

Prospecção e
Hierarquização de
Inovações Tecnológicas
Aplicadas a
Linhas de Transmissão

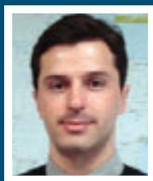


Alexandre Maduro-Abreu
Arnoldo Rodrigo Saavedra
José Alexander Araújo
Leonardo Brant Murça
Ricardo Ramos Fragelli
Sergio de Oliveira Frontin
Vinícius Barros Rêgo



GLIENDER P. MENDONÇA

Gerente do Projeto



Pós-graduado em Direito dos Contratos pela UNIDF, atua desde 2001 no segmento de Energia Elétrica. Fez parte do quadro de funcionários da ANEEL e Eletronorte e, atualmente, ocupa as funções de coordenador de Relações Ins-

titucionais e Regulatórias e gerente dos Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da *Holding Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. – TAESA*.

SERGIO DE OLIVEIRA FRONTIN

Coordenador do Projeto



Pesquisador colaborador da UnB, Engenheiro Eletricista pela Escola Nacional de Engenharia da UFRJ, Mestre em *Power Systems pelo Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), Troy – Estados Unidos*. Trabalhou na Agência Nacional de Energia Elétrica,

Furnas Centrais Elétricas S.A., Itaipu Binacional e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Ex-professor da PUC-RJ e do Instituto Militar de Engenharia.

JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO

Pesquisador do Projeto



Professor Adjunto 3 do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Brasília (UnB). Ph.D em *Engineering*

Sciences pela *University of Oxford, UK*. Membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências. Pesquisador de Produtividade Nível 2 do CNPq.

ARNOLDO RODRIGO SAAVEDRA

Pesquisador do Projeto



Eng. civil eletricista (equiv. M.Sc.), 1963, *Universidad Técnica Federico Santa Maria*, Valparaíso, Chile. Atualmente consultor independente trabalhando para o ONS, na verificação de projetos de transmissão HVDC e CCAT. Foi chefe do

Departamento de Planejamento e Estudos da CHILECTRA, Gerente de Projetos da PTEL (ex-subsidiária da PTI). Profissional Executivo da PROMON.

Prospecção e
Hierarquização de
Inovações Tecnológicas
Aplicadas a
Linhas de Transmissão

Alexandre Maduro-Abreu
Arnoldo Rodrigo Saavedra
José Alexander Araújo
Leonardo Brant Murça
Ricardo Ramos Fragelli
Sergio de Oliveira Frontin
Vinícius Barros Rêgo



Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão



1ª Edição
Tiragem: 3.000 livros
Teixeira Gráfica e Editora

BRASÍLIA
2010

Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. – TAESA
Praça XV de Novembro, nº 20, 10º andar.
Centro – Rio de Janeiro – RJ – CEP 20.010-010
Paulo Mota Henriques
Diretor Superintendente Geral

Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FINATEC
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro
Av. L3 Norte – Edifício FINATEC
Asa Norte – Brasília – DF – CEP 70.910-900
Profª Júlia Issy Abrahão
Diretora Presidente

Capa, projeto gráfico e diagramação:
Goya Editora

Revisão:
Prof. Ricardo Dayan

Catálogo na fonte
Centro de Documentação – CEDOC / ANEEL

Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas
a linhas de transmissão / Sergio de Oliveira Frontin
(coordenador). --- Brasília : Goya, 2010.

368 p. : il.

ISBN: 978-85-88041-02-8

1. Energia elétrica, transmissão. 2. Linha de Transmissão.
3. Inovação. 4. Prospecção. 5. Hierarquização. I. Título.

CDU: 621.3:62(81)

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do
Convênio de Cooperação Técnica e Financeira nº PT21BL/PI21NV/ETEO 331-01 de 10/08/2009
e Primeiro Termo Aditivo de 23/06/2010.

Todos os direitos reservados pela FINATEC e Transmissora Sudeste Nordeste S.A. – TSN; NOVATRANS
Energia S.A.; Empresa de Transmissão de Energia do Oeste S.A. – ETEO. Empresas do Grupo TAESA.

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

Fotos:
Capa: Thiago Luis Gomes
Capítulos 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13 e 15 – www.sxc.hu
Capítulos 4, 5, 9 e 14 – TAESA/Divulgação

TAESA: Tecnologia e Sustentabilidade

Paulo Mota Henriques

DIRETOR SUPERINTENDENTE GERAL DA TAESA

A busca por novas tecnologias e soluções para fazer frente às necessidades do mercado de forma sustentável tem sido o grande desafio deste novo século. A evolução tecnológica vem acontecendo gradativamente e em proporções cada vez mais velozes, necessitando, assim, do envolvimento e atuação de toda a academia na busca de novos conhecimentos, soluções, produtos e serviços.

A Transmissora Aliança de Energia Elétrica – TAESA, controladora integral das concessões de serviço público de transmissão de energia elétrica, Transmissora Sudeste Nordeste S.A.; Novatrans Energia S.A.; Empresa de Transmissão de Energia do Oeste S.A., e com participação acionária nas concessões Brasnorte Transmissora de Energia S.A. e Empresa de Transmissão do Alto Uruguai S.A., atua no mercado brasileiro de transmissão de energia elétrica, buscando prestar com excelência o serviço de transmissão, atender às normas inerentes ao setor e, ao tempo, transportar a eletricidade de forma segura, ininterrupta e com qualidade ao consumidor.

Para tanto, faz-se necessário que a TAESA busque constante e incessantemente novas tecnologias, com o intuito de assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica, por meio da maximização na disponibilização de suas subestações e linhas de transmissão. Assim, a TAESA procura, da melhor forma possível, gerir os recursos derivados do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Desde a publicação da Lei nº 9.991/2000, a Companhia investiu um alto volume de recursos em pesquisa, buscando sempre reconhecer a lei como oportunidade de investimento sustentável e não como uma simples obrigação setorial.

O conhecimento produzido pelos projetos de P&D pode se transformar em insumo de grande valor para todas as partes envolvidas, companhia, governo, sociedade, investidores e demais instituições, pois permite alcançar os melhores resultados, com destaque para a melhoria da qualidade de vida, desenvolvimento sustentável, crescimento técnico e efetiva difusão de conhecimento aplicado.

O projeto de P&D “Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão” é exemplo de pesquisa que contribuirá com as plantas da Companhia e o fortalecimento do setor elétrico nacional.

SUMÁRIO

Prefácios Iniciais.....	13
-------------------------	----

Resumo Executivo	21
------------------------	----

CAPÍTULO 1

Implantação de Linhas de Transmissão	25
---	-----------

Prefácio – Os desafios da otimização integrada.....	26
---	----

Objetivo.....	28
---------------	----

As Etapas.....	28
----------------	----

Estudos para a Expansão do Sistema de Transmissão.....	29
--	----

Estudos de Ampliações e Reforços do Sistema Existente	30
---	----

Leilões de Linhas de Transmissão	30
--	----

Contrato de Concessão do Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica	32
---	----

Projeto Básico para Atendimento dos Requisitos Técnicos do Edital.....	33
--	----

Requisitos Técnicos do Edital.....	34
------------------------------------	----

Requisitos Elétricos	34
----------------------------	----

Requisitos Mecânicos.....	45
---------------------------	----

Requisitos Cíveis – Fundações.....	48
------------------------------------	----

Construção e Comissionamento.....	49
-----------------------------------	----

Operação	49
----------------	----

Remuneração do Ativo de Transmissão.....	50
--	----

Manutenção	51
------------------	----

Comentários Gerais	52
--------------------------	----

Referências	52
-------------------	----

CAPÍTULO 2

Planejamento e Custos de Linhas de Transmissão.....	55
--	-----------

Prefácio.....	56
---------------	----

Objetivo.....	60
---------------	----

Sistema Interligado Nacional	60
------------------------------------	----

Identificação das Necessidades de Transmissão da Rede Básica.....	61
---	----

Extensão das Linhas de Transmissão em Operação	62
--	----

Extensão de Linhas de Transmissão Planejadas	64
--	----

Investimento para as Linhas de Transmissão Planejadas	66
---	----

Orçamento Simplificado de Linhas de Transmissão	67
Média dos Custos de Linhas de Transmissão Construídas nos Últimos Anos.....	68
Banco de Preços da ELETROBRÁS	69
Preços de Referência da ANEEL	69
Comentários Gerais	84
Referências	84

CAPÍTULO 3

Desempenho de Linhas de Transmissão	87
Prefácio.....	88
Objetivo.....	91
Definições.....	92
Desligamentos Forçados de Linhas de Transmissão.....	94
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Descargas Atmosféricas	98
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Queimadas.....	99
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Queda de Árvore.....	101
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Falhas nos Componentes	101
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Tipo de Curto-Circuito	103
Desligamentos Simultâneos de Linhas de Transmissão	103
Desligamentos Forçados de Linhas de Transmissão de Corrente Contínua (CC).....	104
Índices de Desempenho de Linhas de Transmissão	105
Comentários Gerais	106
Referências	106

