de penetração, dentre outros fatores [2].

Westacott e Candelise (2016) efetuaram uma avaliação dos impactos da penetração fotovoltaica (FV) sobre o fluxo de energia em uma rede de distribuição de baixa tensão no Reino Unido contendo 1,5 milhão de consumidores. Para tanto, um *framework* desenvolvido anteriormente para mapear a integração de GDFV por regiões e segmentos de mercado no Reino Unido foi ampliado para incluir a caracterização de perfis de demanda de cargas não domésticas. Para se avaliar o impacto da integração de geração FV no fluxo de energia, os autores efetuam uma análise para o pior cenário, isto é, para a época do ano em que a geração FV é tomada como máxima em relação à demanda [3].

De acordo com Ebad e Grady (2016), um método de simulação robusto para modelar e classificar os impactos da inserção de painéis fotovoltaicos em um alimentador se faz necessário. Tal método pode auxiliar projetistas de distribuição a prever e melhor entender os efeitos da inserção de geração fotovoltaica na tensão, e a evitar decisões conservadoras relacionadas à quantidade de painéis que pode ser instalada em um alimentador [4].

Cheng *et al.* (2016) apresentam um guia para a execução da análise da integração de geração FV na rede, em altos níveis de penetração. Um dos seus objetivos é investigar quais as maiores limitações que a integração da geração FV pode ter em cenários futuros de alta penetração [5].

De acordo com Adefarati e Bansal (2016), os projetistas, os reguladores e os criadores de políticas do sistema elétrico de potência têm mencionado vários benefícios da integração de unidades de GDFV à rede de distribuição. Esses benefícios dependem das características das FERs (unidades fotovoltaicas e unidades eólicas), das características das cargas, de recursos renováveis locais e da configuração da rede. Eles podem ser otimizados se as unidades de GDFV forem devidamente localizadas e configuradas. Em seu trabalho, os autores apresentam uma revisão dos benefícios técnicos, econômicos e ambientais da inserção de energias renováveis às redes de distribuição. Com 142 trabalhos referenciados, o estudo explora aspectos técnicos como i) confiabilidade no fornecimento da energia (índices de DEC e FEC, por exemplo), ii) perfil de tensão e redução de perdas técnicas considerando as localizações e os tamanhos ótimos da GDFV e iii) vantagens operacionais de cada tecnologia (Levelized Cost Of Energy, Taxa Interna de Retorno, Receita Operacional Líquida e *payback*). Os autores concluem que as tecnologias de GDFV mudaram o funcionamento do sistema de distribuição e incentivaram a conexão de usinas menores próximas dos consumidores. Isso reduziu as perdas de potência, energia e emissões de carbono, além de aumentar a confiabilidade do sistema e o perfil de tensão. Porém, estes objetivos estão sujeitos à localização, configuração da rede, operação e características das cargas [6].

Conforme Hung, Mithulanathan e Lee (2014), um modelo de carga constante ou dependente da tensão é usualmente assumido na maioria dos estudos de planejamento de GDFV. Neste estudo, são propostos cinco tipos de modelos de cargas variantes no tempo e dependentes da tensão (industrial, residencial, comercial, mista [residencial, industrial e comercial] e constante) para se determinar o nível de penetração de unidades de GDFV em uma rede de distribuição, considerando-se perdas técnicas e tensão. Uma nova expressão analítica é primeiramente proposta para dimensionar uma unidade fotovoltaica que pode fornecer potência ativa e reativa. Essa expressão é baseada na derivação de um índice multiobjective (IMO) que é formulado como uma combinação de três índices, sendo eles: perdas por potência ativa, perdas por potência reativa e desvio de tensão [7].

Goop, Odenberger e Johnsson (2016) desenvolveram uma metodologia para investigar os impactos e os potenciais benefícios da inserção de GD solar e eólica. São exemplos destes impactos a redução das perdas e a alteração no fluxo de potência entre os diferentes níveis de tensão. Segundo os autores, os benefícios estão relacionados principalmente à quantidade de eletricidade que pode ser localmente utilizada onde a energia é gerada. Portanto, são também objetivos deste trabalho i) investigar como algumas características dos perfis da carga e da geração influenciam as tensões e ii) desenvolver uma metodologia que possibilite a identificação do nível de penetração de Geração Distribuída que acarreta em efeito positivo na rede, em termos de perdas e capacidade dos transformadores [8].

Em Azzopardi e Gabriel-Buenaventura (2014), desenvolveu-se uma metodologia para a análise da viabilidade técnica da inserção de elevados níveis de penetração da GDFV, considerando-se o “casamento” da demanda com a geração. O trabalho, ao investigar um total de 393 unidades consumidoras (residências e comércios), mostra que iniciativas técnicas, tais como deslocamento de carga (*load shifting*) e armazenamento de energia, podem ser requeridas para a penetração de GDFV nos sistemas elétricos. Sob o foco da redução da demanda em horários de ponta, o artigo verifica que, na prática, o *load shifting* pode ser difícil para ser alcançado. Além disso, um aumento na tensão do prosumidor, causado pela incompatibilidade entre a geração e a demanda, minimiza a diferença de potencial elétrico existente entre os alimentadores e os consumidores, melhorando-se o perfil de tensão dos consumidores e reduzindo-se as perdas técnicas da rede. O artigo conclui que a elevada penetração de GDFV é viável nos sistemas de distribuição e pode reduzir os custos de infraestrutura da rede, mesmo com cabos, subestações e reforços adicionais requeridos [9].

De acordo com Kitworawut, Azuatalam e Collin (2016), o Reino Unido, para atingir seus objetivos relacionados a energias renováveis e para reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) de acordo com o estabelecido no Protocolo de Kyoto, está encorajando o desenvolvimento de geradores de pequena escala por meio de diferentes esquemas de incentivo. Até o momento, a geração de energia renovável do Reino Unido tem sofrido constante crescimento, mas há preocupações a respeito dos impactos que esse tipo de geração pode causar no sistema elétrico de potência. Em função disso, especialistas têm investido em pesquisas sobre o impacto que a alta penetração de microgeração terá sobre as redes de BT/MT/AT até 2050. Os autores investigaram os impactos técnicos da microgeração na rede de distribuição de baixa tensão do Reino Unido, usando a GDFV como estudo de caso. Tais impactos técnicos incluem o aumento da tensão, o desequilíbrio de tensão, o fluxo de potência reverso, o carregamento de transformadores e cabos, perdas do sistema e harmônicas. Os autores analisaram diversos impactos, considerando-se dois dias críticos: um no verão e outro no inverno [10].

Em seu trabalho, Verdelho *et al.* (2017) propuseram um método de caracterização de redes de baixa tensão para avaliar o impacto da Geração Distribuída nas perdas absolutas e técnicas. A análise ocorreu para diferentes níveis de penetração fotovoltaica e diferentes cenários geográficos de penetração (urbano e rural). A caracterização das redes de baixa tensão se deu com base em quatro parâmetros: (1) a impedância da rede – a impedância da rede modelada deve ser coerente com as impedâncias dos modelos já existentes; (2) a topologia da rede – a variabilidade de topologias das redes foi representada por meio de cinco diferentes grupos; (3) o padrão de carga – com base na média diária, foi estimado um padrão geral de carga; e (4) o desequilíbrio na carga – cada consumidor foi designado aleatoriamente para uma fase específica [11].

Em seu estudo, Bhagavathy *et al.* (2017) analisaram o comportamento de um alimentador de uma rede de distribuição do Reino Unido perante diferentes níveis de penetração fotovoltaica. O objetivo do trabalho foi quantificar, em porcentagem, como a integração FV afeta o desempenho da rede. A pesquisa considerou a natureza desequilibrada das redes de distribuição e um modelo dinâmico do sistema FV com diversos níveis de penetração, condições de carga e irradiação solar [12].

Aziz e Ketjoy (2018) propuseram um método que permite o aumento do nível de penetração da geração fotovoltaica (FV) sem que os limites de tensão sejam excedidos. O método baseia-se no controle da potência reativa e no uso de comutadores em conjunto com os transformadores existentes na rede para aumento da capacidade de hospedagem FV da rede [13].

Haghdadi *et al.* (2018) investigaram o impacto da GD no pico de carga de diferentes subestações (SE). Os autores avaliaram os efeitos de diferentes níveis de penetração fotovoltaica nos períodos de pico de carga com base na disponibilidade de energia FV nestes períodos [14].

Em seu trabalho, Torquato *et al.* (2018) analisaram o impacto da integração de sistemas FV na rede elétrica no que diz respeito a sobretensões/subtensões, desequilíbrio de tensão e carga nos condutores e transformadores. Para tanto, os autores empregaram uma versão simplificada do método Monte Carlo em 50.000 sistemas reais de baixa tensão. Com isso, eles efetuaram uma avaliação, com base numa análise de risco, da capacidade da rede em suportar geração FV. Em consequência, eles geraram projeções de como essa capacidade pode evoluir ao longo dos próximos anos. Cada cenário simulado foi elaborado considerando-se a possibilidade de se contemplarem os seguintes aspectos: (1) alocação aleatória do sistema FV até que a porcentagem desejada seja satisfeita; (2) determinação da potência FV injetada considerando-se a irradiação do período entre 11 e 13 horas; (3) cálculo de fluxo de potência no período estabelecido com uma resolução de 15 minutos; e (4) identificação das tensões nodais, correntes nos ramos e carregamento do transformador em cada fluxo de potência [15].

2.1 Considerações Sobre o Estado da Arte

De acordo com os trabalhos ora citados neste levantamento, os impactos da integração de sistemas FV estão sujeitos à localização do GDFV, configuração de rede, operação e características da carga. Nesse sentido, alguns autores avaliaram as variações nos níveis de tensão, perdas e pico de demanda, e também a reversão da direção do fluxo de potência, todos emergindo da integração da GDFV à rede. Além disso, pela mesma razão, é possível observar estudos na literatura que são dedicados à análise do número de operações na derivação do transformador, distorções harmônicas e desequilíbrio e flutuação de tensão.

As condições que definem como as simulações computacionais são realizadas constituem um aspecto importante que pode influenciar os resultados dos impactos encontrados. Os estudos presentes na literatura empregam três diferentes conjuntos de dados: dados hipotéticos, dados reais e dados reais com algumas simplificações em redes. A maioria dos artigos que usam dados reais investigam apenas um ou dois alimentadores. Os resultados da investigação apresentados em Cohen e Callaway (2016) [2] representam uma exceção. Os autores deste trabalho realizaram simulações computacionais para identificar os impactos da integração da GDFV em oito alimentadores típicos localizados em três diferentes climas. Eles enfatizam que,

apesar de seu estudo ser extenso em termos de combinações de escopos geográficos e número de tipos de alimentadores, a diversidade real da infraestrutura do sistema elétrico é tão grande que há alimentadores que sofreriam impactos mais severos do GDFV do que aqueles abordados.

Ainda neste contexto, Torquato *et al.* (2018) [15] efetuaram, por meio de um método simplificado baseado em Monte Carlo, uma análise baseada em risco de capacidade de hospedagem para cerca de 50.000 sistemas fotovoltaicos reais. Segundo os autores, o método pode ser usado pelas concessionárias para melhorar o gerenciamento de sistemas de baixa tensão com alta penetração de energia fotovoltaica.

Apesar da existência na literatura desses trabalhos, cabe destacar que, de acordo com Urbanetz, Braun e Ruther (2012) [16], as características das redes de energia são únicas para cada rede devido às suas variações nos tipos de carga (residencial, comercial, industrial ou uma mistura), densidade de carga (urbana ou rural), tipo de construção (radial ou rede) entre outros aspectos. Isso justifica estudos em uma larga diversidade de alimentadores, objetivando a generalização de possíveis conclusões.

Desta investigação, nota-se a ausência de estudos contemplando simulações computacionais para a identificação dos impactos da integração de sistemas FV que empregam dados reais dos alimentadores de toda uma rede elétrica de uma concessionária, consumo de carga e geração fotovoltaica (irradiância e temperatura). Esses impactos devem ser calculados considerando uma abordagem conjunta e separada dos alimentadores da concessionária em análise. Tal abordagem fornecerá informações consistentes e importantes sobre quão intensos serão os impactos da integração de sistemas FV em níveis de penetração que hoje são raros, mas que poderão se tornar comuns no futuro. Além disso, um conjunto de resultados obtidos, considerando uma abordagem conjunta e separada dos impactos observados em vários alimentadores, pode ser caracterizado como o mais adequado para fornecer informações úteis aos tomadores de decisão das agências reguladoras e/ou concessionárias de energia.

3. ESTUDO DE CASO 1: ALIMENTADOR DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

A Universidade possuía 52.597 alunos matriculados em 2016, distribuídos em quatro campi universitários: Darcy Ribeiro, Gama, Planaltina e Ceilândia. Dentre eles, o Campus Darcy Ribeiro é o maior. Possui uma área total de 3.950.579 m² e 552.171 m² de área construída. Por ter fornecimento de energia elétrica em média tensão, a rede elétrica não está modelada no banco de dados da distribuidora. Após o levantamento das características da rede, ela foi modelada no *OpenDSS* para que os estudos de impactos pudessem ser realizados.

3.1 Método de Simulação

Apresentam-se a seguir os principais fatores para análise dos impactos ocasionados pela inserção da GDFV em uma rede de distribuição.

3.1.1 Fatores de influência

A inclusão de GDFV nas redes de distribuição deve ser limitada pelos impactos causados no sistema, notavelmente os níveis de tensão e o limite térmico dos condutores e transformadores. A energia injetada na rede pela GDFV depende da geração fotovoltaica e do consumo da carga, ou seja, a produção local de energia subtraída do consumo. A geração de energia, por sua vez, depende da irradiância solar. Assim, dois fatores importantes a serem considerados nos estudos acerca da GDFV são: a irradiância solar e a demanda das unidades consumidoras.

3.1.2 Irradiância solar

Um dos fatores a serem considerados é a variação da irradiância solar incidente ao longo do dia. É visível que, nos horários de maior valor de irradiância, a produção fotovoltaica é maior. Já no começo da manhã e no final da tarde, a produção é reduzida. Além disso, a irradiância pode ser alterada por efeitos climáticos diversos. Finalmente, pode-se considerar também a localização geográfica da GDFV. Observa-se que os países localizados próximos à linha do equador possuem recursos solares mais abundantes do que os localizados mais próximos aos polos.

3.1.3 Demanda das unidades consumidoras

A demanda das unidades consumidoras de energia elétrica depende do tipo de consumidor em que elas se enquadram: comercial, residencial ou industrial. Camargos (2013) mostra que “a variação de demanda influencia a injeção de potência e essa afeta diretamente o limite de penetração da GDFV, uma unidade consumidora pode alterar esse limite ao longo do dia, dependendo de qual tipo ela seja, e em diferentes dias da semana” [17].

3.1.4 Programa utilizado

O *Open Distribution System Simulator (OpenDSS)* é um programa destinado às análises de sistemas de distribuição de energia desenvolvido pela *Electric Power Research Institute (EPRI)*. As análises são feitas no domínio da frequência. A estrutura do *OpenDSS* divide os circuitos elétricos em estruturas distintas, sendo elas: *Power Delivery Element (PDElement)*, *Power Conversion Element (PCElement)*, *Controls* e *General*. O primeiro passo da simulação é inserir os parâmetros dos circuitos. Os componentes básicos do circuito são: alimentador, condutores, transformadores, reguladores, geradores e capacitores. Também são inseridas informações acerca das cargas e da GDFV. Os parâmetros inseridos e os passos da simulação são mostrados nos tópicos a seguir.

3.1.5 Parâmetros

Os parâmetros dos componentes do sistema elétrico são inseridos utilizando a estrutura predefinida, de fácil acesso na documentação técnica do programa. Os principais dados de entrada são as coordenadas geográficas das barras, geometria da linha de distribuição, condutores, transformadores, curvas de carga, medidores e monitoramento.

3.1.6 Processamento

Após a inserção dos parâmetros no *OpenDSS*, a simulação do circuito é realizada através do acionamento do comando *solve*. A obtenção dos dados provenientes da simulação, tais como níveis de tensão, potências, correntes e perdas nos circuitos, são fundamentais para a análise do sistema elétrico de potência, e mostra que os principais comandos utilizados para a extração dos dados são:

- *Show voltagesIn*: mostra a tensão de fase-neutro em todas as barras;
- *Show powers kva*: mostra a potência ativa e reativa consumida em cada elemento do circuito;
- *Show losses*: mostra as perdas em cada elemento e as perdas totais nas linhas de transmissão e nos transformadores;
- *Plot Loadshape*: mostra a curva de carga; e
- *Plot Monitor*: exibe a tensão ou potência de um elemento ao longo do tempo.