CAPÍTULO 4

Prospecções Tecnológicas Realizadas.....	107
Prefácio	108
Objetivo	111
Investimentos em P&D	112
Atual Produção Acadêmica Brasileira	113
Publicações e Seminários.....	114
Patentes	116
Panorama Geral	116
<i>Web of Science</i>	124

CAPÍTULO 5

Estudos e Projetos para Implantação de Linhas de Transmissão	129
Prefácio	130
Objetivo	133
Palavras-chave	133

Pesquisas Realizadas	134
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	140
Comentários Gerais	147
Referências	148

CAPÍTULO 6

Recapacitação de Linhas de Transmissão.....	163
Prefácio	164
Objetivo	168
Palavras-chave	168
Pesquisas Realizadas	168
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	172
Comentários Gerais	175
Referências	176

CAPÍTULO 7

Estruturas de Linhas de Transmissão	183
Prefácio	184
Objetivo	187
Palavras-chave	187
Pesquisas Realizadas	187
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	191
Comentários Gerais	194
Referências	195

CAPÍTULO 8

Condutores de Linhas de Transmissão.....	203
Prefácio	204
Objetivo	206
Palavras-chave	206
Pesquisas Realizadas	207
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	211
Comentários Gerais	213
Referências	214

CAPÍTULO 9

Isoladores de Linhas de Transmissão.....	223
Prefácio	224
Objetivo	226
Palavras-chave	226

Pesquisas Realizadas	226
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	230
Comentários Gerais	232
Referências	234

CAPÍTULO 10

Manutenção de Linhas de Transmissão.....	241
Prefácio	242
Objetivo	244
Palavras-chave	244
Pesquisas Realizadas	244
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	249
Comentários Gerais	251
Referências	252

CAPÍTULO 11

Monitoramento de Linhas de Transmissão.....	259
Prefácio	260
Objetivo	262
Palavras-chave	262
Pesquisas Realizadas	263
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	268
Comentários Gerais	272
Referências	273

CAPÍTULO 12

Aspectos de Meio Ambiente Relacionados à Implantação de Linhas de Transmissão	285
Prefácio	286
Objetivo	290
Palavras-chave	290
Pesquisas Realizadas	290
Temas para Futuros Desenvolvimentos.....	295
Comentários Gerais	296
Referências	298

CAPÍTULO 13

Hierarquização dos Temas Mais Promissores.....	303
Prefácio	304
Objetivo	306
Seleção dos Temas Mais Promissores	306

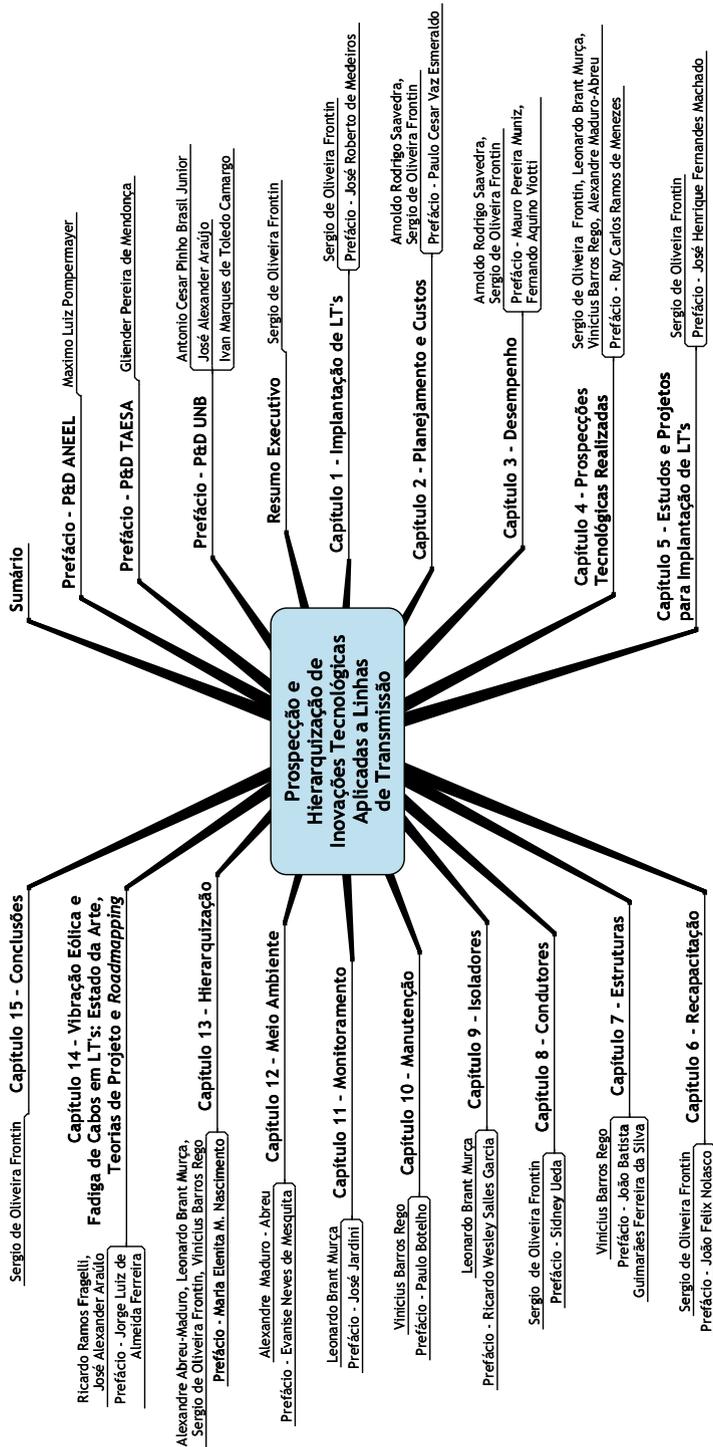
Metodologias de Hierarquização	316
Primeira Rodada Delphi	317
Resultados da Primeira Rodada Delphi	319
Segunda Rodada Delphi	323
Resultados da Segunda Rodada Delphi.....	325
Análise de Sensibilidade.....	327
Comentários Gerais	329
Referências	332

CAPÍTULO 14

Vibração Eólica e Fadiga de Cabos em Linhas de Transmissão: Estado da Arte, Teorias de Projeto e <i>Roadmapping</i>	333
Prefácio	334
Objetivo	336
Palavras-chave	336
Metodologia.....	336
Fadiga em Cabos Condutores.....	337
Fadiga por <i>Fretting</i>	337
Fadiga por <i>Fretting</i> em Cabos Condutores	338
Metodologias de Avaliação da Vibração em Condutores.....	343
Metodologia do EPRI	344
Metodologia do IEEE	345
Metodologia do CIGRÉ WG 22-04.....	345
<i>Roadmapping</i> Estratégico	346
Situação da Pesquisa no Brasil e no Mundo	347
Grupos de Pesquisa Cadastrados no CNPq	347
Banco de Teses da CAPES.....	348
Programa de P&D da ANEEL.....	349
INPI	350
<i>Derwent Innovations Index SM</i>	350
<i>Web of Science</i>	350
<i>Roadmaps</i>	351
Comentários Gerais	353
Referências	354

CAPÍTULO 15

Conclusões	359
-------------------------	------------





PREFÁCIOS INICIAIS

Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

Máximo Luiz Pompermayer
SUPERINTENDENTE DA ANEEL

O conhecimento científico e a evolução tecnológica são balizadores do nível de desenvolvimento de um país, região ou setor de atividade. Entre outros benefícios, a ciência e a tecnologia exercem papel relevante na qualidade, segurança, confiabilidade e eficiência na prestação de serviços de interesse público, como a transmissão e a distribuição de energia elétrica.

Uma indústria ou setor pode adotar uma postura passiva perante a ciência e a tecnologia, ou criar mecanismos que estimulem e direcionem sua evolução para o atendimento de suas demandas e o aproveitamento das oportunidades de mercado. No primeiro caso, a base de conhecimento estaria fora de sua alçada, e sua aplicação estaria condicionada a interesses de terceiros, que, geralmente, não coincidem com o seus.

Por razões socioeconômicas históricas, vários produtos, serviços e setores da economia brasileira são de baixa intensidade tecnológica, o que coloca o País em desvantagem competitiva perante um mundo globalizado. Outros, como o setor de energia elétrica, embora empreguem tecnologia de ponta, são altamente dependentes de tecnologia produzida fora do País, de modo

que os níveis de qualidade e o preço do serviço prestado estão sujeitos aos interesses e às condições impostas por agentes externos.

Diante do exposto, torna-se fundamental a criação de políticas públicas que estimulem o desenvolvimento científico e tecnológico de setores estratégicos para o País, como o setor de energia elétrica. Nesse contexto, destaca-se a Lei no 9.991, de 24 de julho de 2000, que obriga concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica a realizar investimentos mínimos em pesquisa e desenvolvimento. Parte desse recurso é destinada ao Ministério de Minas e Energia (MME) e ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), este último sob coordenação do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Outra parte é aplicada diretamente pelas empresas de energia elétrica, sob regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Ao longo de aproximadamente dez anos, foram aplicados, pelas empresas de energia, quase dois bilhões de reais em projetos de P&D, em diversas áreas do conhecimento e etapas da cadeia da inovação. Além de melhorias na qualidade dos serviços prestados, ganhos de produtividade, redução de custos e impactos ambientais, esses investimentos ampliam a capacidade tecnológica do setor, tendo em vista a produção científica gerada, a capacitação profissional realizada durante a execução dos projetos e a criação e fortalecimento de centros de excelência em áreas estratégicas para o setor.

Centenas de instituições de pesquisa, incluindo universidades, fundações, centros de pesquisa, empresas de base tecnológica, fabricantes e consultores, e milhares de profissionais altamente qualificados participam do Programa. Milhares de produtos ou técnicas, incluindo materiais, equipamentos, dispositivos e procedimentos, foram desenvolvidos ou aprimorados, proporcionando ganhos de produtividade e contribuindo para a redução da dependência tecnológica do setor de energia elétrica.

Este livro é mais um produto importante dessa parceria entre empresas de energia elétrica e instituições de pesquisa, reforçando a importância de políticas públicas destinadas à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico do setor. Com foco na prospecção de tecnologias e inovações relevantes para o futuro da transmissão de eletricidade no País, o projeto INOVALT coloca à disposição do setor o estado da arte, as melhores práticas e as tendências tecnológicas na implantação e na operação de linhas de transmissão.

Que sua aplicabilidade e relevância estimulem a realização de projetos, cujos resultados contribuam para a consolidação desse importante mecanismo de promoção da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico no setor de energia elétrica.



Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. – TAESA

Gliender Pereira de Mendonça
GERENTE DOS PROGRAMAS DE P&D DA TAESA

Os vários projetos de P&D executados e/ou em execução pelas Concessões que integram o Grupo Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. (TAESA), a saber, Transmissora Sudeste Nordeste S.A. (TSN), Novatrans Transmissora de Energia S.A. (NOVA-TRANS), Empresa de Transmissão de Energia do Oeste S.A. (ETEO), Empresa de Transmissão de Energia do Alto Uruguai S.A.(ETAU) e Brasnorte Transmissora de Energia S.A. (BRASNORTE), visam desenvolver novas alternativas para o setor de transmissão de energia, além de buscar constantemente projetos de pesquisa que contribuam com a sustentabilidade, meio ambiente, economia, razoabilidade e principalmente que gerem bons resultados e benefícios à sociedade brasileira, estimulando a competitividade da indústria do nosso país. Os resultados destes projetos contribuem para manter a vanguarda tecnológica da Companhia no âmbito do setor elétrico nacional.

Sabe-se que com a promulgação da Lei nº 9.991 de 24 de julho de 2000, que estabeleceu os percentuais mínimos a investir em programas de P&D pelas empresas do setor elétrico brasileiro, as concessionárias de energia elétrica, sob primorosa coordenação, regulação e fiscalização da Agência Nacional de Energia

Elétrica (ANEEL), vêm, exemplarmente, executando projetos de pesquisa e desenvolvimento que alavancam tecnologicamente o referido setor. Os resultados/produtos provenientes de estudos, desenvolvimento de novos materiais e capacitação profissional, contribuem, incessantemente, para que o país se desvincule da dependência tecnológica com outros países, tendo como ganho adicional a possibilidade de o Brasil exportar novas tecnologias. As Concessionárias de Transmissão que compõem o Grupo TAESA vêm investindo significativamente em projetos de P&D, pulverizados em diversos temas de pesquisa de interesse da Companhia e na busca constante pela melhoria na prestação de seus serviços. Nestes últimos anos, a Empresa investiu um montante considerável de recursos, buscando sempre reconhecer a determinação legal como oportunidade de investimento sustentável, de ser um vetor de inovação e não como uma simples obrigação setorial. A TAESA fortifica-se cada vez mais, beneficiando-se dos produtos advindos das pesquisas e orgulha-se de fazer parte deste processo de P&D que se consolida neste setor.

Participar da equipe do projeto “Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão – INOVALT” e, principalmente, poder deixar registradas nesta obra algumas palavras, que antecedem relatórios originados por grandes personalidades do setor elétrico brasileiro, me enaltece profundamente. Com certeza, este livro, precursor de outros, vem mostrar a relevância da INOVAÇÃO e do desenvolvimento, fatores que agregam avanços tecnológicos do nosso país e convergem na segurança, eficiência e continuidade da prestação dos serviços públicos vinculados ao setor de energia elétrica.

Parabéns ao Pesquisador Sergio Frontin e a toda a sua equipe pela brilhante pesquisa!

*“Entre as pequenas coisas que não fazemos
e as grandes que não podemos fazer,
o perigo está em não tentarmos nenhuma.”*

Confúcio



O Impacto da Lei 9.991 Sobre Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento com o Setor Elétrico na Faculdade de Tecnologia da UnB

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNB

José Alexander Araújo

PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNB

Ivan Marques de Toledo Camargo

PROFESSOR DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNB

Indicadores recentes do Ministério da Ciência e Tecnologia, amplamente divulgados nos diversos veículos da imprensa nacional, mostraram que, nas últimas duas décadas, o Brasil praticamente dobrou sua participação percentual na produção mundial de conhecimento em termos do número total de artigos publicados em periódicos indexados. Ocupamos hoje posição de destaque nesse indicador e, entre os anos de 1980 a 2006, fomos o sexto país a apresentar maior nível de crescimento nas publicações mundiais indexadas. Por outro lado, nossa participação no pedido de patentes de invenção depositadas no escritório de marcas e patentes dos EUA é muito modesta, e o crescimento registrado nos últimos vinte anos não acompanha o ritmo de crescimento de nossas publicações. De uma forma ou de outra, esse é um indicador claro de que a pesquisa realizada no Brasil tem caráter fortemente acadêmico com pouco reflexo ainda no desenvolvimento tecnológico do país. Nesse sentido, a Lei 9.991 de 24 de julho de 2000, que obriga as empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica a investirem um pequeno percentual de sua receita operacional líquida no desenvolvimento de projetos de P&D, tem representado

uma verdadeira revolução na produção de conhecimento, de práticas e de produtos de caráter tecnológico para o setor elétrico brasileiro. O processo sinérgico, disparado pela publicação da referida Lei entre os pesquisadores de diversos laboratórios da Faculdade de Tecnologia da UnB e as empresas parceiras, é exemplo característico. Pelo lado das empresas do setor elétrico, estes recursos, que inicialmente foram considerados por algumas como um ônus ou até mesmo como uma tributação extra, têm sido agora claramente considerados como uma importante ferramenta para o seu desenvolvimento estratégico. Graças a esses projetos de P&D, verifica-se uma maior aproximação entre engenheiros e pesquisadores na tentativa de se criar ferramentas tecnológicas e produtos inéditos e/ou inovadores que representem soluções robustas para problemas e processos de fundamental importância para o setor elétrico brasileiro. Um círculo virtuoso foi criado, onde a solução de problemas existentes no âmbito dos projetos de P&D parece aguçar cada vez mais a curiosidade dos profissionais envolvidos nestes projetos, gerando mais demandas por novos problemas e por um intenso processo de capacitação e transferência tecnológica.

Do outro lado do balcão, pesquisadores usualmente distantes dos problemas práticos e das necessidades tecnológicas das empresas do setor foram atraídos pela perspectiva de novas fontes de financiamento, com volume razoável de recursos protegidos por força da lei. A condução de pesquisas de caráter mais aplicado tem imposto novos desafios e motivações aos pesquisadores que agora veem os resultados de seus trabalhos serem revertidos de maneira clara em benefício das empresas e, conseqüentemente, da sociedade como um todo. Um novo ambiente foi criado nos diversos laboratórios de pesquisa da FT-UnB envolvidos com o desenvolvimento desse tipo de projeto de P&D. A maior presença dos engenheiros do setor elétrico nos nossos laboratórios despertou um grande interesse de docentes e de alunos de graduação e pós-graduação pelo desenvolvimento de pesquisa aplicada para o setor. Apenas como alguns exemplos recentes de projetos de P&D no âmbito da Lei 9.991 na FT-UnB, pode-se citar a criação de um laboratório com características inéditas no Hemisfério Sul para ensaios de fadiga de cabos condutores de energia, o desenvolvimento e patenteamento de uma turbina hidrocínética para geração de energia a partir da correnteza dos rios (com grande impacto e projeto social associado a comunidades isoladas da Amazônia, entre outras), o desenvolvimento de metodologias para projeto contra a fadiga e para a modelagem do comportamento dinâmico de hidrogeradores, o estudo, o desenvolvimento e implantação de biocombustíveis e células combustíveis, estudo e controle dos níveis de par-



tículas poluentes emitidas por gases gerados em usinas termoelétricas, monitoramento e controle da qualidade de energia elétrica, entre outros.