Com a execução do *OpenDSS* no modo *Daily*, ou seja, com a curva de carga diária, os comandos de exibição de valores tais como *show losses* exibem apenas os resultados obtidos na última interação. Assim, para a compreensão do comportamento ao longo do tempo, os dados são exportados e analisados com a ajuda de um *software* editor de planilhas.

Há variações nas curvas de carga das unidades consumidoras em diferentes dias da semana, assim as simulações são realizadas para diferentes dias típicos. Além disso, o nível de penetração da GDFV é variado. Desse modo, é necessário alterar os dados importados ao *OpenDSS* e simular cada novo cenário analisado.

3.2 Hipóteses Adotadas

O método utilizado para o estudo dos impactos causados pela inserção da GDFV na rede de distribuição adota as seguintes hipóteses [18]:

1. o sistema é trifásico, simétrico e equilibrado. Desse modo, apenas as impedâncias de sequência positiva são utilizadas e podem-se analisar os resultados obtidos por fase, no sistema por unidade (pu);
2. em regime permanente, nenhum equipamento está em sobrecarga;
3. as cargas e a GDFV mantêm sua potência constante para uma dada variação de tensão, ou seja, são modelados com potências constantes;
4. o fator de potência dos inversores é unitário, ou seja, a GDFV produz apenas potência ativa; e

5. todos os geradores distribuídos estão próximos entre si, assim a irradiância incidente sobre os painéis solares é idêntica para todas as instalações.

É mostrado que a adoção das hipóteses acima citadas não compromete o resultado das análises, pois, apesar de poder existirem consumidores desequilibrados ou com conexões monofásicas e bifásicas, a existência de muitos consumidores no ramal de distribuição permite obter um sistema elétrico aproximadamente balanceado [18].

3.3 Sistema Elétrico

É necessário que se tenha uma série de informações acerca do sistema elétrico a ser estudado para que o método explicado anteriormente seja aplicado. Entre elas podem-se citar: dados elétricos do alimentador, limites adequados de tensão, capacidade de condução de corrente, curvas típicas da demanda dos consumidores e valores da irradiância solar. Esses parâmetros são explicados a seguir.

3.3.1 Alimentador de distribuição do campus

- **Posicionamento dos barramentos, condutores e transformadores** – o Google Maps torna possível a visualização de imagens de satélite e das ruas mapeadas pela ferramenta *Google Street View*. Assim, é possível navegar virtualmente através das ruas e estudar as conexões elétricas presentes na maioria dos postes de distribuição elétrica. Portanto, a utilização das imagens de satélite possibilita realizar um mapeamento completo das partes visíveis da rede de distribuição. Utilizando a ferramenta de medida de distâncias presentes no mesmo programa, é possível medir a distância entre os pontos de conexão e estimar o comprimento dos condutores elétricos de média tensão. Os pontos de interesse, tais como transformadores, postes de distribuição e derivações, foram mapeados e, a partir desse mapeamento, o caminho dos condutores elétrico foi traçado.
- **Parâmetros elétricos de condutores e transformadores** – para a determinação das características elétricas dos condutores, tais como o seu diâmetro externo, o raio geométrico, resistência elétrica à corrente contínua e à corrente alternada (60 Hz), reatância indutiva e capacitiva e a capacidade de condução de corrente, foram consultados o Manual de Cabos de Alumínio Nu com Alma de Aço – CAA (série AWG) do fabricante *Nexans* e a norma CEB NTD 1.02 – Critérios para Projeto de Redes Aéreas Urbanas Convencionais. As características elétricas dos transformadores foram obtidas na literatura.
- **Níveis de tensão** – o lado de alta tensão do alimentador possui tensão de 13.800 V; e o lado de baixa tensão, 380 V. Considerou-se que a alimentação dos transformadores se dá em um ponto próximo da carga consumidora. Desse modo, apenas a queda de tensão nos condutores com tensão de 13.800 V foi considerada.

3.3.2 Critérios de tensão e capacidade de condução de corrente

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estabelece, no seu Procedimento de Distribuição (PRODIST), a faixa de tensão considerada adequada nos sistemas de distribuição e que foi adotada como critério de tensão neste estudo, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de tensão adequada

Tensão de Referência – TR (V)	Faixa de Tensão Adequada (V)	Faixa de Tensão Adequada (pu)
13.800	12.834 ≤ Tensão ≤ 14.490	0,93TR ≤ Tensão ≤ 1,05TR

Fonte: Aneel [25].

De outro modo, a corrente elétrica fluindo nos dispositivos, sob efeito da GDFV, será comparada com a sua capacidade de condução de corrente, tanto para condutores quanto para transformadores. Nos casos em que a corrente obtida for superior à corrente nominal, o dispositivo – condutor ou transformador – estará em sobrecarga, e o processamento deve alertar o usuário sobre este impacto na rede.

3.3.3 Valores de irradiância solar, temperatura, eficiência e potência gerada pela GDFV

Quatro parâmetros importantes para o desempenho de painéis fotovoltaicos são os valores da irradiância solar no local de instalação, a variação da temperatura ao longo do dia, a eficiência dos painéis utilizados na instalação e a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos.

Os valores de irradiância solar média em Brasília foram obtidos através do programa *PVSyst*, que fornece a curva diária para dias típicos na cidade analisada. A partir da análise dos dados, observaram-se três possíveis curvas de irradiância solar: Irradiância Média exibe um dia típico ao longo dos anos analisados, Irradiância Máxima mostra o dia com a máxima irradiância registrada e Irradiância Mínima, o dia com a mínima irradiância em horário de pico (12h).

Há um perfil padrão de variação da temperatura na superfície dos painéis fotovoltaicos utilizados pelo *OpenDSS*, e se assumiu que diariamente os painéis estão sujeitos à tal curva de temperatura. Em relação à potência gerada pelos módulos fotovoltaicos, pode ser calculada por (1).

$$P = I \times N \times \eta \times A \quad (1)$$

Em que:

- P = potência gerada pela GDFV em watt (W);
- I = irradiância solar em watt por m² (W/m²);
- N = número de unidades consumidoras na barra;
- η = eficiência do painel fotovoltaico; e
- A = área destinada à instalação dos painéis.

Portanto, a potência gerada em cada unidade consumidora pode ser determinada a partir dos itens acima descritos.

3.4 Resultados

Pode-se utilizar a área dos telhados disponíveis para a instalação de painéis fotovoltaicos para se estimar a potência que pode ser gerada em prédios de interesse. Para mapear as áreas disponíveis nas edificações, utilizou-se o programa *Google Earth*. Após a determinação das áreas máximas disponíveis, calculou-se a área útil para instalação de painéis fotovoltaicos considerando-se que a porcentagem de aproveitamento do telhado é igual a 80% da área total para edificações antigas e 50% para edificações com menos de 30 anos [19].

O modelo da rede elétrica de média tensão interna à Universidade e as curvas de carga das unidades consumidoras (prédios das faculdades e institutos) foram simulados considerando diferentes cenários de arranjos fotovoltaicos para determinação dos impactos.

O procedimento considera as variações nas curvas de carga das unidades consumidoras em dias úteis e finais de semana típicos e alteração da irradiância solar ao longo do dia. Um cenário de referência foi modelado (caso base) e comparado com um cenário de GDFV instalada em diversos prédios da UnB, tendo como base a área útil de telhado disponível e com máxima irradiação solar. O esquemático do sistema de distribuição do campus de média tensão é mostrado na Figura 1.



Figura 1. Esquemático do sistema de distribuição do campus mostrando o caminho dos condutores elétricos de média tensão

3.4.1 Cenário 1 (caso base) – Sem GDFV

O cenário base para o sistema elétrico da Universidade de Brasília é simulado com as curvas de demanda típicas das unidades consumidoras tanto para dias úteis quanto para os finais de semana, apresentadas na seção anterior. Analisa-se aqui o comportamento do sistema de distribuição em suas condições normais de operação, sem a presença de GDFV. Nenhum dos equipamentos utilizados no sistema de distribuição apresentou sobrecargas nos dias úteis e nem nos finais de semana.

A tensão para as barras do CDT, CESPE e CPD apresentaram maiores variações de tensão durante o dia útil; as tensões variaram de 1,038 pu às 4 horas no CDT a 1,030 pu às 15 horas no CESPE. Assim, a tensão nas barras é menor no horário de pico do consumo, pois há uma maior queda de tensão nos condutores, conforme Figura 2.

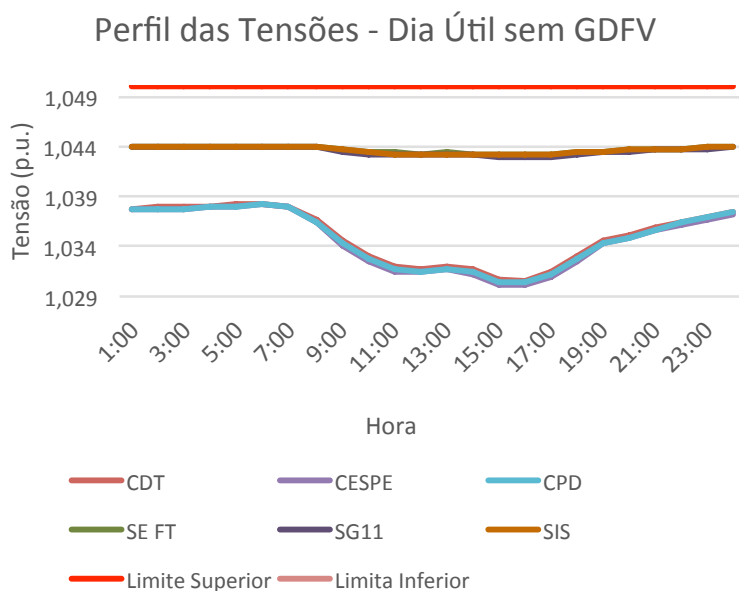


Figura 2. Perfil das tensões durante dias úteis sem a inserção de GDFV exibindo as três barras com maior tensão (SIS, SG11 e SE FT) e as três barras com as menores tensões (CESPE, CPD e CDT)

Observa-se que as tensões nas barras mais distantes do ramal de entrada apresentam maiores quedas de tensão, não apenas pela maior impedância elétrica ocasionada pela distância, mas também pelo menor diâmetro dos condutores nas conexões finais do alimentador e, conseqüentemente, maior impedância dos trechos. A Figura 3 facilita a percepção de que a distância influencia a queda de tensão nas barras consideradas. No gráfico, comparam-se as tensões às 6 horas, quando a Universidade apresenta o menor consumo e, portanto, as menores quedas de tensão, com as tensões às 15 horas, onde ocorre o maior consumo, e as tensões mínimas são observadas no sistema.

Nota-se que a queda de tensão afeta todas as barras, com exceção da barra de referência, e que, quanto maior a distância em relação ao ramal de entrada, maior a queda de tensão. Assim, conforme observado, as barras do CPD, CDT e CESPE (as mais distantes) sofrem maiores impactos em suas tensões.

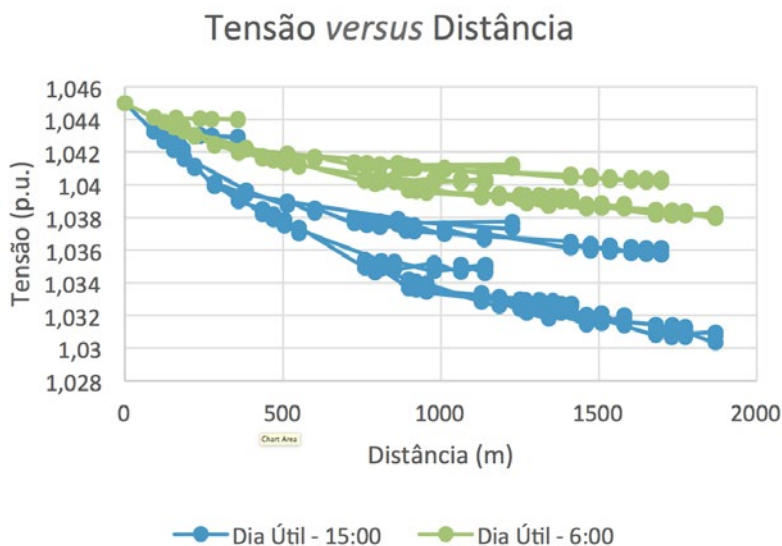


Figura 3. Tensão (em pu) nas barras em função da distância em relação ao ramal de entrada da Universidade de Brasília para um dia útil típico às 6 horas e às 15 horas

Em relação às perdas ôhmicas no campus, a Figura 4 mostra que as perdas ocorrem em função do consumo elétrico e, por esse motivo, as curvas de consumo médio e perdas médias possuem perfis semelhantes. Em um dia útil típico, o campus consome 65.937,36 kWh e apresenta perdas de 2.863,24 kWh, já nos finais de semana o consumo elétrico diário é reduzido para 44.967,60 kWh, apresentando perdas iguais a 2.394,97 kWh. Desse modo, o sistema elétrico da Universidade possui uma eficiência média de 95,658% nos dias úteis e de 94,674% aos finais de semana.

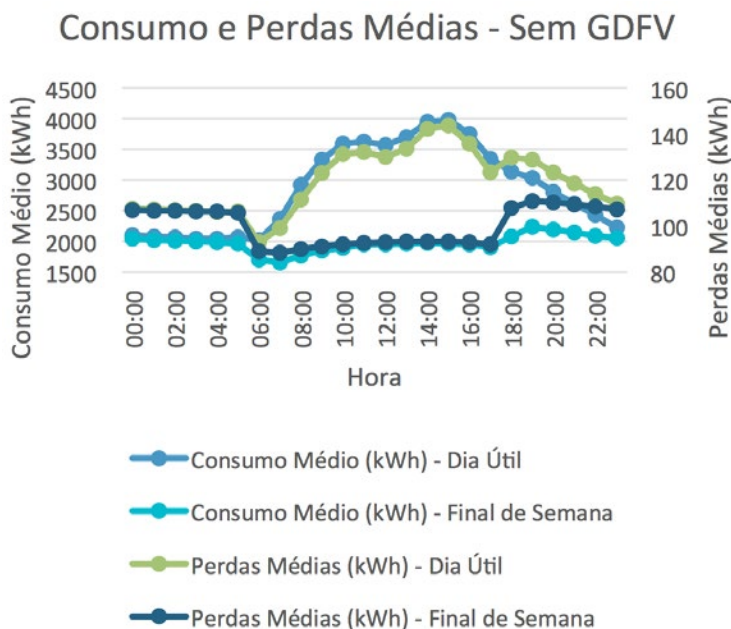


Figura 4. Consumo energético da Universidade e perdas médias, ambos em kWh, para cada hora do dia para dias úteis e finais de semana

3.4.2 Cenário 2 – GDFV em diversas unidades consumidoras e maior irradiância solar

Uma nova simulação foi realizada considerando uma curva de irradiância com valor de pico mais elevado e um maior nível de penetração de GDFV na Universidade de Brasília. Dados do *National Renewable Energy Laboratory* (2017), do Departamento de Energia dos Estados Unidos, mostra que em Brasília ocorreram, em 2017, picos de irradiação solar iguais a 1.053 W/m². Tal valor de irradiação é 55% maior que o valor máximo adotado na curva de irradiância média, 678 W/m². A fim de simular um cenário em que houvesse maior geração a partir dos módulos fotovoltaicos, a curva de irradiância foi ajustada para que o seu valor máximo coincidissem com os picos registrados em 2017, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Curva de Irradiância Ajustada (W/m²)

Horário	Irradiância Ajustada (W/m ²)	Horário	Irradiância Ajustada (W/m ²)
00:00	0,00	12:00	1.053,00
01:00	0,00	13:00	984,66
02:00	0,00	14:00	830,91
03:00	0,00	15:00	633,66
04:00	0,00	16:00	386,72
05:00	0,00	17:00	135,12
06:00	55,91	18:00	6,21
07:00	282,66	19:00	0,00
08:00	534,27	20:00	0,00
09:00	762,57	21:00	0,00
10:00	930,31	22:00	0,00
11:00	1.035,92	23:00	0,00

A potência máxima gerada pelo sistema fotovoltaico das unidades consumidoras foi calculada levando-se em consideração as áreas disponíveis nos telhados dos edifícios, e os resultados são exibidos na Tabela 3. Nessas condições, a GDFV injeta 47.003,23 kWh diários na rede de distribuição, correspondendo a 71,28% do consumo em um dia útil típico. Já nos finais de semana, corresponderia a 104,52% do consumo, ou seja, há excesso de energia.