É nesse contexto que o projeto INOVALT foi proposto. Com o objetivo de prospectar e hierarquizar tecnologias e inovações aplicadas a linhas de transmissão, o principal resultado desse projeto de pesquisa é o estabelecimento de uma agenda para a priorização de investimentos nessa área. Neste livro, o hercúleo trabalho de prospecção executado pela equipe do projeto é apresentado de forma coerente. A metodologia de hierarquização adotada é então descrita e aplicada às tecnologias e inovações prospectadas para definição das prioridades científicas que apresentem a melhor relação entre recurso/tempo investido e retorno/financeiro para a empresa.



RESUMO EXECUTIVO

Sergio de Oliveira Frontin
COORDENADOR DO PROJETO

O Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) menciona, no contexto do tema Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, que a rede básica, com vida média na faixa de 20 a 30 anos de serviço, em pouco tempo apresentará inevitável degradação. Por este motivo, vem sendo enfatizada a importância do desenvolvimento de tecnologias que permitam aumentar a capacidade de transporte e a confiabilidade.

Com este objetivo, foi realizada a pesquisa “Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão” patrocinada pela Transmissora Aliança de Energia Elétrica (TAESA), tendo como entidades executoras a Fundação de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FINATEC) e a Universidade de Brasília (UnB).

Este projeto intitulado de INOVALT foi, primordialmente, conduzido em três etapas. Na primeira delas, foi realizada a contextualização do assunto em pauta a partir da análise dos diversos estudos e atividades necessários para a implantação de uma linha de transmissão, da análise do sistema de transmissão atual, da expansão planejada e dos indicadores de desempenho

das linhas em operação. A segunda etapa refere-se à apresentação dos resultados das prospecções efetuadas para a identificação e análise dos temas que poderiam conduzir a inovações tecnológicas. Já a terceira refere-se ao estabelecimento e aplicação de metodologia de hierarquização aos temas selecionados, considerando as dimensões: aumento da capacidade de transporte, aumento da confiabilidade, redução do impacto ambiental, redução dos custos e expansão do sistema.

A contextualização do assunto em pauta foi apresentada nos Capítulos 1, 2 e 3.

O Capítulo 1 – Implantação de Linhas de Transmissão – apresenta, de forma resumida, as fases necessárias para a implantação de uma linha de transmissão de acordo com o atual modelo do Setor de Energia Elétrica. A apresentação destas fases tem, igualmente, o objetivo de prover uma visão global dos aspectos técnicos relacionados às linhas de transmissão e permitir a sua reflexão sobre as diversas possibilidades de aplicação de inovações tecnológicas. Estas inovações podem impactar qualquer um dos componentes envolvidos (estruturas, condutores, isoladores etc.) e contribuir para a realização de estudos voltados para a otimização técnica e econômica da linha.

O Capítulo 2 – Planejamento e Custos – expõe a situação atual do sistema de transmissão e a sua expansão planejada, considerando os dados do Plano Decenal Energia 2019 (PDE 2019). Os diversos componentes de custos decorrentes da implantação de uma linha de transmissão também é um assunto analisado neste Capítulo.

O Capítulo 3 – Desempenho de Linhas de Transmissão – mostra os resultados principais dos relatórios sobre este assunto, publicados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), analisando as causas, frequência e duração dos desligamentos.

A segunda etapa, referente à prospecção dos temas mais promissores, considerou as seguintes fontes de pesquisa em âmbito nacional: Programa de P&D da ANEEL; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE). Para obter parâmetros comparativos com o cenário internacional, foram consideradas também as fontes *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE); *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ) e publicações científicas do banco de dados *Web of Science*.

Além da identificação e análise dos temas mais promissores, foram levantados outros aspectos considerados relevantes para a pesquisa, como por exemplo: investimentos realizados nos projetos de P&D, as instituições pro-



ponentes e executoras e a quantidade de trabalhos por instituição e por país. Uma visão geral deste levantamento foi apresentada no Capítulo 4.

Devido à grande abrangência do tema Linhas de Transmissão, o trabalho de prospecção foi dividido em oito áreas, conforme indicadas abaixo:

- 1) Estudos e ProjetosCapítulo 5
- 2) Recapacitação.....Capítulo 6
- 3) EstruturasCapítulo 7
- 4) CondutoresCapítulo 8
- 5) Isoladores.....Capítulo 9
- 6) Manutenção.....Capítulo 10
- 7) Monitoramento.....Capítulo 11
- 8) Meio AmbienteCapítulo 12

Como resultado desta pesquisa, foram selecionados 98 temas mais promissores em termos de desenvolvimento de projetos P&D.

O Capítulo 13 detalha a terceira etapa do projeto, que se refere ao estabelecimento e aplicação de metodologia de hierarquização aos temas identificados e consolidados a partir das prospecções apresentadas nos capítulos anteriores.

Foram analisadas diversas metodologias, dentre as quais foi escolhida a Metodologia Delphi. Esta metodologia é utilizada para se obter consenso de opiniões entre especialistas sobre um objeto investigado. Baseia-se na aplicação de questionários durante sucessivas rodadas a um grupo de especialistas. A cada rodada, os participantes recebem um *feedback* sobre os resultados da rodada anterior, os quais são submetidos previamente a um tratamento estatístico, ou seja, uma abordagem quantitativa dos dados.

No nosso caso, foram utilizadas duas rodadas de consulta aos especialistas.

Uma primeira rodada foi realizada durante Seminário ocorrido na cidade de Brasília, onde foi apresentado um questionário contendo os 98 temas selecionados previamente para avaliação dos participantes.

Após a análise e consolidação das respostas, foi realizada via *internet* uma segunda rodada de consulta aos especialistas. Para esta rodada foram escolhidos 15 temas mais promissores, selecionados a partir das respostas dos especialistas no seminário. Para cada tema foram apresentadas cinco perguntas específicas, abordando as dimensões Desempenho, Expansão do Sistema, Custos, Melhoria do Sistema Existente e Meio Ambiente.

Como resultado final, apresentou-se a hierarquização dos temas mais promissores, objetivando fornecer subsídios importantes para a construção da Agenda Estratégica das empresas na escolha dos seus projetos de P&D. Espe-

ra-se igualmente que os investimentos nos temas apontados tragam benefícios para redução dos custos decorrentes das diversas atividades para implantação de uma linha de transmissão; melhoria do desempenho com consequente redução das saídas das linhas; redução dos impactos ambientais; e indicação de novos processos e tecnologias que possam ser utilizados para aumentar a capacidade das linhas existentes e aplicados na expansão do Sistema Elétrico.

Após a hierarquização dos temas mais promissores, seria igualmente possível avançar e promover um maior detalhamento das ações necessárias para o pleno desenvolvimento de um item específico.

O Capítulo 14 exemplifica essa possibilidade a partir da apresentação da metodologia de *roadmapping* e sua aplicação ao tema Vibração Eólica e Fadiga de Cabos. Essa metodologia analisa o fenômeno, as teorias correlatas, levanta os indicadores pertinentes e, com base nesse conhecimento e em uma pesquisa junto a especialistas na área, estabelece as ações necessárias para o aprimoramento das pesquisas, infraestrutura, tecnologia e produção do conhecimento relacionados ao tema em questão.

O Capítulo 15 apresenta os principais fatos e conclusões abordados ao longo dos capítulos anteriores.

Os resultados deste projeto podem ser aplicados de forma geral. Entretanto, torna-se necessário ressaltar que não foi dada ênfase às alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica à longa distância como, por exemplo, transmissão em ultra alta tensão em corrente alternada, sistemas de corrente contínua acima de 600 kV, sistemas em meia onda, sistemas hexafásicos etc, tendo em vista que este tema faz parte do projeto estratégico do programa de P&D da ANEEL denominado *Chamada 005*.

Durante o desenvolvimento do projeto, contamos com a ajuda de diversas pessoas, dentre as quais devemos citar: Marcio Szechtman e Geyza Gabrielli Rigo pela TAESA, Francisco Rogério Fontenele Aragão, Cláudio Humberto Amâncio, Débora Fernandes da Cunha, Carolini Priscila Silva de Oliveira, Marinela Dias Piloto pela FINATEC.

Finalmente, gostaria, em nome da equipe, agradecer ao Gerente do Projeto, Gliender P. Mendonça, pelo apoio sempre presente durante o desenvolvimento dos trabalhos. Agradecemos também aos renomados especialistas que contribuíram apresentando os seus comentários por meio de prefácios aos diversos capítulos.



CAPÍTULO 1

Implantação de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin



PREFÁCIO

Os desafios da otimização integrada

José Roberto de Medeiros

Um projeto de linha de transmissão busca atender aos requisitos de planejamento de sistema, ou seja, transmitir uma determinada potência em regime normal de operação (carregamento de longa duração) e em emergência (carregamento de curta duração) a um determinado nível de tensão, ao menor custo total, qual seja custo de investimento acrescido do custo de perdas, com baixo impacto ambiental e social, altos índices de confiabilidade e disponibilidade, atendendo a requisitos técnicos mínimos tanto do ponto de vista elétrico como mecânico.

O parágrafo anterior, basicamente, indica os principais elementos que compõem o processo de otimização de projeto de linha de transmissão. Alguns destes elementos dizem respeito ao custo de investimento do projeto associado à função de transmissão, ou seja, torres (geometria, espaçamentos, alturas etc), cabos (tipo e número de condutores, comprimento de vão, flecha etc), outros ao custo de investimento do projeto associado às questões ambientais (faixa de passagem, restrições quanto à definição de rotas, compensações ambientais, interferências no meio ambiente de uma forma geral, bem como em serviços e sistemas – telefonia, rádio etc, e nos seres humanos – potenciais perigosos – toque e passo, ruídos audíveis etc).

Observa-se que, para que o projeto seja desenvolvido de forma segura, um conjunto expressivo de dados deve estar disponível de forma confiável. Como exemplo, pode-se citar dados meteorológicos (vento, chuva, umidade



etc), dados ambientais (poluição ambiental, nível de sinais de rádio e telefônicos, localização de instalações sujeitas à interferência etc), custos de componentes (cabos, ferragens etc), dados ambientais, requisitos mínimos de desempenho etc.

No atual modelo do setor elétrico brasileiro, os ativos de transmissão são remunerados por meio de uma parcela fixa acrescida de uma parcela variável que está relacionada à disponibilidade destes ativos no cumprimento da sua função de transmissão. Assim sendo, um equilíbrio entre o custo do projeto e seu desempenho operativo (disponibilidade) é fundamental para que se possa garantir a adequada remuneração.

O desenvolvimento integrado de um projeto de linha de transmissão voltado à otimização de todos estes fatores constitui-se em um desafio permanente para o setor elétrico, mesmo porque os pesos dos diversos elementos que participam do processo de otimização variam com o tempo. Daí a necessidade de contínuo aprimoramento tecnológico na busca de inovações que possibilitem ganhos contínuos tanto para o empreendedor como para a sociedade como um todo, contribuindo para o aumento do nível de riqueza e desenvolvimento do país.

Este primeiro capítulo (Implantação de Linhas de Transmissão) apresenta, de forma objetiva e ordenada, todos os aspectos envolvidos em um projeto de linha de transmissão e, certamente, contribui para uma visão abrangente deste processo.

Implantação de Linhas de Transmissão

Sérgio de Oliveira Frontin

Objetivo

Apresentar de forma resumida as etapas necessárias para implantação de uma linha de transmissão de energia elétrica de acordo com o atual modelo do Setor de Energia Elétrica Brasileiro.

A apresentação destas etapas tem o objetivo de prover o leitor de uma visão global dos aspectos técnicos relacionados às linhas de transmissão e, em decorrência, permitir a sua reflexão sobre as diversas possibilidades de aplicação de inovações tecnológicas, que podem impactar qualquer um dos componentes envolvidos (estruturas, condutores, isoladores etc.) e fornecer subsídios importantes para a realização de estudos voltados para a otimização técnica e econômica da linha.

As Etapas

A implantação de uma linha de transmissão se inicia pela identificação de sua necessidade, com vistas à expansão do sistema elétrico ou necessidade de reforço das instalações existentes até a sua efetiva operação.

De maneira global, estas etapas podem ser nomeadas da seguinte forma:

- Estudos para a expansão do sistema de transmissão.
- Estudos de ampliações e reforços do sistema existente.
- Realização de leilões de linhas de transmissão.
- Contrato de concessão do serviço público de transmissão de energia elétrica.



- Elaboração do projeto básico para atendimento dos requisitos do edital.
- Construção e comissionamento.
- Operação.
- Remuneração do ativo de transmissão.
- Manutenção.

A seguir será detalhada cada uma destas etapas.

Estudos para a Expansão do Sistema de Transmissão

Para a definição das alternativas de expansão do sistema de energia elétrica, basicamente são realizados, na fase de planejamento, estudos de fluxo de potência, curto-circuito, estabilidade e sobretensões transitórias.

Estes estudos e outros específicos relacionados às questões econômicas e ambientais são realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) que, a partir do conhecimento da demanda de energia no horizonte do planejamento e das alternativas de geração, determina as soluções tecnicamente e economicamente mais adequadas para a expansão do sistema de energia elétrica. Além de outros parâmetros, as alternativas de transmissão deverão ser identificadas pelo seu modo de transmissão (corrente alternada ou corrente contínua), nível de tensão da linha de transmissão, carregamento em operação normal e em emergência, suas subestações terminais e a data requerida para entrada em operação.

Os resultados dos estudos convergem para o Plano Decenal de Expansão de Energia, que apresenta os principais aspectos que norteiam o estabelecimento da configuração de referência do sistema de geração e transmissão e sua evolução ao longo do período de 10 anos.

No item Geração de Energia Elétrica, deste Plano Decenal, são apresentadas as hipóteses da expansão da geração e as diversas análises realizadas, tais como riscos de *déficit*, custos marginais de operação, evolução dos fluxos nas interligações, estimativa do total de investimentos, análise de sensibilidade a prazos mais longos para obtenção de licenças ambientais etc.

No item Transmissão de Energia Elétrica, a expansão da transmissão é descrita por região geoeletrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) e por unidade de estado dessas regiões. Além das estimativas de investimentos, são indicadas a avaliação da estabilidade eletromecânica do sistema interligado, a projeção da evolução dos valores médios das tarifas de uso do sistema de transmissão, a avaliação dos índices de confiabilidade da rede elétrica e a evolução dos níveis de curto-circuito nos barramentos.

No item Análise Socioambiental do Sistema Elétrico, é apresentado um panorama das questões socioambientais referentes às configurações propostas para a expansão da geração e da transmissão.

A partir do Plano Decenal, a EPE elabora o Programa de Expansão da Transmissão (PET), onde são indicadas as linhas de transmissão e subestações necessárias para a adequada prestação dos serviços de transmissão de energia elétrica pela Rede Básica (RB) do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Estudos de Ampliações e Reforços do Sistema Existente

O Operador Nacional do Sistema (ONS), a partir de estudos de sistemas no horizonte de até 5 anos, pode, por sua vez, identificar a necessidade de ampliações e reforços no sistema atual que são apresentados no Plano de Ampliações e Reforços (PAR).

As novas linhas de transmissão apresentadas no PET e PAR são analisadas e consolidadas pelo Ministério de Minas e Energia (MME) que representa a União como poder concedente do serviço público de transmissão. A partir desta análise, o MME compõe os lotes de linhas de transmissão e subestações para submeter ao mercado por meio de realização de leilões.

Leilões de Linhas de Transmissão

O MME, dentre as suas competências legais, vem delegando à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a realização de licitação, na modalidade leilão, para a seleção das propostas para contratação de serviço público de transmissão, mediante outorga de concessão, incluindo a construção, montagem, operação e manutenção das instalações de transmissão.

O procedimento para a declaração do vencedor, de acordo com as atuais regras do leilão de linhas de transmissão e subestações, é o seguinte:

Será declarada vencedora de cada lote a proponente que ofertar, em envelope lacrado, o menor valor da receita anual permitida para exploração da concessão do serviço público de transmissão, desde que os valores ofertados pelas demais proponentes, em cada lote, sejam superiores a 5% (cinco por cento) do valor ofertado pela menor proposta financeira apresentada em envelope lacrado.

Em cada lote, a sessão do leilão prosseguirá, com lances sucessivos efe-



tuados a viva-voz, no caso de haver: Diferença entre os valores da menor proposta financeira e das demais propostas ofertadas pelas proponentes igual ou inferior a 5% (cinco por cento), ou empate entre os menores valores dos lances ofertados nos envelopes.

No edital da licitação, a ANEEL exige dos proponentes empreendedores diversos requisitos, dentre os quais se podem citar:

A transmissora deverá promover, junto aos proprietários, priorizando a forma amigável, a liberação da faixa de terra necessária à passagem da linha de transmissão. Caso a transmissora venha requerer a Declaração de Utilidade Pública de áreas de terra e benfeitorias para fins de instituição de servidão administrativa ou desapropriação, a ANEEL examinará a questão e se for deferida a solicitação, cabendo à transmissora as providências necessárias para efetivação das servidões administrativas e da desapropriação, com o conseqüente pagamento das indenizações.

Este item é particularmente importante considerando que o estabelecimento da rota da linha de transmissão, mesmo com a utilização de modernas ferramentas de geoprocessamento, está se tornando uma tarefa cada vez mais complexa, tendo em vista a preocupação crescente com o meio ambiente. Sendo assim, a escolha da rota da linha de transmissão deve ser cuidadosamente realizada considerando os aspectos de engenharia, meio ambiente e economia.