Tabela 3. Áreas úteis dos telhados das unidades consumidoras e a potência de pico da GDFV

Prédio	Área Útil do Telhado (m ²)	Potência Máxima da GDFV (kWp)
ICC	26.009	4.518,93
SG 11	1.513	262,88
CDT	1.019	177,05
CPD	436	75,75
PAT	1.405	244,11
PJC	1.405	244,11
BSA NORTE	2.867	498,13
BSA SUL	864	150,12
TOTAL	35.608	6.171,08

As curvas de demanda do medidor geral do sistema com GDFV são comparadas ao sistema sem a GDFV na Figura 5. Observa-se que há uma alteração relevante no formato das curvas e, conseqüentemente, no comportamento do sistema elétrico. Durante os dias úteis, a potência da GDFV causa reversão no sentido do fluxo de potência das 8 às 14 horas, o fluxo reverso tem valor máximo de 1.606,52 kW às 11 horas. Como nos finais de semana a demanda é menor, a inversão do fluxo ocorre das 7 às 16 horas, com valor máximo de 3.252,33 kW também às 11 horas. Nota-se que a máxima potência injetada pela Universidade (3.252,33 kW) ocorre aos finais de semana – quando há a inversão no fluxo de potência – e equivale a 81,70% da demanda máxima do campus (3.980,95 kW nos dias úteis).

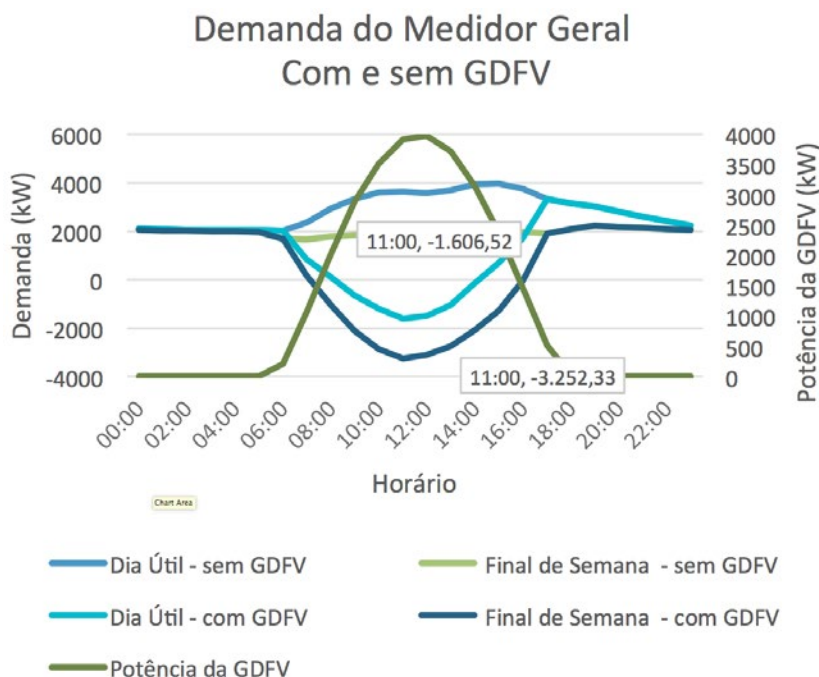


Figura 5. Demanda do medidor geral para dias úteis e finais de semana, com e sem GDFV.

Observa-se que, para os finais de semana, há a inversão no fluxo de potência

Durante os dias úteis, apesar das tensões no ICC Norte atingirem 1,0492 pu, não há sobretensões no sistema. Já durante os finais de semana, das 10 às 12 horas, 22 barras ultrapassam os limites de tensão adequada; às 13 horas esse número cai para 14 barras. Neste caso, as tensões no ICC Sul atingiram 1,0529 pu.

As variações de tensão ao longo de um final de semana típico para as 22 barras que apresentaram sobretensões são mostradas na Figura 6, indicando que ocorrem apenas aos finais de semana e por um período de 5 horas, das 9 às 14 horas; em todos os demais horários da semana, não há sobretensão. Assim, em uma semana típica, a rede de distribuição da concessionária não enfrenta problemas relacionados à inserção da GDFV em 94% do tempo (só há extrapolação dos limites durante 10 horas a cada semana).

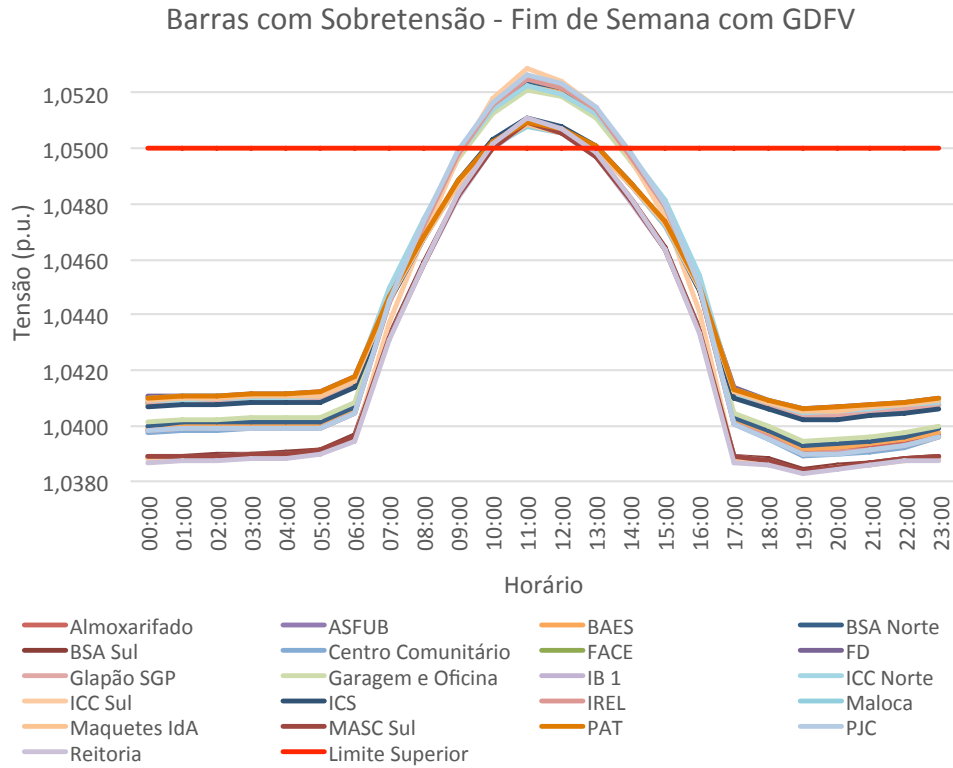


Figura 6. Variação da tensão ao longo do dia para as 22 barras que apresentaram sobretensões durante os finais de semana com GDFV

O comportamento das tensões em todas as barras às 11 horas, horário em que as máximas tensões são atingidas, é mostrado na Figura 7.

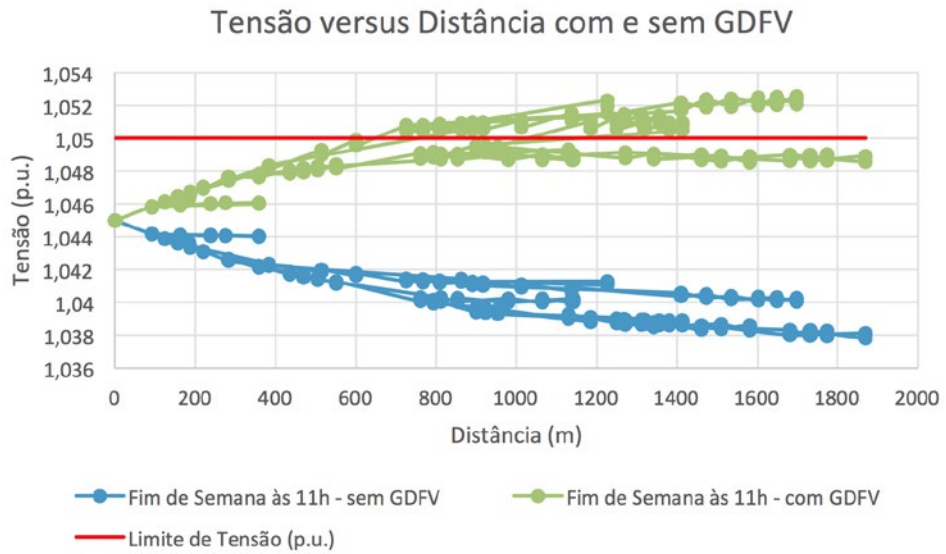


Figura 7. Tensões em todas as barras em função da distância do ramal de entrada para finais de semana com GDFV

As perdas técnicas, conforme a Figura 8, diminuem razoavelmente durante os dias úteis, pois há uma redução na demanda máxima do sistema. Nesse cenário, a eficiência do sistema de distribuição aumentou de 95,658% para 96,029%. Entretanto, aos finais de semana, o excesso de energia ocasionou um aumento na corrente que flui no sistema de distribuição, aumentando as perdas técnicas de 2.393,97 kWh para 2.404,06 kWh diários, um incremento de 3,35%. Logo, a eficiência diminuiu de 94,674% para 89,556% aos finais de semana.

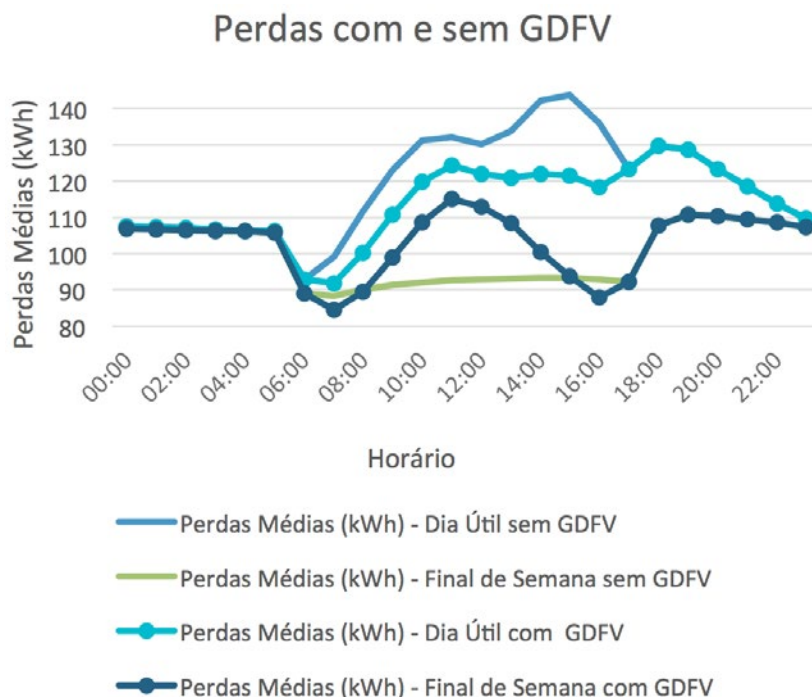


Figura 8. Perdas médias para dias úteis e finais de semana com e sem inserção de GDFV

Portanto, o aproveitamento do telhado dos prédios da UnB seria capaz de fornecer 71,28% da energia consumida em um dia útil e 104,52% nos finais de semana. O menor nível de penetração nos dias úteis e o consequente menor distúrbio gerado no fluxo de potência garantem que não haja sobretensões nesses dias. Entretanto, observou-se que as tensões em alguns pontos foram muito próximas do valor limite, 1,05 pu. Para os finais de semana, a potência excedente ocasionou aumentos de tensão acima do limite. Desse modo, medidas de controle, tais como a redução da tensão na subestação ou a mudança na derivação dos enrolamentos (*tap*) dos transformadores são sugeridas para controlar as tensões durante os dias úteis. Para mitigar a sobretensão durante os finais de semana, podem-se utilizar inversores que operem nos quatro quadrantes, permitindo ajustes no balanço da potência ativa e reativa, controlando os níveis de tensão. Em relação ao aumento nas perdas técnicas, pode-se adotar a utilização de acumuladores de energia, tais como baterias, conectados em locais próximos às barras onde a GDFV estiver instalada, diminuindo a corrente que flui pelo circuito e, consequentemente, reduzindo as perdas.

Outra iniciativa para mitigar os problemas identificados é a desconexão de alguns módulos fotovoltaicos durante os horários em que as sobretensões são evidentes. Desse modo, a potência produzida pela GDFV seria momentaneamente reduzida; e os impactos ao sistema de distribuição, mitigados. No caso estudado, por exemplo, todos os geradores distribuídos poderiam ser desconectados nos horários em que há sobretensões, das 9 às 14 horas aos finais de semana, com exceção dos maiores geradores, instalados no ICC. De outro modo, a desconexão dos módulos fotovoltaicos poderia ser otimizada por meio da utilização de um sistema de controle, permitindo a máxima geração de potência possível, levando-se em consideração o posicionamento das barras, sem que houvesse extrapolação nos limites de tensão. Outros cenários estão disponíveis em [20].

3.5 Conclusões do Alimentador da UnB

Partindo da análise das curvas de carga das unidades consumidoras e da determinação de um modelo do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, foi possível estudar os impactos da inserção de GDFV na rede de distribuição.

Devido à diversidade das instalações da Universidade, há várias curvas de carga, pois elas são influenciadas pelo modo como os prédios são utilizados. Notou-se que a curva de carga do medidor geral possui pico de consumo às 15 horas, horário em que há grande utilização dos aparelhos de ar-condicionado. Já aos finais de semana, o pico de consumo é reduzido, e o momento de acionamento da iluminação pública é evidente. O sistema não extrapolou nenhum dos limites técnicos no cenário 1, em que não havia inserção da GDFV na Universidade de Brasília, e a maior tensão registrada ocorreu na subestação. O prédio do CESPE, devido à sua localização distante do ramal de entrada, apresentou as menores tensões.

Depois de estudado o desempenho da rede de distribuição em situação normal de operação, considerou-se um cenário mais severo, com os telhados de oito unidades consumidoras sendo utilizados para a instalação de painéis fotovoltaicos, totalizando 6.171,08 m² de área útil, e irradiação solar 55% acima da média histórica. Assim, a GDFV forneceria 47.003,23 kWh diários ao sistema elétrico da Universidade com potência de pico igual a 3.973,40 kW. Como consequência, os níveis de penetração atingiram 71,28% nos dias úteis e 104,52% durante os finais de semana. A demanda geral do campus sofre uma redução expressiva nos dias úteis, em especial às 11 horas, quando ocorre a reversão no fluxo de potência. Nesse horário, a Universidade deixa de consumir 3.424,48 kW para fornecer 1.606,52 kW à distribuidora, mas os limites técnicos não foram extrapolados. Já aos finais de semana, devido ao fluxo reverso nos horários de pico da produção da GDFV, apresentando máximo igual a 3.252,33 kW, às 11 horas, os limites técnicos foram extrapolados das 9 às 14 horas. Além disso, o fluxo reverso aumentou as perdas técnicas, diminuindo a eficiência do sistema de 94,674% para 89,556%.

Uma medida corretiva simples para o controle das sobretensões é a desconexão de alguns dos geradores distribuídos durante os horários citados. Assim, a redução da GDFV ocorreria em apenas 2,98% do tempo (10 horas a cada semana) o que, provavelmente, manteria a viabilidade econômica do projeto e não demandaria investimentos excessivos para controle das tensões.

4. ESTUDO DE CASO 2: ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DAS PERDAS TÉCNICAS EM UM ALIMENTADOR DA CEB-DIS.

Este estudo tem como objetivo propor um método que considere a localização da Geração Distribuída Fotovoltaica em um alimentador para o cálculo das perdas técnicas, uma vez que a identificação de qual unidade consumidora instalará a GD não é uma premissa conhecida, mas que pode ser abordada probabilisticamente para permitir os estudos de perdas e planejar, se necessário, reforços nos alimentadores de distribuição.