Outros itens importantes são:

Será de responsabilidade exclusiva da transmissora a construção, montagem, operação e manutenção das instalações de transmissão, cabendo-lhe, para isso, captar os recursos financeiros, desenvolver diretamente ou contratar com terceiros: serviços, aquisição de materiais e equipamentos para reserva ou substituição. Responderá ainda a transmissora pela integridade das instalações, submetendo-se à regulamentação específica estabelecida pela ANEEL e aos procedimentos de rede, bem como às condições definidas no Contrato de Concessão e no Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão – CPST.

Os requisitos aqui estabelecidos aplicam-se ao pré-projeto, ao projeto básico e executivo bem como às fases de construção, manutenção e operação do empreendimento. Aplicam-se ainda ao projeto, fabricação, inspeção, ensaios e montagem de materiais, componentes e equipamentos utilizados no empreendimento.

A transmissora deverá apresentar à ANEEL o projeto básico das instalações de transmissão, vinculadas ao seu contrato de concessão.

É de responsabilidade da transmissora obter os dados, inclusive os descritivos das condições ambientais e geomorfológicas da região de implantação, a serem adotados na elaboração do projeto básico, bem como nas fases de construção, manutenção e operação das instalações.

É de responsabilidade e prerrogativa da transmissora o dimensionamento e especificação dos equipamentos e instalações de transmissão que compõem o serviço público de transmissão, objeto desta licitação, de forma a atender ao edital e as práticas da boa engenharia, bem como a política de reserva.

Contrato de Concessão do Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica

Uma vez atendidas as exigências processuais indicadas no edital, a empresa transmissora vencedora assina o Contrato de Concessão: contrato com prazo de vigência de 30 anos, a ser celebrado entre a transmissora e a União, por intermédio da ANEEL, regendo a concessão da prestação do serviço público de transmissão. Este contrato contém as seguintes cláusulas principais, dentre outras:

- Definições.
- Condições de prestação do serviço.
- Obrigações e encargos da transmissora.
- Prerrogativas da transmissora.
- Receita do serviço de transmissão.
- Revisão da receita anual permitida.
- Fiscalização dos serviços.
- Penalidades.
- Intervenção na concessão.
- Extinção da concessão e reversão dos bens vinculados.
- Prazo de concessão.

A transmissora, na mesma data ou em até 60 dias após a celebração do Contrato de Concessão, deverá firmar o Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST) com o Operador Nacional do Sistema, consubstanciando as condições técnicas e comerciais relativas à disponibilidade das instalações de transmissão para a operação interligada.



Projeto Básico para Atendimento dos Requisitos Técnicos do Edital

O Edital de Licitação para fins de verificação da conformidade com os requisitos técnicos exige que a transmissora apresente o Projeto Básico das instalações para análise e aprovação da ANEEL. Sendo enfatizado que, sempre que solicitada, a transmissora deve comprovar, mediante estudo, que as soluções adotadas nas especificações e projetos das instalações de transmissão são adequadas.

O Projeto Básico deve ser composto de relatórios técnicos com roteiro completo e descrição detalhada do tratamento e das hipóteses assumidas para os dados de vento, as pressões dinâmicas e as cargas resultantes, os esquemas e as hipóteses de carregamentos e o respectivo memorial de cálculo com o dimensionamento completo da linha de transmissão incluindo:

- Mapas (isótaças).
- Estações anemométricas usadas.
- Velocidade máxima anual de vento a 10 m de altura e média de 3 segundos, tempo de retorno de 250 anos (para linha com tensão superior a 230 kV) e 150 anos (para linha com tensão igual ou inferior a 230 kV) e, também, com média de 10 minutos.
- Média de velocidade máxima anual de vento a 10 m de altura e média de 3 segundos, tempo de retorno de 250 anos (para linha com tensão superior a 230 kV) e 150 anos (para linha com tensão igual ou inferior a 230 kV) e, também, com média de 10 minutos.
- Coeficiente de variação da velocidade máxima anual a 10 m de altura (em porcentagem).
- Coeficientes de rajadas a 10 m de altura e média de 10 minutos.
- Relação de normas técnicas oficiais utilizadas.
- Memorial de cálculo dos suportes.
- Desenho da diretriz selecionada e suas eventuais interferências.
- Desenho da faixa de passagem, *clearances* e distâncias de segurança.
- Regulação mecânica dos cabos: características físicas, estados básicos e pressão resultante dos ventos.
- Suportes (estrutura metálica ou de concreto armado e/ou especiais).
- Tipos, características de aplicação e relatórios de ensaios de cargas para os suportes pré-existentes.
- Desenhos das silhuetas com as dimensões principais.
- Coeficientes de segurança.
- Pressões de ventos atuantes (cabos e suportes), coeficientes de arrasto, forças resultantes e pontos de aplicação.

- Esquemas de carregamentos e cargas atuantes.
- Cargas resultantes nas fundações.
- Ensaio de carregamento de protótipo (para os suportes de suspensão simples de maior incidência).
- Programa preliminar do ensaio de carregamento a ser realizado com a indicação da data prevista, hipóteses e a determinação das cargas (Kgf) e respectivos locais de aplicação.
- Tipos de fundações: critérios de dimensionamento e desenhos dimensionais.
- Cabos condutores: características.
- Cabos para-raios: características.
- Cadeias de isoladores: coordenação eletromecânica, desenhos e demais características.
- Contrapeso: características, material, método e critérios de dimensionamento.
- Ferragens, espaçadores e acessórios: descrição, ensaios de tipo, características físicas e desenhos de fabricação.
- Vibrações eólicas.
- Relatórios dos estudos de vibração eólica e de sistemas de amortecimentos para fins de controle da fadiga dos cabos.
- Projeto do sistema de amortecimento para fins de controle da fadiga dos cabos, de forma a garantir a redução de danos aos cabos.

Requisitos Técnicos do Edital

Como já mencionado, o Projeto Básico deve ser elaborado de forma a atender aos diversos requisitos técnicos apresentados no edital. A seguir, serão apresentados e analisados alguns destes requisitos. O leitor deve analisar estes requisitos tentando identificar as possibilidades de inovações tecnológicas que possam ser aplicadas objetivando a redução dos custos, melhoria da segurança e confiabilidade, redução do impacto sobre o meio ambiente etc. Este é o objetivo primordial deste projeto de P&D, e neste sentido as atividades seguintes serão desenvolvidas visando identificar os itens mais promissores com relação aos aspectos indicados.

REQUISITOS ELÉTRICOS

Parâmetros elétricos – Os parâmetros elétricos das linhas de transmissão são definidos pelas matrizes de impedância série e admitância shunt, tanto para frequência industrial como para altas frequências para aplicação de sinal de carrier.



Estes parâmetros dependem essencialmente da geometria da torre, da frequência, características naturais do condutor e resistividade do solo. Os tópicos relacionados mais importantes são impedância de surto, desbalanço, tensões induzidas, campo elétrico, campo magnético, tensões ressonantes.

O edital do leilão disponibiliza todos os dados que foram utilizados nos estudos de planejamento, que levaram à conclusão da necessidade da linha de transmissão em pauta. Entretanto, para evitar qualquer discordância nos estudos futuros, onde serão considerados os parâmetros da linha efetivamente projetada, torna-se muito importante o seguinte requisito:

A impedância equivalente vista dos terminais de cada trecho de linha de transmissão, composta por suas componentes de seqüência positiva e zero e também por seu grau de compensação série e/ou paralela, deve possibilitar que o desempenho sistêmico da instalação seja similar ao da configuração básica. Este desempenho é caracterizado pelo resultado obtido em termos de fluxo de potência e resposta dinâmica em um conjunto de situações em regime normal e sob contingências apresentado nos estudos documentados nos relatórios listados no edital.

Capacidade de corrente dos condutores – Para a adequada transmissão de energia, tanto durante operação normal como durante situações de emergência, é essencial que a linha de transmissão tenha garantida a sua capacidade de corrente de longa e curta duração. Neste sentido, exige-se que:

A capacidade de corrente de longa duração deve corresponder ao valor de corrente da linha de transmissão em condição normal de operação e deve atender às diretrizes fixadas pela norma técnica NBR 5422 da ABNT. A capacidade de corrente de curta duração deve atender à condição de emergência estabelecida na mesma norma.

Capacidade de corrente dos acessórios, conexões e demais componentes – Não é necessário somente garantir a capacidade de corrente dos condutores, mas é preciso também garantir a capacidade de corrente em todos os componentes da linha que sejam submetidos ao fluxo de corrente, assim:

Os acessórios, conexões e demais componentes que conduzem corrente devem ser dimensionados de forma a não criar restrição à operação da linha. Deverão ser atendidas, também, as prescrições das normas

de dimensionamento e ensaios de ferragens eletrotécnicas de linhas de transmissão, em especial da Norma Técnica NBR 7095 da ABNT, ou sua sucessora.

Capacidade de corrente dos cabos para-raios – Considerando que o número e posição (altura e ângulo) já tenham sido determinados pelo estudo de desempenho a descarga atmosférica, restam outros itens que necessitam serem estudados e definidos para finalização do projeto dos cabos para-raios.

A suportabilidade a curto-circuito é um destes itens, principalmente próximo às subestações. Economicamente é justificado escolher um cabo para-raios de bitola maior, perto das subestações e um de bitola menor ao longo do restante da linha.

Outro ponto é a escolha da ligação do cabo para-raios a torre. O modo mais simples é o aterramento em todas as torres com a desvantagem de apresentar perdas maiores. A diminuição das perdas pode ser considerada com o tipo seccionado, isolado e aterrado no ponto central. Outra alternativa é o cabo isolado (quando para uso de comunicação) que requer várias transposições para diminuição de tensões induzidas. O requisito do edital é o seguinte:

Os cabos pára-raios – conectados ou não às malhas de aterramento das subestações terminais e ao sistema de aterramento das estruturas da linha – devem ser capazes de suportar, sem dano, durante o período de concessão da linha de transmissão, a circulação da corrente associada à ocorrência de curto-circuito monofásico franco em qualquer estrutura por duração correspondente ao tempo de atuação da proteção de retaguarda.

Definição da flecha máxima dos condutores – A determinação da flecha máxima ou altura mínima do condutor-solo é feita por meio de estudos de efeitos eletrostáticos.

O campo elétrico ao nível do solo, embaixo da linha de transmissão ou na faixa de passagem, é altamente influenciado pela tensão e pela configuração das fases (horizontal, delta ou vertical) e pela presença de condutores auxiliares nas proximidades.

Em certas regiões (por exemplo, travessias por rodovias), a redução do campo pode ser conseguida por intermédio de aplicação de cabos aterrados embaixo das linhas. Esta rede de cabos pode ser horizontal ou vertical. Pode-se ainda pensar em blindagem natural (árvores ou casas) e ainda linhas de menor nível de tensão (aplicável para linhas de Ultra Alta Tensão).



A seleção dos valores para projeto deve ser determinada a partir do estabelecimento de critérios para os seguintes aspectos: indução nos objetos, indução em pessoas, efeitos biológicos, ignição de combustível, corona de objetos aterrados e descargas elétricas. Em relação ao tópico de distância de segurança do condutor ao solo, o requisito estabelecido é o seguinte:

A linha de transmissão deve ser projetada de acordo com as prescrições da Norma Técnica NBR 5422, da ABNT, de forma a preservar, em sua operação, as distâncias de segurança nela estabelecidas. Devem ser previstas a circulação das capacidades de longa e de curta duração na linha de transmissão e a ocorrência simultânea das seguintes condições climáticas:

- (a) temperatura máxima média da região;*
- (b) radiação solar máxima da região; e*
- (c) brisa mínima prevista para a região, desde que não superior a um metro por segundo.*

Transposição – A decisão de transpor uma linha de transmissão depende basicamente dos fatores desbalanço, proteção, configuração da torre, compensação reativa, corrente de arco secundário e tensão induzida.

Um dos efeitos indesejáveis da linha de transmissão não transposta é o grau de desbalanço de sequência negativa e sequência zero. A corrente de sequência negativa (I^2) afeta os geradores (aquecimento no reator) e a corrente de sequência zero afeta os relés. Linhas de transmissão não transpostas produzem impedâncias desbalanceadas que devem ser levadas em conta no ajuste dos relés. Uma linha de transmissão não transporta influencia negativamente a corrente de arco secundário quando da utilização do religamento monopolar.

Na análise de linhas de transmissão em paralelo, especial atenção deve ser dada na escolha de compensação por reatores em derivação. Existe uma faixa de valores de MVAR que deve ser evitada, pois induz altos valores de tensão, devido à ressonância entre os circuitos. Se as linhas de transmissão forem transpostas, estas faixas são menores, tornando mais fácil a escolha otimizada da compensação reativa.

O intervalo da transposição é um objetivo do projeto a ser determinado a fim de se obter a transposição completa da linha. Entretanto, em alguns casos é conveniente investigar a possibilidade de realizar a transposição nas subestações intermediárias em lugar de realizá-la ao longo da linha de trans-

missão. Nesta situação, embora não se obtenha uma transposição completa, o desempenho pode ainda ser adequado no atendimento em nível desejado.

Para evitar estes problemas, o edital indica o seguinte requisito:

As linhas de transmissão de comprimento superior a 100 km devem ser transpostas com um ciclo completo de transposição, de preferência com trechos de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 do comprimento total.

Caso a linha não seja transposta, o desequilíbrio de tensão de seqüência negativa e zero deve estar limitado a 1,5% em vazio e a plena carga.

Linhas de transmissão em paralelo na mesma faixa ou em faixas contíguas ou linhas de circuito duplo, que necessitem ser transpostas, devem ter os ciclos de transposição com sentidos opostos.

Travessia de linhas sobre linhas de telecomunicação, dutos e outras linhas de transmissão – Em relação à indução magnética, a maior preocupação refere-se à indução de tensão ou correntes em objetos que estejam na vizinhança da linha de transmissão, por exemplo oleodutos, linhas de telecomunicações, outras linhas de transmissão, cercas etc.

A aproximação entre linhas de transmissão e linhas de telecomunicação pode causar perturbações no sinal telefônico transmitido e danos ao pessoal de manutenção. Desta forma, deve-se, quando da ocorrência de tais aproximações, avaliar as distâncias recomendáveis entre as duas linhas, de tal forma que o desempenho das linhas de telecomunicação esteja enquadrado dentro de limites aceitáveis. As tensões que causam distúrbios em sistemas de comunicação podem ser divididas em duas classes:

- *Tensão de perigo*: tensão induzida pela linhas de transmissão devido ao acoplamento indutivo, capacitivo e resistivo (ôhmico).
- *Tensão de ruído*: tensão induzida ponderada em frequência, para linhas telefônicas. Ela corresponde a uma tensão equivalente com a frequência de referência que, atuando no lugar da tensão induzida, causa o mesmo prejuízo à qualidade de transmissão.

A tensão de perigo origina-se dos acoplamentos indutivos e resistivos resultantes de correntes desequilibradas da linha de transmissão. Tal desequilíbrio adquire importância prática quando da ocorrência de faltas desequilibradas envolvendo a terra, em particular curtos-circuitos monofásicos.

A tensão de ruído surge da circulação de correntes harmônicas nas linhas de transmissão.



Pela existência de uma camada isolante que reveste os dutos, que apresenta uma tensão máxima de suportabilidade, cuidados devem ser tomados quando da aproximação de linhas de transmissão e dutos. Basicamente, a tensão imposta a este revestimento pode ser dividida em dois componentes. A primeira devido à força eletromotriz induzida pela linha quando da circulação de uma corrente desequilibrada originada por uma falta, e a segunda devido à elevação do potencial do solo pela dispersão da corrente de curto-circuito drenada pelas torres localizadas em cada travessia.

Estas tensões de solicitação devem ser calculadas para as condições mais desfavoráveis de desequilíbrio e dispersão de corrente pelo solo, ou seja, para um curto-circuito monofásico nas torres mais próximas ao duto em cada travessia.

A tensão induzida no duto devido ao acoplamento magnético deste com a linhas de transmissão depende, entre outros fatores, do ângulo de aproximação do duto em relação ao traçado da linhas de transmissão, da extensão do trecho do duto sob influência, da resistividade do solo ao longo da aproximação, da corrente de curto-circuito, dos parâmetros do duto. Este valor de tensão pode ser alterado pela presença ou não de juntas isolantes no duto, de cabos para-raios ou outros cabos enterrados ao longo do trecho de influência que funcionam como agentes de blindagem.

A elevação do potencial do solo provocada pela corrente de dispersão que flui pelo aterramento da torre de travessia é função da resistividade do solo, da magnitude da corrente de dispersão, do raio da esfera equivalente ligado às dimensões da base da torre, do posicionamento dos fios contrapeso, quando da realização do aterramento. Por meio da alteração das resistências de aterramento das torres situadas nas travessias e nas torres adjacentes a estas, pode-se diminuir o fluxo de corrente pelas torres de travessias, fazendo com que a corrente de falta seja desviada por intermédio dos cabos para-raios às torres adjacentes. Ao ser utilizado este artifício, deve-se verificar a capacidade dos cabos para-raios a serem instalados. Em relação a este item o edital requer:

A transmisora deve evitar ao máximo o cruzamento sobre linhas de transmissão existentes. Caso o cruzamento seja inevitável, a transmisora deve identificar esses casos, tanto nas entradas/saídas das subestações quanto ao longo do traçado das linhas de transmissão, e informar no projeto básico as providências que serão tomadas no sentido de minimizar os riscos inerentes a esses cruzamentos.

Coordenação de isolamento – Refere-se aos estudos que devem ser realizados para o dimensionamento dos espaçamentos em ar entre os condutores e a estrutura, do número de isoladores, ainda, para a definição da localização dos cabos para-raios, para atendimento de critérios de desempenho face a surtos atmosféricos, surtos de manobra e desempenho a 60 Hz (tensão máxima operativa).