4.1 Metodologia Utilizada

O método proposto tem como objetivo a implementação de um algoritmo que visa quantificar a influência da localização de GDFV no tangente às perdas técnicas do alimentador, bem como o comportamento dessas perdas até atingir 50% de penetração. O algoritmo define 300 possíveis cenários de localização de GDFV para cada nível de penetração, tornando possível uma visualização do quanto as perdas técnicas são impactadas em cada cenário, bem como o esforço computacional necessário para que se possa fazer um planejamento de rede de maneira eficiente. A escolha para 300 cenários se dá como um número inicial, tendo em vista que, caso haja necessidade, este número poderia ter sido aumentado para verificação de qual é o número ideal de pontos para que haja convergência nas condições simuladas. Neste estudo, 300 foi suficiente, sendo que estes contemplam configurações diferentes de localização de GDFV na rede elétrica, de maneira que no final se possa ter uma avaliação quantitativa da influência destas mudanças nas perdas técnicas do alimentador. O método perpassa pelo cálculo do fluxo de potência do alimentador para cada uma das configurações de localização simuladas, tendo como saída as perdas técnicas para cada cenário. Para realização do estudo de fluxo de carga, é necessário que se modele o alimentador, as curvas de carga e a curva de irradiância. Em função disso, antes da apresentação dos algoritmos, é necessário expor as condições de contorno utilizadas.

4.2 Condições de Contorno

O modelo adotado para as cargas é o ZIP. Dessa forma, as cargas são modeladas com 100% de impedância constante para parcela reativa e 50% potência constante e 50% impedância constante para a parcela ativa. Este modelo é o utilizado nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição. A potência de GDFV injetada por cada Unidade Consumidora (UC) tem fator de potência unitário e é calculada segundo (2).

$$GDFV = \frac{CMA * K}{E_F * \eta_{dias} * IRR} \quad (2)$$

Onde:

- $GDFV$ = Potência GDFV alocada (kW);
- CMA = Consumo médio anual (kWh);
- K = Constante solar na superfície terrestre, definido em 1 kWh/m²;
- E_F = Eficiência do sistema de geração (%), definido em 80%;
- η_{dias} = Número de dias do mês (dias), definido em 30 dias; e
- IRR = Integral da radiação solar ao longo do dia (kWh/m²/dia), tendo como valor típico de Brasília 5,422.

A curva de carga e irradiância são fixas para todos os cenários simulados, e foi considerado que todas as UCs têm área disponível para instalação de GDFV. A potência gerada pela UC é limitada à potência máxima disponibilizada pelo disjuntor de proteção. Foi definido nível de penetração como sendo uma fração da potência que todas as UCs do alimentador podem gerar.

4.3 Algoritmos

O método para avaliação da influência da localização da GDFV nas perdas técnicas do alimentador pode ser subdividido na aplicação de três principais laços: o do nível de penetração, dos cenários e o das horas. O algoritmo começa a partir do laço do nível de penetração, que tem como entradas o nível de penetração inicial e o final. Os níveis variam entre 0% (caso sem GDFV) e 100% (caso com GDFV em todas as UCs), sendo incrementados em passos de 10%. Dessa forma, o algoritmo dispõe de 11 níveis para simulação. Neste trabalho, foi simulado do nível 1 (0% de GDFV) ao nível 6 (50% de GDFV). Após ter definido o nível de penetração inicial, se inicia a rotina dos cenários.

A rotina dos cenários tem como entradas o nível de penetração definido anteriormente, o número de cenários a serem desenhados, que para este estudo foi fixado em 300, e os dados das UCs. Esta rotina lista, de maneira aleatória, as UCs e em seguida as seleciona até que a soma da potência de GDFV instalada no rol selecionado supere ou iguale o valor de potência referente ao nível de penetração predeterminado. Neste momento, esse rol é definido como um possível cenário. Em seguida, uma nova listagem aleatória das unidades consumidoras é executada; a seleção e definição do cenário é realizada de maneira iterativa, até que se tenha o número de possibilidades desejado. Após se terem todos os cenários definidos, se inicia a rotina das horas para cada um deles.

O laço das horas tem como entradas a curva de irradiância, a curva de carga e a relação de UCs que receberão GDFV definidas na rotina anterior. Com base na leitura destes valores, a rotina define o quanto será injetado ou consumido por cada UC e calcula o fluxo de potência para a hora em questão; isso se repete até as 23 horas onde se finaliza a simulação do dia e do cenário selecionados. Ao fim da simulação, são armazenados os valores de perdas, por hora, daquele dia e cenário em questão. Este laço se repete até que todos os 300 cenários predeterminados na rotina anterior tenham sido simulados.

4.3 Características do Alimentador

O alimentador onde foi empregado o método descrito é o 1004 da Companhia Energética de Brasília (CEB), pertencente à subestação 10 da CEB, composta por oito alimentadores. A escolha se deu por este possuir um perfil predominantemente residencial e por alimentar uma região de maior poder aquisitivo. A combinação destas características torna este alimentador propício para a instalação de GDFV. Conforme é explicitado na Figura 9, o alimentador se localiza numa região residencial, de alta concentração. Este alimentador é composto por 1.625 unidades consumidoras e um total de 3.735 barras, sendo 747 de média tensão e 2.987 de baixa tensão.



Figura 9. Alimentador considerado na simulação

4.5 Curva de Carga e Irradiância

As curvas de carga foram disponibilizadas pelo banco de dados da Aneel, sendo uma curva característica de dia útil, uma de sábado e uma de domingo para cada mês, totalizando 36 curvas. Logo, optou-se por empregar a curva característica de um dia útil de dezembro, ilustrada na Figura 10, por esta melhor representar a realidade das unidades consumidoras e representar a curva da mesma estação do dia escolhido para a irradiância.

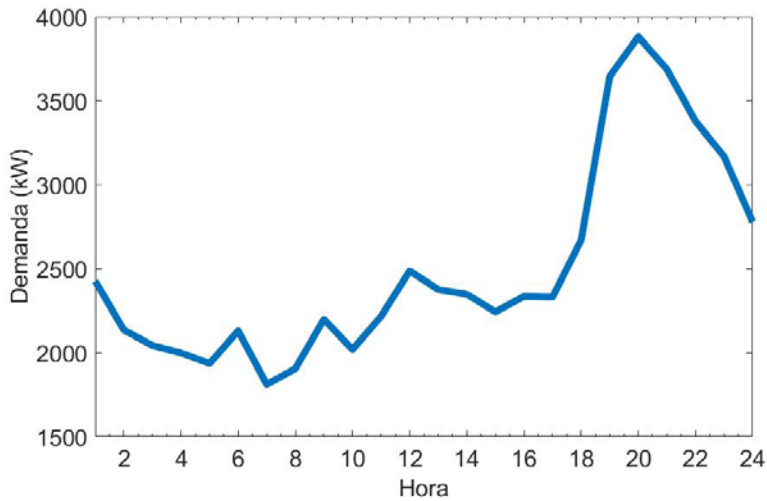


Figura 10. Curva de demanda de dia útil de dezembro

Os valores de irradiância utilizados são referentes ao ano de 2016 e foram extraídos a partir das medições realizadas pela Estação Brasília do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados passaram por um tratamento para exclusão de valores incoerentes. A curva de irradiância escolhida foi a referente ao dia que apresentou maior irradiância média ao longo do ano de 2016, dia 08 de janeiro de 2016. Esta escolha se deu para que se haja o caso mais severo de geração FV. A curva também reflete o horário brasileiro de verão, visto que registra irradiância até horários mais tardios, como demonstrado na Figura 11.

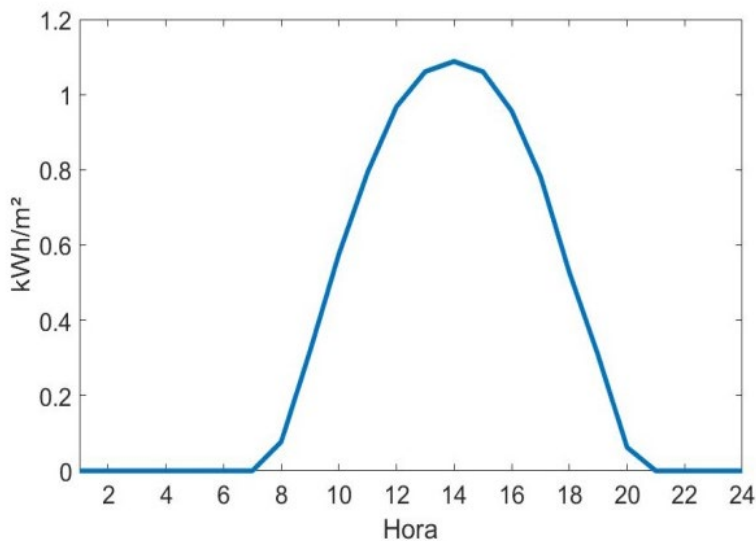


Figura 11. Curva de Irradiância

4.6 Resultados das Simulações

4.6.1 10% de penetração de GDFV

Neste tópico, é analisada a influência da localização da GDFV ao longo do alimentador ao se manter constante o nível de penetração em 10%. A distribuição do valor acumulado de perdas técnicas ao longo do dia apresenta um comportamento gaussiano conforme ilustrado na Figura 12. A partir disso, é possível utilizar a média da amostra como valor para convergência. Também é exposto que o valor mais frequente de perda acumulada para este nível de penetração varia entre 2.570 kWh e 2.575 kWh. No pior cenário simulado, a perda acumulada chega entre 2.605 e 2.610 kWh para este nível de penetração.

Este cenário ocorre quando as unidades em que foi alocada a GDFV estejam muito próximas umas das outras e, conseqüentemente, nos momentos de excesso de geração, a carga a ser suprida estaria mais distante, e desta forma, aumentam-se as perdas. No entanto, o valor das perdas está entre 2.545 e 2.550 kWh. Isto consiste em um cenário onde as UCs que recebem GDFV estão mais distantes entre si, assim, no momento de geração excedente, a carga suprida está sempre próxima.

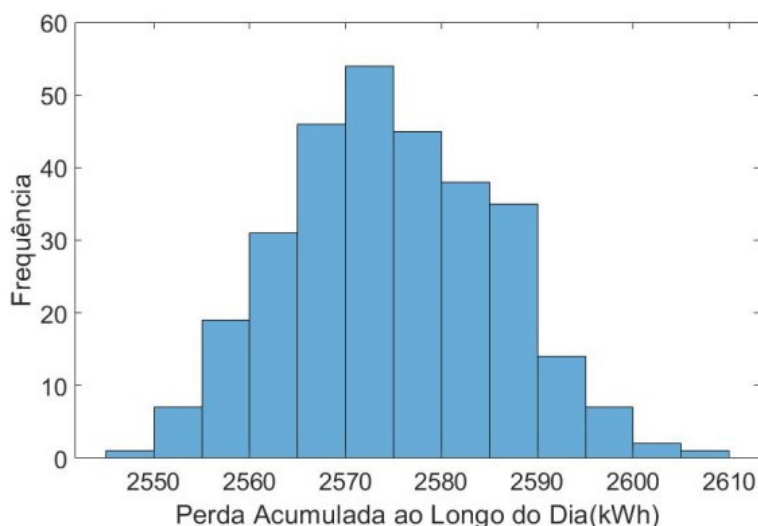


Figura 12. Histograma de perda acumulada ao longo do dia para 10% de penetração

É exposto o comparativo entre o cenário sem GDFV e a média dos cenários com 10% de integração na rede. Ao analisar a Figura 13, as perdas horárias se iniciam iguais, porém, conforme começa a se ter geração FV, as perdas diminuem, visto que parte da carga passa a ser suprida localmente, diminuindo a corrente circulante pelos condutores e, conseqüentemente, as perdas. Logo, para o alimentador, este nível de penetração não traz nenhum prejuízo e só beneficia a rede no que tange ao aspecto das perdas técnicas.

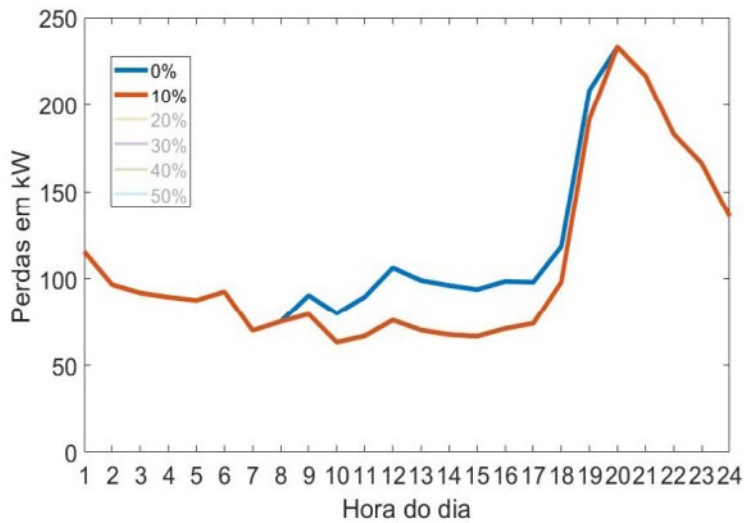


Figura 13. Perdas por hora

4.6.2 20% de penetração de GDFV

Para o nível de penetração de 20%, a distribuição do valor acumulado de perdas ainda se mostra próxima de uma normal, porém há um acúmulo maior de casos na faixa de 2.410 a 2.440 kWh. Esta maior concentração nos valores centrais torna a frequência dos extremos baixa e até mesmo descontínua entre 2.455 e 2.460 kWh. Ao se comparar o valor obtido para o pior caso com 20% de GDFV, este valor ainda é inferior ao melhor caso da perda acumulada diária para 10% de penetração. Uma possível interpretação é que, independentemente da localização da GDFV, 20% de penetração é melhor para a rede do que 10% no tangente a perdas. Isto é observável na Figura 14.

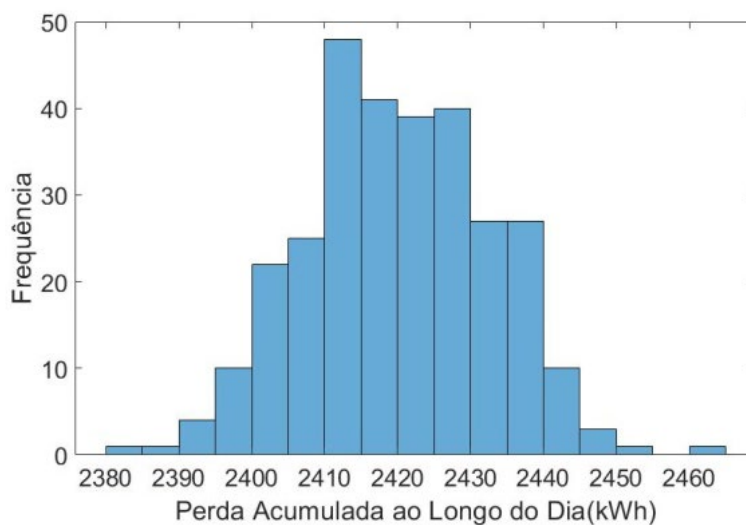


Figura 14. Histograma de perda acumulada ao longo do dia para 20% de penetração

A Figura 15 evidencia que um panorama onde se têm 20% de penetração de GDFV tem maior capacidade de suprir a demanda local da rede e, consequentemente, reduzir as perdas do que um cenário com 10% de integração FV. Algo a ser ressaltado é que as três curvas possuem o mesmo formato, e isso se dá por elas serem um reflexo da curva de demanda. Nos momentos de maior utilização da rede, mesmo nestes níveis de penetração, as perdas tendem a aumentar devido à maior corrente circulante nos condutores. Destaca-se também a maior redução nos horários de maior irradiância solar, aumentando as distâncias entre as curvas, fato derivado da geração FV ser proporcional à irradiância.

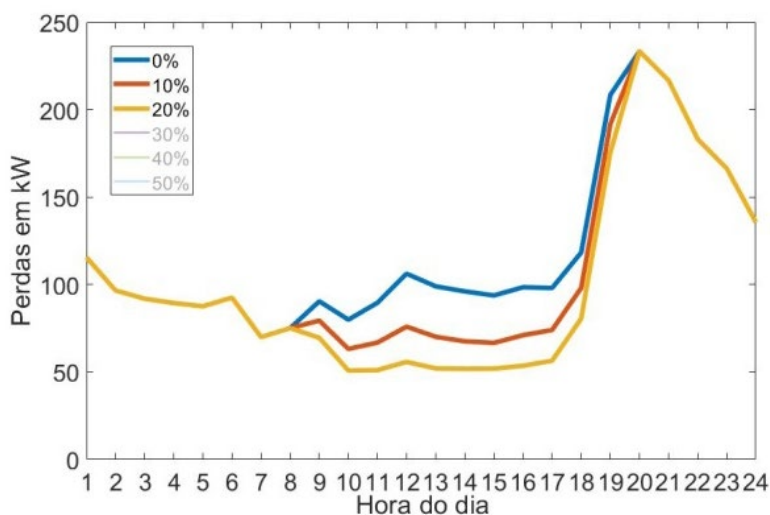


Figura 15. Perdas por hora

4.6.3 30% de penetração de GDFV

É demonstrado na Figura 16 que a distribuição dos valores não pode mais ser considerada normal, tendo uma grande concentração na faixa entre 2.350 e 2.390 kWh. Dessa forma, é possível concluir que, para o cenário com 30% de penetração FV, a grande maioria dos casos tende a recair sobre esta faixa para este alimentador. Ressalta-se que, no pior cenário possível, para este alimentador já recai em valores em faixas iguais aos valores centrais do caso com 20% de integração de GDFV. Isso expõe que, no tocante às perdas, a depender da localização das UCs com GDFV, estas podem aumentar em relação ao nível de penetração anterior.

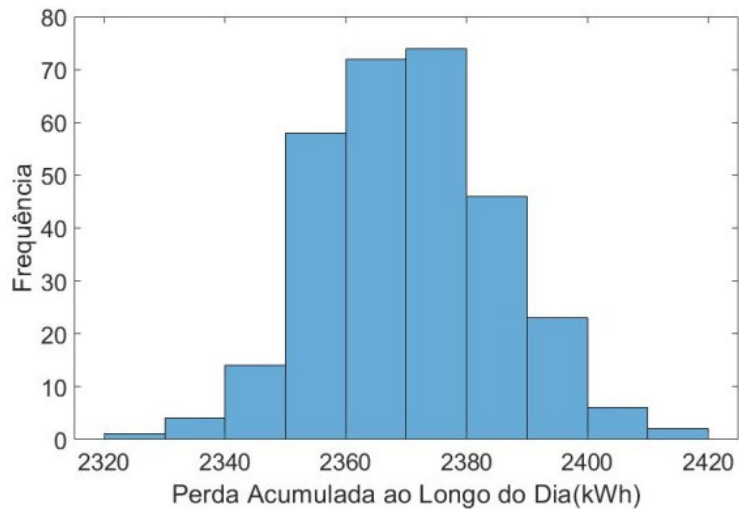


Figura 16. Histograma de perda acumulada ao longo do dia

O perfil das perdas, ilustrado na Figura 17, a princípio tende a ser menor que o do nível de integração FV anterior, porém no horário de sol a pico e, consequentemente, maior geração FV, os valores de perda horária superam os de 20% de integração FV. Isso é explicado pelo fato de que o horário de pico de geração não coincide com o de pico de carga. Dessa forma, ao se ter maior excedente e mais unidades geradoras, a GDFV passa a suprir maior parte da carga, porém com uma distância maior e, consequentemente, com uma perda maior que o do nível de penetração anterior, porém menor que a perda do panorama sem GD.

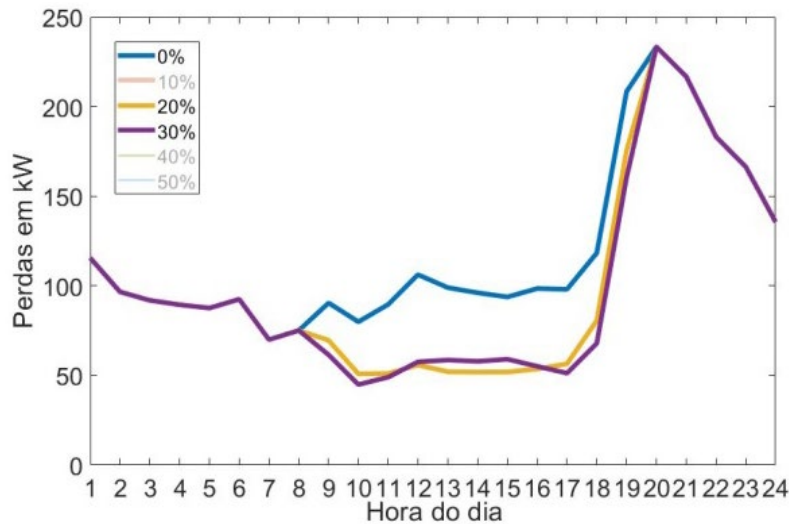


Figura 17. Perdas por hora

4.6.4 40% de penetração de GDFV

A Figura 18 explicita um perfil de distribuição menos concentrado que o nível de penetração de 30% e mais próximo de uma distribuição normal. Ressalta-se que a faixa de valores para o caso de menor perda para o panorama com 40% de GDFV se encontra em uma das faixas de maior incidência para o caso de 30% de integração FV. Isso demonstra que o aumento do nível de penetração tem deixado de diminuir as perdas no alimentador em relação ao nível de penetração anterior.

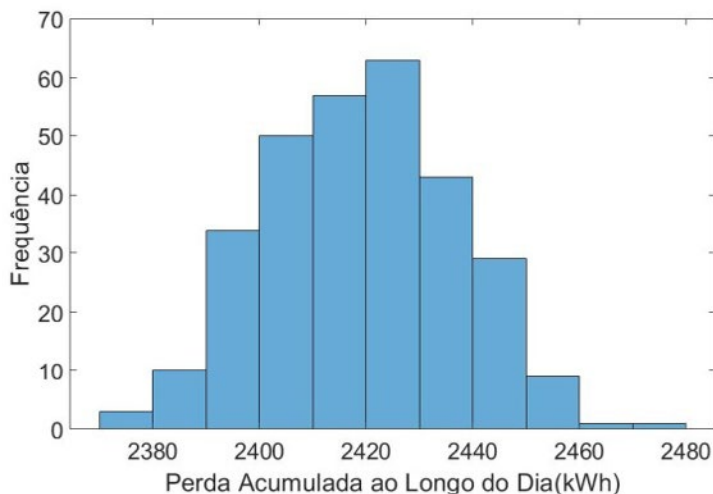


Figura 18. Histograma de perda acumulada ao longo do dia

A Figura 19 explicita o aumento das perdas nos horários de maior irradiância solar. Este fenômeno ocorre pelo aumento do número de unidades geradoras e, consequentemente, da geração excedente nestes horários. Dessa forma, é injetada mais corrente na rede para suprir as cargas e isto eleva as perdas da rede. No entanto, ainda não há ultrapassagem do valor de perda para o caso sem GDFV. Sendo assim, 40% de penetração ainda beneficia a rede no que tange às perdas técnicas.

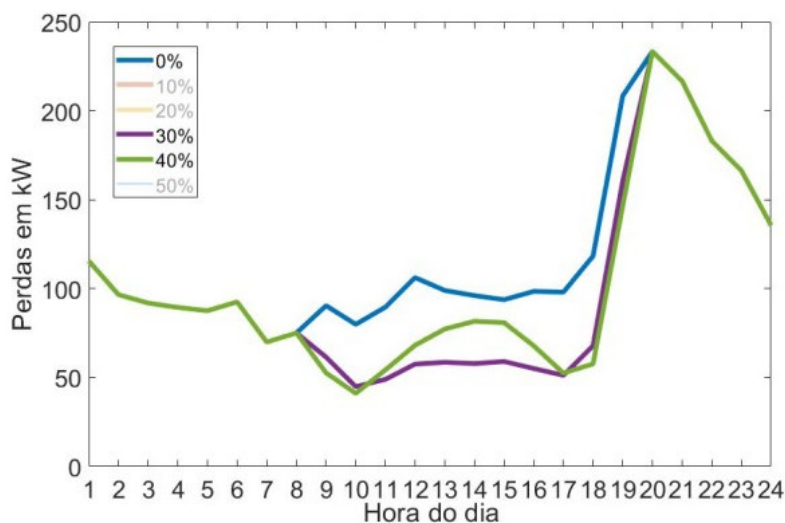


Figura 19. Perdas por hora

4.6.5 50% de penetração de GDFV

Para o nível de penetração de 50%, a distribuição é majoritariamente concentrada entre 2.500 e 2.650 kWh, como demonstrado na Figura 20, tendo o restante dos valores dispersos de maneira discreta. A faixa de valores de maior frequência contempla valores de perda diária maiores que o pior cenário de 10%, demonstrando que, ao se chegar em 50% de penetração, o alimentador pode chegar a um cenário pior do que com 10%.

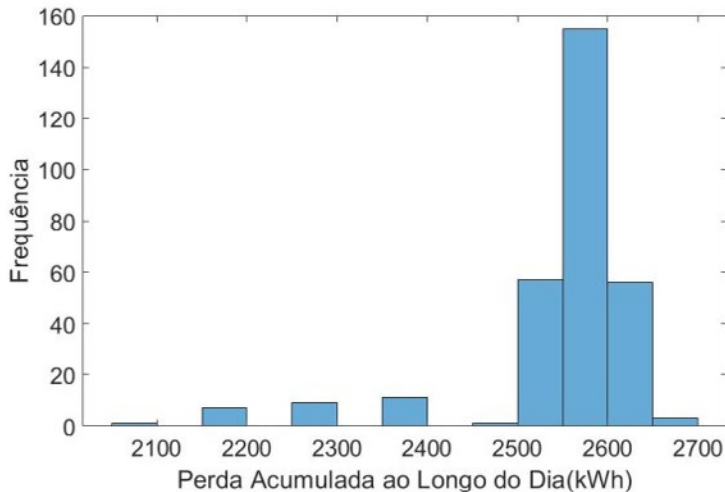


Figura 20. Histograma de perda acumulada ao longo do dia

Ao se analisar comparativamente as curvas de perdas, presentes na Figura 21, tem-se, em um cenário com 50% de penetração, uma situação crítica entre 12 e 16 horas, com um valor de perda técnica superior ao do caso base sem GDFV. Esse fenômeno pode ser explicado pela inversão do fluxo de potência, situação em que há mais geração do que carga nos ramais de distribuição, e o fluxo passa a fluir da carga em direção à subestação, gerando maior corrente circulante nos condutores e, conseqüentemente, aumentando as perdas técnicas.

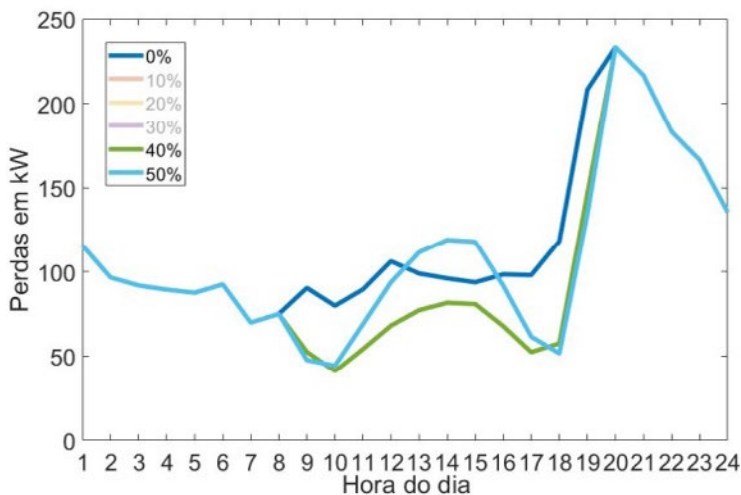


Figura 21. Perdas por hora

4.6.6 Análise conjunta dos níveis de penetração

Após uma análise pormenorizada dos níveis de penetração, se faz necessária uma análise conjunta dos níveis de penetração para caracterizar com maior exatidão o comportamento do alimentador perante eles, no que se refere às perdas técnicas. Na Figura 22 tem-se a discrepância percentual para cada nível de penetração em relação à localização da UC com GDFV. Ao se analisar a Figura 22, percebe-se que, à medida que o nível de penetração FV cresce, a importância da localização aumenta. Isso se deve ao fato de que, ao se aumentar a penetração, cresce também a possibilidade de ter uma aglomeração de UCs com GDFV instalada, dessa forma elevando o risco de um fluxo reverso de potência. A partir da figura, se conclui que, ao admitir uma taxa de discrepância de até 6%, a localização de GDFV não possui grande influência no que tange às perdas técnicas da rede.

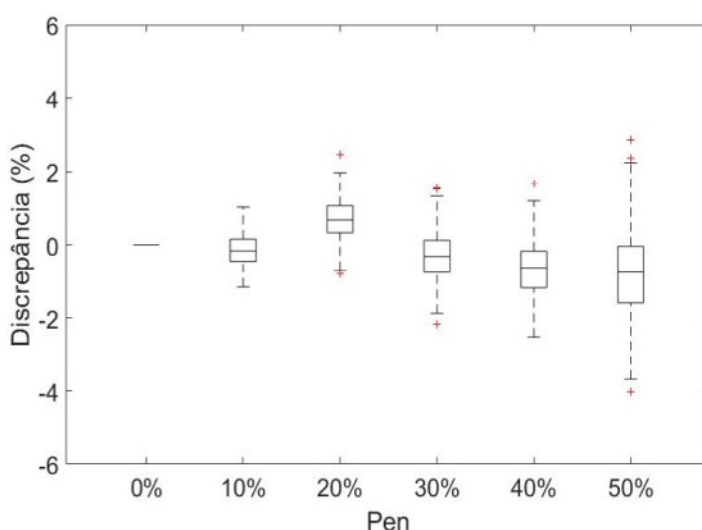


Figura 22. Discrepância por variação de localização

No que tange ao comportamento das perdas ao se incrementar a penetração FV na rede, a Figura 23 demonstra as faixas de redução de perdas para cada nível de penetração. A partir da figura, é observável que as perdas tendem a diminuir até 30%, e logo após voltar a crescer. Ao se analisar cada *boxplot* individualmente, é observável que a amplitude de cada um deles é crescente concomitantemente com o nível de penetração. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da influência da localização da GDFV nas perdas. A característica crescente da amplitude dos *boxplots* também demonstra que, para um mesmo nível de penetração, pode haver uma disparidade mais acentuada em relação ao seu efeito nas perdas. Isso pode ser exemplificado bem ao se observar o caso de 50% de penetração, onde cenários diferentes podem gerar um impacto de até 5% para mais ou para menos nas perdas.

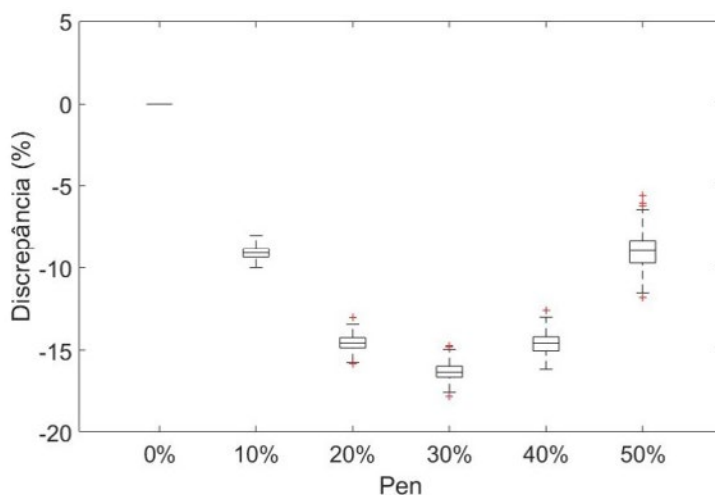


Figura 23. Discrepância em relação às perdas base

4.7 Conclusões do Alimentador da CEB-DIS

A partir dos resultados demonstrados anteriormente, é razoável caracterizar o Alimentador 1004 em relação à faixa de penetração FV compreendida entre 10% e 50%, bem como prever um comportamento para as perdas nos demais níveis de penetração. Para as faixas de penetração compreendidas entre 10% e 30%, pode-se concluir que para o 1004 as perdas diminuem de maneira concomitante ao aumento do nível de penetração compreendido entre estas faixas, independentemente do cenário de localização de GDFV.

Para o alimentador em questão, pode-se concluir também que 30% é o ponto mínimo da curva de perdas, sendo que, a partir desse valor, as perdas tendem a aumentar de maneira concomitante com o nível de penetração. Para um cenário com 50% de integração FV, o alimentador em questão já possui, durante o período de maior insolação, valores de perda superiores aos sem nenhuma integração FV.

Com base no comportamento das perdas observado, pode-se concluir que o comportamento dos valores de penetração FV acima de 50% deve se manter crescente e se faça necessária uma melhoria de rede.

Tendo como base os resultados obtidos, a relevância da localização para as perdas é crescente de maneira simultânea com a integração de GDFV na rede. Dessa forma, se conclui que, conforme mais UCs passem a instalar GDFV, o estudo acerca da distribuição espacial destas novas instalações se torna cada vez mais necessário de maneira a antever possíveis problemas na rede. O estudo completo do alimentador está disponível em [21].

5. METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS TÉCNICOS EM ALIMENTADORES REAIS

Esta seção propõe uma metodologia para identificar os impactos técnicos que a integração de GDFV causa nas tensões, perdas técnicas e demanda de pico do sistema de distribuição de uma concessionária de energia elétrica. Nesse sentido, o capítulo é dividido em:

- i. cálculo da potência dos sistemas fotovoltaicos e dos níveis de penetração; e
- ii. forma de quantificação dos impactos técnicos que a integração de GDFV causa na rede elétrica.

5.1 Cálculo da Potência do Sistema Fotovoltaico

O tamanho da GDFV é calculado de acordo com o tipo de incentivo regulatório adotado. A regulamentação brasileira incentiva a instalação de sistemas fotovoltaicos com potência suficiente para compensar o consumo médio da unidade consumidora (UC) no final de um ano [22], [23].

A potência da GDFV baseada no consumo é determinada conforme (3).

$$GDFV_{UC} = \frac{CM * k}{PR * n_{dias} * Irr} \quad (3)$$

Onde:

- $GDFV_{UC}$: potência da GDFV de cada unidade consumidora (kW);
- CM : consumo médio mensal da unidade consumidora (kWh);
- k : constante solar na superfície terrestre¹;
- PR : *Performance Ratio*², representa a eficiência do sistema de geração (%);
- n_{dias} : número de dias em um mês (dias)³; e
- Irr : irradiação, definida como a integral da radiação solar ao longo do dia (kWh/m²/dia).

Uma vez definida a potência de cada unidade consumidora, passa-se então à determinação dos níveis de penetração.

1 A constante solar no limite da atmosfera terrestre é de 1,36 kW/m². O valor de 1 kW/m² geralmente é adotado e é um valor padrão da radiação na superfície terrestre utilizado para comparação de eficiência entre diferentes módulos solares fotovoltaicos.

2 Representa a eficiência do sistema como um todo, considerando-se perdas jônicas e perdas por temperatura, sombreamento e sujeira.

3 30 dias.

5.2 Níveis de Penetração

O nível de penetração de GDFV pode ser estabelecido de diferentes formas, dentre as quais destacam-se: (i) a relação entre a energia total gerada pelos sistemas solares fotovoltaicos (FV) e a energia total consumida pelas unidades consumidoras [kWh]; (ii) a relação entre a potência total dos geradores solares FV e a potência de pico do alimentador [kW]; (iii) a relação entre a potência total dos geradores solares FV e a carga mínima atendida pelo alimentador [kW] e; (iv) a relação entre a potência total dos geradores solares FV e a potência nominal do transformador ou do alimentador [kW] [1]. Neste capítulo, considera-se o nível de penetração como a relação entre a potência total dos geradores FV e a potência total em BT do alimentador em análise.

Para a determinação dos níveis de penetração em um alimentador, primeiramente calcula-se a potência FV de cada unidade consumidora ($GDFV_{UC}$), conforme descrito em (3). Em seguida, soma-se a potência de todas as UCs em BT do alimentador em estudo e determina-se a potência de GDFV que implicaria um nível de penetração de 100% ($GDFV_{Max}$).

De posse da $GDFV_{Max}$, determina-se a potência de GDFV a ser inserida em cada nível de penetração, de acordo com (4).

$$GDFV_{pen} = GDFV_{Max} * pen \quad (4)$$

Onde:

- $GDFV_{pen}$: potência de GDFV (em kW) a ser instalada nas diferentes unidades consumidoras do alimentador para que seja obtido um nível de penetração;
- pen : nível de penetração de GDFV (entre 0 e 100%); e
- $GDFV_{Max}$: potência de GDFV que resulta em 100% de penetração (kW).

Com a determinação dos níveis de penetração, devem-se calcular os impactos que a integração de GDFV pode provocar na rede de distribuição. A próxima seção exibe uma metodologia para o cálculo dos impactos na tensão, perdas técnicas e demanda de pico.

5.3 Determinação dos Impactos Técnicos da GDFV

O método proposto neste capítulo integra sistemas FV de acordo com a política de incentivo *net metering*, e objetiva identificar os impactos técnicos que a integração de Geração Distribuída causa nas tensões, perdas técnicas e demanda de pico de um sistema de distribuição de energia elétrica. Também são consideradas as incertezas relativas à radiação solar, temperatura e localização dos sistemas FV.

A Figura 24 exibe o fluxograma do método proposto e deve ser repetido para cada alimentador de uma distribuidora.

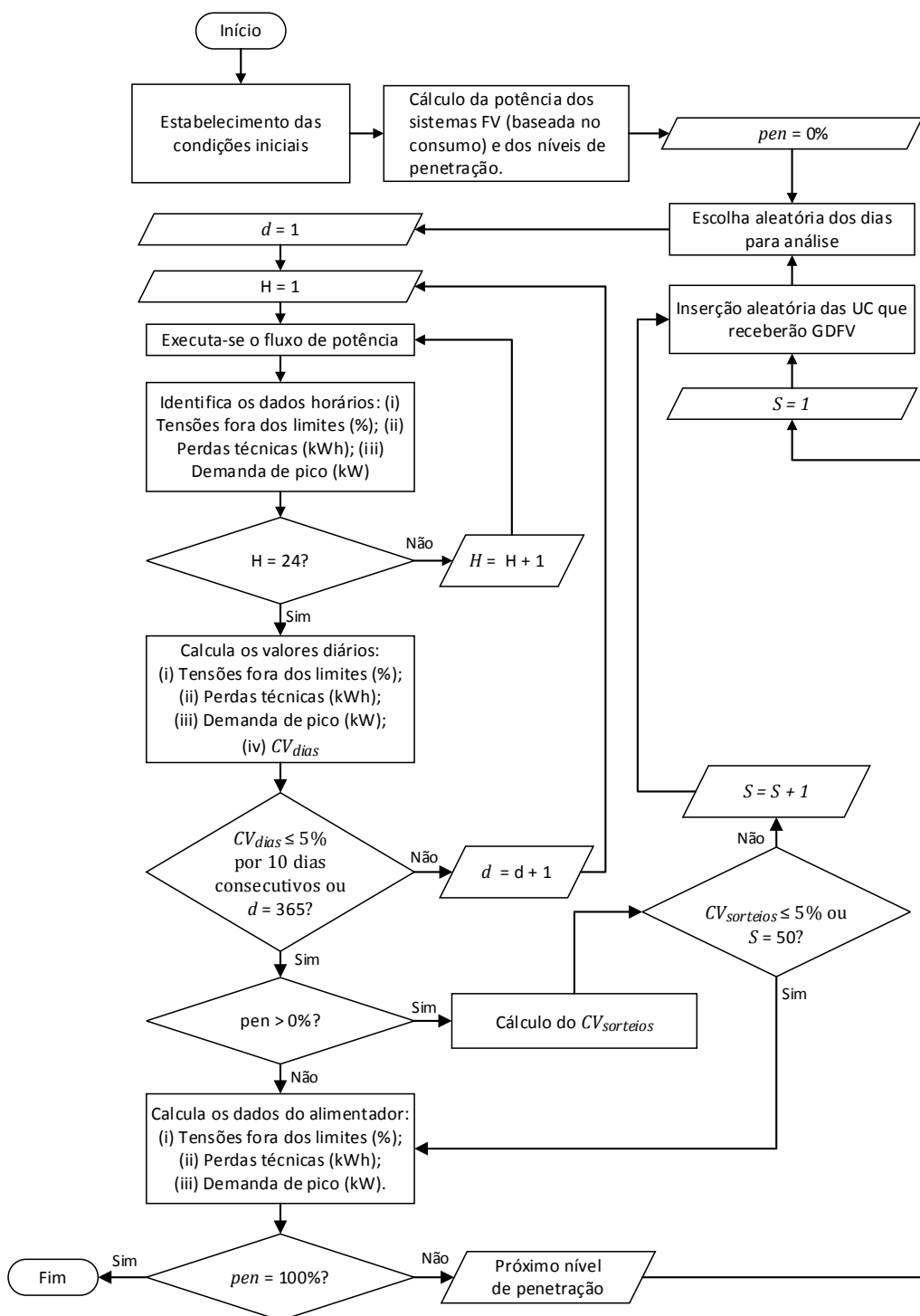


Figura 24. Fluxograma representativo do método para determinação dos impactos técnicos da integração de GDFV na rede elétrica

O método para determinação dos impactos técnicos da Figura 1 pode ser descrito da seguinte maneira:

- a. é feita a modelagem da rede elétrica e é calculada a potência do sistema fotovoltaico a ser instalado em cada unidade consumidora;
- b. em seguida, executa o fluxo de potência para a condição sem GDFV. É necessária a realização de simulações para vários dias, selecionados aleatoriamente, de forma a considerar a variação da curva de carga ao longo do ano. Para cada dia sorteado, o método executa o fluxo de potência para cada uma das 24 horas. Com o intuito de diminuir o tempo de processamento de dados, faz-se uso da medida do erro denominada Coeficiente de Variação (CV). Neste método, após a simulação mínima de 10 dias aleatórios, calcula-se o CV de cada uma das grandezas em análise. Enquanto cada um dos CVs das tensões, perdas técnicas e demanda de pico não for menor ou igual a 5%, continuam-se simulando novos dias selecionados aleatoriamente, até o limite máximo de 365 (1 ano). O cálculo do CV, considerando as incertezas dos dias simulados, é apresentado em detalhes na seção 5.4;
- c. após a simulação para o caso sem GDFV, é realizada uma primeira seleção aleatória das unidades consumidoras que instalarão os sistemas fotovoltaicos ($S = 1$). Um novo fluxo de potência é executado para vários dias selecionados aleatoriamente, de modo a considerar as incertezas relativas à radiação solar e temperatura dos sistemas FV;
- d. as incertezas relativas à localização da GDFV são contempladas por meio da simulação de vários sorteios da posição dos sistemas FV. Após o cálculo dos impactos técnicos da primeira seleção aleatória, os locais da instalação dos sistemas FV são alterados e um novo fluxo de potência é executado até que o CV seja menor que 5%. Um limite máximo de 50 diferentes localizações deve ser adotado; e
- e. após adquiridos os impactos nas tensões, perdas técnicas e demanda de pico para o primeiro alimentador, o procedimento ora descrito é novamente executado considerando-se um novo alimentador.

5.4 Simulações de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é baseado na execução de diversas amostragens aleatórias para se obterem dados numéricos, ou seja, um elevado número de simulações é realizado de forma a se determinarem todas as probabilidades de resultados possíveis. Esse método é utilizado como referência para se adquirirem aproximações numéricas em situações em que se empregam modelos analíticos para gerar resultados de fluxo de potência probabilístico [1], [24].

O número de simulações que devem ser executadas pode ser fixado ou determinado por meio de um critério estatístico de parada. Um dos critérios empregados para acompanhar esse procedimento de parada é o designado Coeficiente de Variação (CV), calculado conforme (5). Quando o CV for menor que um valor preestabelecido (normalmente entre 5% e 6%), as simulações são finalizadas [1], [24].

$$CV = \frac{\sigma}{\mu\sqrt{n}} \quad (5)$$

Onde:

- σ : desvio padrão dos valores analisados;
- μ : média dos valores analisados; e
- n : número de simulações realizadas.

Neste capítulo, segundo descrito anteriormente, para se considerarem as incertezas da radiação solar e temperatura ao longo do ano e, ainda, das diversas possibilidades de localizações da GDFV, adota-se o CV para se calcular o número de dias a serem simulados, e a quantidade de possíveis localizações de inserção dos sistemas FV. As simulações são realizadas até que um CV menor que 5% seja atingido para cada uma das variáveis em análise.

5.5 Quantificação dos Impactos Técnicos

A seguir, são apresentados os indicadores empregados no presente capítulo para calcular os impactos técnicos decorrentes da integração de GDFV na rede elétrica.

5.5.1 Tensões

O impacto da integração de GDFV nos níveis de tensão das barras presentes em um alimentador pode ser calculado com base na quantidade de tensões fora dos limites estabelecidos em norma. No Brasil, a Aneel institui, mediante o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), os níveis adequados para a tensão em regime permanente no ponto de conexão das UCs [25]. Para as redes em baixa tensão, esses limites são apresentados em valores absolutos. Por exemplo, para uma tensão de atendimento de 220 V, a faixa de variação tomada como adequada está entre 202 V e 231 V. Transformando estes limites em pu, tendo como base o valor igual a 220 V, tem-se que tensões abaixo de 0,92 pu ou acima de 1,05 pu são consideradas fora dos limites estabelecidos como adequados.

Para se obter a porcentagem média de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados em um determinado nível de penetração (V_{pen}) do alimentador em análise, primeiramente calcula-se V_h [%]. Ele representa o número de fases que possuem tensões fora dos limites estabelecidos como adequados em relação ao número total de fases dos barramentos do alimentador. Este indicador é obtido de acordo com (6). Cabe destacar que os barramentos podem ser trifásicos (fases = 3), bifásicos (fases = 2) ou monofásicos (fases = 1).

$$V_h = \frac{N_{OUT}}{N} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

- N_{OUT} : número de fases do barramento em análise que possuem tensões fora dos limites estabelecidos como adequados; e
- N : número total de fases dos barramentos do alimentador em análise.

Uma vez adquirido o V_h de cada hora do dia, calcula-se o percentual médio horário de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados do alimentador para o dia simulado (V_{dia}), conforme (7).

$$V_{dia} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H V_h \quad (7)$$

Onde:

- V_{dia} : percentual médio horário de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados do alimentador para o dia simulado [%]; e
- H : número de horas simuladas.

Em seguida, calcula-se o percentual total de tensões fora dos limites do alimentador em análise (V_A) para todos os dias simulados, de acordo com (8). Para o cálculo do V_A , considera-se apenas um sorteio da posição das unidades consumidoras. O critério de parada das simulações depende do coeficiente de variação de dias ($CV_{V_{dia}}$), calculado segundo (9), ou seja, as simulações são executadas até que $CV_{V_{dia}} \leq 5\%$ por 10 simulações consecutivas. Cabe mencionar que a quantidade mínima de dias é igual a 10, e que o número máximo é igual a 365 (1 ano).

$$V_A = \frac{1}{d} \sum_{dia=1}^d V_{dia} \quad (8)$$

Onde:

- V_A : percentual médio horário de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados do alimentador para todos os dias simulados [%]; e
- d : número de dias simulados.

$$CV_{V_{dia}} = \frac{\sigma_{V_{dia}}}{\overline{V_{dia}} \times \sqrt{d}} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

- $\overline{V_{dia}}$: média dos V_{dia} calculados no período em análise; e
- $\sigma_{V_{dia}}$: desvio padrão dos V_{dia} .

Para o cálculo da porcentagem média de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados para o nível de penetração (V_{pen}) do alimentador em análise, utiliza-se (10). Vale destacar que no cálculo do V_{pen} consideram-se os vários sorteios de posições das unidades consumidoras. O critério de parada do número de sorteios depende do coeficiente de variação de sorteios ($CV_{V_{sorteios}}$) calculado conforme (11), ou seja, as simulações são executadas até que $CV_{V_{sorteios}} \leq 5\%$. Destaca-se que a quantidade máxima de sorteios deve ser igual a 50.

$$V_{pen} = \frac{1}{S} \sum_{S=1}^S V_A \quad (10)$$

$$CV_{V_{sorteios}} = \frac{\sigma_{V_A}}{\bar{V}_A \times \sqrt{S}} \times 100 [\%] \quad (11)$$

Onde:

- V_{pen} : percentual médio horário de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados para o nível de penetração do alimentador simulado [%];
- S : número de sorteios que definem as localizações das UCs;
- σ_{V_A} : desvio padrão dos V_A ; e
- $\bar{V}_A$: média dos V_A calculados.

De posse dos V_{pen} de cada nível de penetração em avaliação, é possível calcular a variação no perfil de tensões de atendimento do alimentador devido ao aumento da penetração de GDFV (ΔV_{pen}), segundo descrito em (12).

$$\Delta V_{pen} = V_{pen} - V_0 \quad (12)$$

Onde:

- ΔV_{pen} : variação no perfil de tensões de atendimento do alimentador em virtude do aumento da penetração de GDFV [p.p.]; e
- V_0 : percentual médio horário de tensões fora dos limites estabelecidos como adequados do alimentador sem GDFV (penetração igual a zero) [%].

5.5.2 Perdas

Para se obter o valor médio horário das perdas técnicas (em kWh) de um alimentador para um dado nível de penetração (L_{pen}), inicialmente calculam-se os valores médios horários das perdas técnicas de cada dia do alimentador (L_{dia}), de acordo com (13).

Em seguida, calculam-se as perdas técnicas do alimentador em análise (L_A) para todos os dias simulados, de acordo com (14). Para o cálculo do L_A , considera-se apenas um sorteio da posição das unidades consumidoras. O critério de parada das simulações depende do coeficiente de variação de dias ($CV_{L_{dia}}$), dado pela expressão (15). Na verdade, as simulações são executadas até que $CV_{L_{dia}} \leq 5\%$ por 10 dias consecutivos. Cabe destacar que a quantidade mínima de dias é igual a 10, e que o número máximo é igual a 365 (1 ano).

$$L_{dia} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H L_h \quad (13)$$

$$L_A = \frac{1}{d} \sum_{dia=1}^d L_{dia} \quad (14)$$

$$CV_{L_{dia}} = \frac{\sigma_{L_{dia}}}{\overline{L_{dia}}} \times 100 [\%] \quad (15)$$

Onde:

- L_h : perda técnica horária;
- L_{dia} : média horária das perdas técnicas no alimentador em análise para o dia simulado [kWh];
- H : número de horas simuladas;
- L_A : média horária das perdas técnicas do alimentador para todos os dias simulados [kWh];
- d : número de dias simulados;
- $\sigma_{L_{dia}}$: desvio padrão dos L_A ; e
- $\overline{L_{dia}}$: média dos L_A calculados.

Para se calcular o L_{pen} , expressão (16), são considerados os resultados de vários sorteios de posições das UCs. O critério de parada do número de sorteios depende do coeficiente de variação de sorteios ($CV_{L_{sorteios}}$) calculado de acordo com (17), ou seja, as simulações são executadas até que $CV_{L_{sorteios}} \leq 5\%$. Destaca-se que a quantidade máxima de sorteios deve ser igual a 50.

$$L_{pen} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S L_A \quad (16)$$

$$CV_{L_{sorteios}} = \frac{\sigma_{L_A}}{\overline{L_A}} \times 100 [\%] \quad (17)$$

Onde:

- L_{pen} : perdas técnicas médias horárias do alimentador no nível de penetração [kWh];
- S : número de sorteios que definem as localizações das UCs;
- $\overline{L_A}$: média dos L_A calculados; e
- σ_{L_A} : desvio padrão dos L_A .

Com o valor do L_{pen} de cada cenário e para cada nível de penetração, é possível determinar a variação nas perdas médias horárias do alimentador em virtude da integração de GDFV (ΔL_{pen}), conforme (18).

$$\Delta L_{pen} = \frac{L_{pen} - L_0}{L_0} \times 100 \quad (18)$$

Onde:

- ΔL_{pen} : variação dos valores médios horários das perdas técnicas devido à integração de GDFV para um determinado nível de penetração do alimentador simulado [%]; e
- L_0 : média horária das perdas técnicas do alimentador sem GDFV (penetração igual a zero) [kWh].

5.5.3 Demanda de pico

Para se calcular a demanda de pico de um alimentador para um determinado nível de penetração (D_{pen}), inicialmente calcula-se a demanda de pico em cada hora do dia (D_h). Com os módulos dos valores horários, calcula-se a demanda de pico com probabilidade de 95% de não ser excedida (D_{dia}) em [kW], de acordo com (19).

$$D_{dia} = |(D_h)|_{95\%} \quad (19)$$

A demanda de pico do alimentador (D_A), em kW, corresponde ao maior valor de $D_{95\%}$, considerando-se todos os dias simulados. Neste caso, faz-se uso de um único sorteio de posições das UCs. O critério de parada das simulações depende do coeficiente de variação de dias ($CV_{D_{dia}}$), dado por (20). Na verdade, as simulações são executadas até que $CV_{D_{dia}} \leq 5\%$ por 10 dias consecutivos. Cabe destacar que a quantidade mínima de dias é igual a 10, e que o número máximo é igual a 365 (1 ano).

$$CV_{D_{dia}} = \frac{\sigma_{D_{dia}}}{D_{dia} \times \sqrt{d}} \times 100 [\%] \quad (20)$$

Onde:

- D_{dia} : demanda de pico do alimentador em análise para o dia simulado [kW] com probabilidade de 95% de não ser excedida;
- D_A : demanda de pico do alimentador em [kW] correspondente ao maior valor considerando-se todos os dias simulados;
- $\sigma_{D_{dia}}$: desvio padrão dos D_A ; e
- $\bar{D}_{dia}$: média dos D_A calculados.

A demanda de pico do alimentador (D_{pen}) em [kW] de um determinado nível de penetração corresponde ao maior valor entre os D_A calculados considerando vários sorteios de posições das UCs. O critério de parada do número de sorteios depende do coeficiente de variação de sorteios ($CV_{D_{sorteios}}$) calculado conforme (21), ou seja, as simulações são executadas até que $CV_{D_{sorteios}} \leq 5\%$. Destaca-se que a quantidade máxima de sorteios deve ser igual a 50.

$$CV_{D_{sorteios}} = \frac{\sigma_{D_A}}{\bar{D}_A \times \sqrt{S}} \times 100 [\%] \quad (21)$$

Onde:

- σ_{D_A} : desvio padrão dos D_A ;
- $\bar{D}_A$: média dos D_A calculados; e
- S : número de sorteios que definem as localizações das UC.

Com os valores de D_{pen} correspondentes a cada nível de penetração em avaliação, é possível calcular a variação da demanda de pico do alimentador (ΔD_{pen}), em [%], em virtude do aumento da integração de GDFV, de acordo com o descrito em (22).

$$\Delta D_{pen} = \frac{D_{pen} - D_0}{D_0} \times 100 \quad (22)$$

Onde:

- D_0 : demanda de pico do alimentador sem GDFV (penetração igual a zero) [kW].

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método proposto demonstra, com fundamentos estatísticos, os procedimentos necessários para a quantificação dos impactos da GDFV em redes de distribuição de energia elétrica. Os dados da radiação solar, temperatura e os sistemas fotovoltaicos variam com base no método de Monte Carlo. A análise do comportamento dos impactos permite, entre outros aspectos, identificar os níveis de penetração nos quais os melhores benefícios são derivados da integração de GDFV à rede. O método proposto, robusto por considerar alimentadores com milhares de unidades consumidoras, e permitir lidar de forma probabilística com as incertezas sobre alocação da GD e a potência a ser instalada, é uma contribuição para o estudo dos impactos.

7. REFERÊNCIAS

- [1] VIEIRA, D. *Método para determinação do tipo de incentivo regulatório à geração distribuída solar fotovoltaica que potencializa seus benefícios técnicos na rede*. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2016.
- [2] COHEN, M. A.; CALLAWAY, D. S. *Effects of distributed PV generation on California's distribution system, Part 1: Engineering simulations*. Solar Energy, v. 128, pp. 126-138, 2016.
- [3] WESTACOTT, P.; CANDELISE, C. 2016. *Assessing the impacts of photovoltaic penetration across an entire low-voltage distribution network containing 1.5 million customers*. IET Renewable Power Generation, 10(4), pp.460-466.
- [4] EBAD, M.; GRADY, W. M. *An approach for assessing high-penetration PV impact on distribution feeders*. Electric Power Systems Research, v. 133, pp. 347-354, 2016.
- [5] CHENG, D. et al. *Photovoltaic (PV) impact assessment for very high penetration levels*. IEEE Journal of photovoltaics, v. 6, n. 1, pp. 295-300, 2016.
- [6] ADEFARATI, T.; BANSAL, R. C. *Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review*. IET Renewable Power Generation, v. 10, n. 7, pp. 873-884, 2016.
- [7] HUNG, D. Q.; MITHULANANTHAN, N.; LEE, K. Y. *Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 29, n. 6, pp. 3048-3057, 2014.

- [8] GOOP, J.; ODENBERGER, M.; JOHNSON, F. *Distributed solar and wind power—Impact on distribution losses*. Energy, v. 112, pp. 273-284, 2016.
- [9] AZZOPARDI, B.; GABRIEL-BUENAVENTURA, A. *Feasibility assessment for high penetration of distributed photovoltaics based on net demand planning*. Energy, v. 76, pp. 233-240, 2014.
- [10] KITWORAWUT, P. B.; AZUATALAM, D. T.; COLLIN, A. J. *An investigation into the technical impacts of microgeneration on UK-type LV distribution networks*. In: Power Engineering Conference (AUPEC), 2016 Australasian Universities. IEEE, 2016. pp. 1-5.
- [11] VERDELHO, M. I. *et al. Impact of PV distributed generation on EDP distribuição LV grid losses*. CIREOpen Access Proceedings Journal, v. 2017, n. 1, pp. 2342-2345, 2017.
- [12] BHAGAVATHY, S. *et al. Performance assessment of a three-phase distribution network with multiple residential single-phase PV systems*. CIREOpen Access Proceedings Journal, v. 2017, n. 1, pp. 2480-2483, 2017.
- [13] AZIZ, T.; KETJOY, N. *Enhancing PV Penetration in LV Networks Using Reactive Power Control and On Load Tap Changer With Existing Transformers*. IEEE Access, v. 6, pp. 2683-2691, 2018.
- [14] HAGHDADI, N. *et al. Impact of Distributed Photovoltaic Systems on Zone Substation Peak Demand*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 9, n. 2, pp. 621-629, 2018.
- [15] TORQUATO, R. *et al. A Comprehensive Assessment of PV Hosting Capacity on Low-Voltage Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 33, n. 2, pp. 1002-1012, 2018.
- [16] URBANETZ, J.; BRAUN, P.; RÜTHER, R. 2012. *Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil*. Energy Conversion and management, 64, pp.8-14.
- [17] CAMARGOS, R. S. C. *Análise técnica de impactos e limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em uma rede radial de distribuição - Estudo de caso para o alimentador da embaixada da Itália em Brasília*. Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 220, 2013.
- [18] SHAYANI, R. A. *Método para determinação do limite de penetração da geração distribuída fotovoltaica em redes radiais de distribuição*. Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 186, 2010, (Publicação PPGENE. TD - 051/10).
- [19] TERRAGIS CONSULTORIA. *Refinamento do mapeamento da área potencial de telhados de edificações*. TerraGIS Consultoria, Geoprocessamento e Geografia Aplicada Ltda. Rio de Janeiro, RJ, p. 67, 2014.
- [20] GREGORIO, J. V. (2017). *Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos*. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173p.
- [21] LEÃO, G. H. S. *Análise da sensibilidade das perdas técnicas em um alimentador de distribuição em função da localização da micro geração fotovoltaica*. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2019.
- [22] ANEEL, 2012. *Resolução Normativa n.º 482, de 17 de abril de 2012*. Brasília, DF, Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel.
- [23] ANEEL, 2015. *Resolução Normativa n.º 687, de 24 de novembro de 2015*. Brasília, DF, Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel.
- [24] PAREJA, L.A.G. *Fluxo de Potência em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Incertezas*. Tese de Doutorado. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita - UNESP, 2009.
- [25] ANEEL, 2018. *PRODIST – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. Revisão 10. Versão aprovada pela Resolução Normativa n.º 794/2017. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília, DF, Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel.

CAPÍTULO 12

Conclusões e Agenda Estratégica para Futuros Desenvolvimentos da Geração Distribuída no Brasil

Sergio de Oliveira Frontin



OBJETIVO

Apresentar as principais conclusões relacionadas aos temas que foram abordados nos capítulos anteriores e, ainda, apresentar uma agenda estratégica de temas promissores com vistas à pesquisa e desenvolvimento de futuros projetos que tenham como objetivo aprimorar as tecnologias que integram a implantação da Geração Distribuída (GD) no setor elétrico brasileiro.

1. INTRODUÇÃO

Os capítulos anteriores apresentaram as experiências na execução do Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de Pesquisa e Desenvolvimento no âmbito da Chamada Aneel n.º 001/2016. Neste contexto foram reportados os seguintes temas:

- Ações de Eficiência Energética em Edificações;
- Implantação de Sistema Solar Fotovoltaico;
- Experiências na Execução de Medição e Verificação de Performance de Ações de Eficiência Energética;
- Aspectos da Implantação de Sistema de Gestão Energética;
- Desenvolvimento de Cenários para o Planejamento da inserção da Geração Distribuída;
- Simulações em Tempo Real Envolvendo Geração Distribuída;
- Métodos de Redução de Circuitos para Simulação de Rede de Distribuição; e
- Quantificação dos Impactos Técnicos da Inserção de Fonte de Geração Fotovoltaica.

Este capítulo apresenta as principais conclusões apontadas pelos autores com relação a estes temas.

Ainda neste capítulo, serão apresentados os temas que se mostram promissores com vistas a futuros projetos de P&D, objetivando o aprimoramento da tecnologia da Geração Distribuída. A identificação dos temas promissores foi feita a partir da análise da integração da GD, com as seguintes áreas:

- planejamento;
- marcos regulatórios;
- metodologias, modelagem de componentes;
- ferramentas computacionais e laboratórios;
- impactos;
- redes inteligentes;
- proteção e controle;
- microrredes;
- armazenamento de energia;
- fontes de energia;
- mobilidade elétrica;
- tarifas; e
- novos negócios.

Este conjunto de temas, pode, assim, se constituir numa agenda estratégica para que as empresas possam se basear para o patrocínio de projetos de P&D na área de Geração Distribuída.

2. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

2.1 Experiências na Execução de Ações de Eficiência Energética na Universidade de Brasília

Em vista da necessidade de redução do consumo de energia elétrica dos prédios públicos e da importância de tornar as edificações mais sustentáveis e eficientes, foram apresentadas as características de estudos para subsidiar as ações de eficiência energética em dois prédios da Universidade de Brasília. O projeto contemplou a troca de equipamentos existentes, de baixa eficiência, por outros de maior eficiência, sendo realizada a substituição de 144 aparelhos de condicionamento de ar por equipamentos novos, com etiqueta PROCEL nível "A"; a substituição de 1.200 lâmpadas fluorescentes T8, em sua maioria com potência nominal de 32 W, por modelos LED T8 de 18 W e a troca de 350 unidades de lâmpadas fluorescentes T5, com potência nominal de 18 W, por modelos LED de 9 W. Tais ações atendem às premissas estabelecidas na Chamada Aneel n.º 001/2016, uma vez que eles possibilitaram a troca de equipamentos, incentivaram a mudança de hábitos de consumo de alunos, professores e funcionários, dentre outros aspectos.

Os resultados apresentados demonstram também o potencial que a simulação computacional possui na identificação do atual estado de consumo de energia das edificações, bem como a quantificação dos impactos de ações de eficiência energética.

2.2 Aspectos da Implantação de Sistema de Geração Solar Fotovoltaico na Universidade de Brasília

Foram apresentadas as experiências associadas à implantação de geração solar fotovoltaica de 150 kWp nos prédios da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, abrangendo as etapas de projeto básico e executivo, especificação, licitação e construção do sistema. Além dos aspectos anteriores, os resultados e as experiências adquiridas na execução desta instalação permitiram a definição de um conjunto de diretrizes que podem ser utilizadas durante o ciclo de vida do sistema e tendem a subsidiar o planejamento, elaboração de projeto executivo, implantação, operação, manutenção, *retrofitting* e desmonte/descarte de equipamentos.

2.3 Experiências na Execução de Medição e Verificação de Performance de Ações de Eficiência Energética (M&V)

Foram apresentadas as experiências associadas à execução de processos de medição e verificação de performance de ações de eficiência energética. Conforme identificado, a (M&V) consiste na aplicação de mecanismos metodológicos para determinar, de modo seguro e confiável, a economia real de energia proveniente das ações de eficiência energética. Esta ferramenta

tende a subsidiar a difusão da cultura da eficiência energética, uma vez que ela quantifica os benefícios das ações realizadas e, por meio de processos estatísticos, aumenta a confiabilidade dos resultados de um projeto.

Nesse contexto, diversos conceitos relacionados ao Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance foram apresentados e discutidos. Tais conceitos são complementados por um conjunto de exemplos práticos, de forma a indicar os procedimentos e cálculos necessários para a realização de um processo de M&V. Deve-se destacar que a compilação destes resultados advém de diversas experiências dos autores nesta temática, as quais foram obtidas por meio da execução de diversos projetos.

2.4 Aspectos da Implantação de Sistema de Gestão Energética (SIGE) na Universidade de Brasília

O sistema de gestão energética se caracteriza pela implantação de uma infraestrutura de medição de grandezas elétricas e desenvolvimento de *software* supervisor, viabilizando o monitoramento contínuo e em tempo real de edificações, por meio de submedições de consumo. Foram apresentados diversos aspectos relacionados ao desenvolvimento deste tipo do sistema, conforme citados a seguir:

As fases iniciais dos trabalhos foram marcadas pela definição da técnica de desenvolvimento, a qual se baseia em metodologias ágeis. Destaca-se a inclusão de testes automatizados, Integração Contínua e Deploy Contínuo (CI/CD), Automação de Configuração de Ambiente e Isolamento de Ambiente, proporcionando uma maior robustez e qualidade de código programado.

O sistema se baseia em premissas de *Software Livre*, o que viabiliza sua adoção por outros órgãos públicos, bem como a criação de uma comunidade em torno de seu desenvolvimento que ajude a aprimorar cada vez mais suas funcionalidades.

A arquitetura de *hardware* do SIGE foi concebida em diversas camadas, de forma a proporcionar uma redundância na coleta de dados e facilitar a disponibilização de informações para o usuário final. As etapas de estudos e pesquisas de desenvolvimento do produto resultaram na definição de requisitos de *hardware* e *software* para todas as camadas, as quais subsidiaram a escolha das tecnologias empregadas no sistema.

Deve-se ressaltar o desenvolvimento de interfaces gráficas para viabilizar o acesso às informações coletadas e prover o acompanhamento em tempo real das edificações da Universidade de Brasília. As funcionalidades desenvolvidas consideram a inclusão de visualização de dados de medição, geração de relatórios, painéis informativos para auxiliar a gestão do sistema de distribuição de energia da Universidade, sistemas de notificação de ocorrência.

O SIGE também conta com o cálculo de indicadores relacionados às edificações monitoradas, bem como o tratamento de dados históricos de medição para a obtenção de curvas típicas de consumo.

2.5 Novos Paradigmas para o Planejamento Energético. A importância das Fontes Renováveis e da Eficiência Energética

Foi identificado que as fontes renováveis de energia estão diretamente relacionadas com temas de âmbito global, em especial à mudança climática devido às emissões de gases de efeito estufa do sistema elétrico tradicional. Conclui-se que o planejamento energético tradicional deve dar lugar a um novo formato, focado no ser humano e que busca atender às demandas da sociedade, não apenas no quesito de segurança energética, mas também relacionados às questões ambientais e sociais. Para isso, é crucial o estudo interdisciplinar da energia, em especial abordando os novos paradigmas apresentados pelo Acordo de Paris e pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, para que os novos profissionais possam fazer uma mudança profunda de rumo do setor energético. Trata-se de uma necessidade de modernização dos cursos de engenharia de sistemas de potência.

2.6 Desenvolvimento de Cenários para o Planejamento da Inserção da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição

A partir da identificação e análise de diversos indicadores, pode-se construir uma metodologia com o objetivo de estabelecer os possíveis cenários de penetração de GDFV na rede de distribuição da CEB-DIS.

Com base nas premissas apresentadas por esta metodologia seria então desenvolvido um sistema, para a seleção dos possíveis cenários, que poderia complementarmente indicar, com base em parâmetros de hierarquização a serem definidos, os cenários mais promissores.

Seria necessário utilizar, para este sistema, técnicas de geoprocessamento (GIS), para alocar geograficamente os alimentadores da CEB-DIS, cruzando as 31 regiões administrativas do DF.

Neste mapa então seriam inseridas diversas camadas com a apresentação de pontos de possíveis instalações de fontes de energia distribuída no Distrito Federal. São exemplos de camadas:

- pontos atualmente existentes de fontes de geração solar.
- pontos que estão atualmente em processo de análise pela CEB-DIS;
- densidade demográfica da população;
- renda domiciliar *per capita*;
- escolas públicas e privadas;
- hospitais e Postos de Saúde;
- postos da Polícia Militar e Corpo de Bombeiros;
- estações de metrô;
- prédios públicos do governo distrital; e
- prédios públicos do governo federal.

Outra possibilidade futura de instalação de fontes de energia distribuída, poderá advir da indicação de locais de interesse da própria CEB-DIS, que poderá identificar pontos de energia solar que possam facilitar a operação da sua rede de distribuição, como por exemplo: pontos da rede passíveis de reduzir as perdas técnicas; pontos que possam promover a melhoria dos indicadores DEC e FEC; e pontos de difícil controle das perdas não técnicas.

Formado e consolidado este conjunto de informações, o mapa de alimentadores seria sucessivamente submetido a cada uma das camadas apresentadas, quando seria possível visualizar as possibilidades que cada alimentador poderia ter que receber no caso de viabilizados os pontos de energia indicados. Esta análise permitiria, assim, estabelecer os possíveis cenários de penetração de GD no sistema de distribuição da CEB-DIS.

2.7 Simulações em Tempo Real Envolvendo Geração Distribuída

Alinhado à experiência dos laboratórios mais modernos do mundo, é possível constatar que a rápida evolução das plataformas de simulação de tempo real tem permitido elevar o nível das pesquisas acadêmicas e industriais em razão da sua capacidade de recriar cenários reais com maior precisão. Para tanto, foi implementado um ambiente para a execução de simulações em tempo real que utiliza um simulador de tempo real em conjunto com um amplificador de potência bidirecional trifásico de tensão para a simulação de uma microrrede. A característica integradora deste sistema permite o desenvolvimento de um amplo conjunto de pesquisas em torno de simulações de tempo real do tipo SIL e HIL, como por exemplo: testes de inversores fotovoltaicos operando em diversas condições (algoritmos para o rastreamento do ponto de máxima da potência, técnicas de anti-ilhamento, etc.). Ditas pesquisas, objetivam avaliar as particularidades derivadas da operação dos sistemas de distribuição, quando da integração da Geração Distribuída Fotovoltaica, bem como de outras tecnologias (sistemas de carregamento de armazenadores de energia e veículos elétricos, sendo uma fonte despachável, integrada ao sistema fotovoltaico e/ou eólico).

2.8 Métodos de Redução de Circuitos para Simulação de Rede de Distribuição

Foram apresentados os métodos de redução de circuitos elétricos usados para lidar com a topologia, tamanho e tecnologias inseridas nas redes de distribuição durante a implementação de simulações em tempo real. Verificou-se que são usados dois métodos de redução, um de abordagem monofásica e outro de abordagem polifásica. O primeiro, com muitas vantagens em relação com sua implementação e custo computacional quando usado para reduzir sistemas equilibrados, todavia os erros gerados em sistemas desequilibrados inviabilizam sua aplicação nesses casos, enquanto que o método de abordagem polifásica evidenciou seu potencial na redução de circuitos desequilibrados. Nos casos de sistemas desequilibrados desacoplados, ou seja, onde não há impedâncias mútuas, o método monofásico pode ser aplicado para cada fase individualmente, obtendo resultados equivalentes aos obtidos com o método de redução polifásico, porém existem casos em que há desequilíbrio e impedâncias mútuas, onde apenas a redução polifásica pode ser aplicada. Dessa forma, apenas o método polifásico pode ser aplicado com precisão para qualquer caso.

2.9 Quantificação dos Impactos Técnicos da Inserção de Fonte de Geração Fotovoltaica em Redes Elétricas de Distribuição. Estudos de Casos

Partindo da análise das curvas de carga das unidades consumidoras e da determinação de um modelo do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, foi possível estudar os impactos da inserção de GDFV na rede de distribuição local. Depois de estudado o desempenho da rede de distribuição local em situação normal de operação, considerou-se um cenário mais severo, com os telhados de oito unidades consumidoras sendo utilizados para a instalação de painéis fotovoltaicos, totalizando mais de 6 mil m² de área útil, e irradiação solar 55% acima da média histórica. Assim, a GDFV forneceria 47 mil kWh diários ao sistema elétrico da Universidade com potência de pico igual a 4 MW. Como consequência, os níveis de penetração atingiram 70% em dias úteis e 105% aos finais de semana. A demanda geral do campus sofre uma redução expressiva nos dias úteis, em especial às 11:00 horas, quando ocorre a reversão no fluxo de potência. Nesse horário, a Universidade deixa de consumir 3,4 MW para fornecer 1,6 MW à distribuidora, mas os limites técnicos não foram extrapolados. Já aos finais de semana, devido ao fluxo reverso nos horários de pico da produção da GDFV, apresentando máximo igual a 3,2 MW, às 11:00 horas, os limites técnicos foram extrapolados das 9 às 14 horas. Além disso, o fluxo reverso aumentou as perdas técnicas, diminuindo a eficiência do sistema de 94,7% para 89,6%.

Com relação ao alimentador 1004 (Lago Sul – Brasília) da CEB-DIS, considerando resultados de estudos realizados, foi anteriormente, analisada uma faixa de penetração FV compreendida entre 10% e 50%, para quantificação das perdas elétricas. Para as faixas de penetração compreendidas entre 10% e 30%, pode-se concluir que para o alimentador 1004 as perdas diminuem de maneira concomitante ao aumento do nível de penetração compreendido entre estas faixas, independentemente do cenário de localização de GDFV. Para o alimentador em questão, pode-se concluir também que 30% é o ponto mínimo da curva de perdas, sendo que, a partir desse valor, as perdas tendem a aumentar de maneira concomitante com o nível de penetração. Para um cenário com 50% de integração FV, o alimentador em questão já possui, durante o período de maior insolação, valores de perda superiores aos sem nenhuma integração FV.

Foi proposto um método baseado em fundamentos estatísticos, que apresenta os procedimentos necessários para a quantificação dos impactos da GDFV em redes de distribuição de energia elétrica. Os dados da radiação solar, temperatura e os sistemas fotovoltaicos variam com base no método de Monte Carlo. A análise do comportamento dos impactos permite, entre outros aspectos, identificar os níveis de penetração nos quais os melhores benefícios são derivados da integração de GDFV à rede. O método proposto, robusto por considerar alimentadores com milhares de unidades consumidoras, e permitir lidar de forma probabilística com as incertezas sobre alocação da GD e a potência a ser instalada, é uma contribuição para o estudo dos impactos.

3. AGENDA ESTRATÉGICA PARA FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Identificaram-se os seguintes temas, que se mostram promissores, com vistas a futuros desenvolvimentos:

3.1 Eficiência Energética

Embora abordado neste projeto, vislumbra-se o que o desenvolvimento de metodologias e sistemas para a gestão energética, envolvendo o monitoramento contínuo e realização de ações automatizadas e conjuntas nas instalações, possua grande relevância para a implementação das chamadas “Edificações Verdes”. Os trabalhos neste sistema devem abranger outras fases da cadeia de inovação, o que permite a evolução e difusão deste sistema como produto para outras instituições. Além do mais, a implementação de sistemas automatizados que viabilizem a Medição e Verificação de Performance das ações de eficiência energética se mostra com potencial para novos desenvolvimentos.

3.2 Planejamento da Geração Distribuída

Metodologias, algoritmos, ferramentas computacionais, critérios utilizados para o planejamento da expansão da rede de distribuição, devem ser revisitados e atualizados, de forma a contemplar novos cenários de inovações tecnológicas com a crescente inserção de GD, e futuramente a inserção de veículos elétricos e dispositivos de armazenamento de energia. Neste novo cenário, deve-se cada vez aplicar os conceitos de redes elétricas inteligentes.

3.3 Modelagem de Componentes, Ferramentas Computacionais e Laboratórios

Consolida-se como uma tendência na área de simulação de sistemas elétricos a substituição de modelos matemáticos por dispositivos reais, de forma a contornar a complexidade existente no processo de modelagem da eletrônica envolvida. Para tanto, arquiteturas de ambientes de simulação em tempo real multipropósitos devem ser desenvolvidas. Fomentar o desenvolvimento de protocolos padrão para execução de testes de integração de novas tecnologias à rede elétrica, entre elas a Geração Distribuída e dispositivos de armazenamento de energia.

No Brasil, recomenda-se a especificação de circuitos padrão para simulação de integração de tecnologias a redes elétricas que contemplem as características típicas das distribuidoras brasileiras.

3.4 Impactos Decorrentes da Penetração de Geração Distribuída nas Redes de Distribuição

Torna-se necessária a definição e determinação de métricas para a caracterização dos impactos devido à inserção de GD nas redes de distribuição, considerando o nível de tensão do sistema elétrico, os diferentes tipos de consumidores e localização da distribuidora. Há a necessidade de definir padrões para simulação das condições do fluxo de potência, visto a grande quantidade de variáveis envolvidas (irradiância, localização da GD, potência da GD e características do alimentador).

3.5 Redes Inteligentes no Contexto da Geração Distribuída

Implementar soluções tecnológicas para a integração de dispositivos que visem auxiliar às distribuidoras na operação das redes de distribuição, contando com a Geração Distribuída, dispositivos de armazenamento de energia e a inserção de veículos elétricos. Ditas soluções, devem fornecer subsídios para a criação de novos modelos de negócios através do aprimoramento do fluxo de informações entre os consumidores e agentes do mercado.

3.6 Proteção e Controle Aplicados à Geração Distribuída

Será necessário reforçar as pesquisas no sentido de garantir uma conexão e desconexão segura da GD com as redes de distribuição, analisando aspectos de proteção, controle, monitoramento de desempenho, gerenciador de energia e novas metodologias e aplicativos de estudos. Projetos piloto de instalação de conversores inteligentes e de microrredes, monitorados nos pontos de conexão deverão ser desenvolvidos para que possam ser identificados os benefícios, desafios técnicos e perspectivas da tecnologia.

3.7 Microrredes no Contexto da Geração Distribuída

A implementação das microrredes torna necessário o desenvolvimento de estudos que visem à interoperabilidade entre seus componentes e à configuração de diversos cenários de operação. Para isto, torna-se necessário investir em infraestrutura laboratorial e ferramentas de simulação que possam representar este tipo de configuração e seus componentes, operando isoladamente ou conectada à rede de distribuição.

3.8 Armazenamento de Energia na Geração Distribuída

Demonstrados os benefícios que um sistema de armazenamento pode trazer para a rede de distribuição, quando instalado principalmente junto a um sistema de Geração Distribuída, devem-se analisar e detalhar os aspectos técnicos e econômicos e outros fatores motivadores que poderiam ser deflagrados no sentido de acelerar esta aplicação.

3.9 Fontes de Energia na Geração Distribuída

Para a efetiva inserção de outras fontes de energia renováveis no sistema de distribuição, visualiza-se a necessidade de desenvolvimento de metodologias e ferramentas que levem em consideração as características técnicas e operacionais próprias de cada uma delas durante a avaliação.

3.10 Novos Negócios

Torna-se cada vez mais premente a identificação e análise técnica, econômica e regulamentar de novos negócios para que as empresas distribuidoras possam estar à altura dos novos desafios decorrentes da produção de energia por parte dos consumidores.

3.11 Novos Paradigmas para o Planejamento Energético

Os resultados das pesquisas realizadas no âmbito deste projeto forneceram subsídios importantes para o enfrentamento dos novos paradigmas que se visualizam no futuro relacionados ao planejamento energético dos sistemas de energia elétrica, onde a escolha e localização das fontes de energia e as ações de eficiência energética, deverão ser tratadas diferentemente das soluções atuais, pois estas não serão mais suficientes para o atendimento das recentes diretrizes adotadas por praticamente todos os países do mundo (ODS e Acordo de Paris) voltados principalmente para a redução de emissão de gases de efeito estufa.

Neste sentido é de primordial importância que as Escolas e Universidades contemplem, nas suas diretrizes curriculares, disciplinas e atividades acadêmicas, que estimulem a inovação e criatividade, para que os estudantes possam lidar com estes novos desafios.

Projeto gráfico e editoração
Casa 73

Texto composto em **Roboto** e títulos em **Exo**

Brasília – Distrito Federal – Brasil

2020

ISBN: 978-65-990299-3-6

CDL



9 786599 029936



AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

**PEE - Programa de
Eficiência Energética**

**P&D - Programa de Pesquisa
e Desenvolvimento**

Proponente



Cooperada



Executoras