A determinação do isolamento à tensão máxima operativa deve considerar os isoladores poluídos na presença de umidade. A configuração dos isoladores, distância de escoamento, forma e diâmetro têm efeito sobre a escolha apropriada do tipo a ser empregado. O edital apresenta os seguintes requisitos:

Isolamento à tensão máxima operativa

Para dimensionar o isolamento da linha de transmissão para tensão máxima operativa deve ser considerado o balanço da cadeia de isoladores sob ação de vento com período de retorno de, no mínimo, 30 (trinta) anos.

A distância de escoamento mínima da cadeia de isoladores deve ser determinada conforme a norma IEC 60815, considerando o nível de poluição da região de implantação da linhas de transmissão. Caso o nível de poluição da região seja classificado como inferior ao nível I – leve, a distância específica de escoamento deverá ser igual ou superior a 14 mm/kV eficaz fase-fase.

Deve ser garantida a distância de segurança entre qualquer condutor da linha e objetos situados na faixa de segurança, tanto para a condição sem vento quanto para a condição de balanço dos cabos e cadeias de isoladores devido à ação de vento com período de retorno de, no mínimo, 50 (cinquenta) anos. Na condição de balanço dos cabos e cadeias de isoladores devido à ação de vento, essa distância de segurança deve ser também garantida:

- ao longo de toda a linhas de transmissão, independentemente do comprimento do vão, mesmo que para tanto a largura da faixa de segurança seja variável ao longo da linhas de transmissão, em função do comprimento do vão; e*
- para qualquer topologia de terreno na faixa de segurança, especificamente quando há perfil lateral inclinado (em active).*

A determinação dos isolamentos da linhas de transmissão para fazer face aos surtos de manobra requer o conhecimento de uma série de tópicos, tais como métodos de cálculo e análise das sobretensões de manobra (ener-



gização, religamento, aplicação e abertura de faltas); métodos de controle (para-raios, resistores de pré-inserção nos disjuntores); curvas de suportabilidade do *gap* de ar frente às solicitações.

Laboratórios de alta tensão determinam a suportabilidade dos *gaps* de ar existentes numa estrutura, tais como janela da torre, fases laterais, condutor para terra, fase-fase etc. As correções, devido às condições atmosféricas e vento, também são levantadas.

Depois de coletados todos estes dados e realizadas as simulações, uma figura de mérito final é obtida, que é expressa em número de descargas esperadas. Se, por exemplo, o número for 0,001, então espera-se em média que para cada 1000 operações de manobra ocorrerá uma descarga em qualquer posição ao longo da linha.

Evidentemente a escolha deste número é um compromisso econômico, que envolve o custo da linha de transmissão, a confiabilidade esperada do sistema e equipamentos utilizados para controle das sobretensões, tais como resistores de pré-inserção, reatores shunt, para-raios de óxido de zinco. Com relação a este item, o edital apresenta os seguintes requisitos:

Isolamento para manobras. A sobretensão adotada no dimensionamento dos espaçamentos elétricos das estruturas deverá ser, no mínimo, igual à maior das sobretensões indicadas nos estudos de transitórios eletromagnéticos. Os riscos de falha (fase-terra e fase-fase) em manobras de energização e religamento devem ser limitados aos valores especificados.

A determinação do isolamento para descargas atmosféricas visa determinar o número e ângulo de blindagem dos cabos para-raios, avaliação do número de isoladores e aterramento das estruturas e as distâncias entre os condutores e cabos para-raios.

Sempre que possível, deve-se analisar os registros disponíveis das estações meteorológicas na região e os registros dos contadores de descargas instalados ao longo da rota.

Os estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas devem ser analisados para os diferentes fenômenos decorrentes da incidência de um raio: queda direta ou falha de blindagem, queda indireta e descarga no meio do vão. O edital considera os seguintes requisitos:

Desempenho a descargas atmosféricas: para os níveis de 345 e 500 kV, o número total de desligamentos por descargas atmosféricas deve ser inferior ou, no máximo, igual a um desligamento por 100 km por ano.

As estruturas deverão ser dimensionadas com pelo menos dois cabos pára-raios, dispostos sobre os cabos condutores de forma que, para o terreno predominante da região, a probabilidade de desligamento de um circuito, causado por descargas diretas nos cabos condutores, seja inferior a 0,01 desligamentos por 100 km por ano.

Emissão eletromagnética – Neste bloco devem ser considerados os efeitos de ruído audível, rádio interferência, TV interfência e corona visual.

Ruído audível – Ruído audível (RA) é o tópico relativo ao ruído randômico e o hum de 120 Hz faixa audível produzido em consequência da corona. Cinco importantes características do ruído audível devem ser lembradas com o objetivo de realizar análises de sensibilidade na procura do custo otimizado da linha de transmissão:

- RA é função do gradiente superficial a 60 Hz no condutor.
- RA é função da distribuição do gradiente a 60 Hz.
- RA é gerado durante tempo chuvoso.
- RA é localmente gerado não sendo transmitido ao longo das linhas de transmissão.
- RA é atenuado com a distância lateral.

Dadas estas características, as seguintes mudanças podem diminuir o RA (assumido que inicialmente o valor calculado era superior ao critério) com as consequentes desvantagens:

- Aumento do diâmetro do subcondutor (aumento do custo, peso e requisitos de suporte da torre e carregamento de vento).
- Aumento do número de subcondutores no feixe (aumento do peso, carregamento de vento).
- Tratamento especial da superfície do condutor (condutor não convencional).
- Feixe assimétrico (ferragens especiais, desbalanços de corrente).
- Aumento do espaçamento entre fases (aumento de solicitações da torre e aumento de faixa de passagem).
- Aumento da faixa de passagem (aumento da aquisição da terra).
- Variação do projeto da linhas de transmissão de acordo com o local (construção não padronizada).
- Variação da configuração básica da torre, horizontal, delta ou vertical:
 - *horizontal*: torre mais baixa, maior faixa de passagem, desbalanço elétrico moderado;



- *delta*: torre mais alta, menor faixa de passagem, menor desbalanço elétrico;
- *vertical*: torre mais alta ainda, menor faixa de passagem, e o maior desbalanço elétrico.

Sobre o ruído audível, o requisito do edital estabelece:

O ruído audível no limite da faixa de segurança deve ser, no máximo, igual a 58 dBA em qualquer uma das seguintes condições não simultâneas: durante chuva fina (0,00148 mm/min); durante névoa de 4 (quatro) horas de duração; ou durante os primeiros 15 (quinze) minutos após a ocorrência de chuva.

Rádio Interferência – Rádio Interferência (RI) é relacionado à interferência eletromagnética produzida pela corona na faixa de frequência de 535-1605 kHz. Embora RI seja um item de ruído ou interferência, a sua utilização como um fator de análise para o projeto de linha de transmissão é usualmente considerado como a relação sinal/ruído, que melhor indica a interferência em relação à grandeza do sinal da estação de rádio.

Assim como o ruído audível, a RI oferece diversas possibilidades para análise de variação de parâmetros na busca da solução otimizada da torre e condutor. Para isso, é importante lembrar cinco características básicas do RI:

- RI é função do gradiente superficial do condutor a 60 Hz.
- RI é função da distribuição do gradiente a 60 Hz.
- RI é máximo durante tempo chuvoso.
- RI consiste de sinais de ruídos gerado ao longo da linha.
- RI é atenuada com a distância lateral.

As mudanças necessárias para modificar um projeto que apresenta valores de RI superiores aos critérios estabelecidos são essencialmente equivalentes àquelas apresentadas para o ruído audível. Sobre este aspecto, é interessante notar que medidas realizadas no campo comprovaram uma forte correlação entre estas duas grandezas. O edital apresenta o seguinte requisito:

Rádio-interferência. A relação sinal/ruído no limite da faixa de segurança deve ser, no mínimo, igual a 24 dB, para 50% do período de um ano. O sinal adotado para o cálculo deve ser o nível mínimo de sinal na região atravessada pela linha de transmissão, conforme norma DENTEL ou sua sucessora.

TV Interferência – Relacionado à interferência eletromagnética gerado pelo efeito corona da linha nos canais de TV 2-6 (54-72 MHz e 76-88 MHz) e canais 7-13 (174-216 MHz).

A TV interferência não tem sido um fator limitante no projeto de linha. Entretanto, devido à grande utilização da televisão, é importante considerar a possibilidade de interferência quando o nível do sinal é baixo e quando o desempenho de corona governa o projeto.

Corona Visual – É um fenômeno relacionado com a perda de potência resultante da descarga elétrica no ar perto da superfície do condutor. Está acoplado ao tempo chuvoso e requer para o seu cálculo o conhecimento do gradiente superficial. De maneira geral, um projeto adequado do *bundle* para atendimento dos critérios de ruído audível e rádio interferência conduz a um desempenho razoável de perdas corona.

A produção de ozônio é ligada diretamente às perdas corona, mas os níveis produzidos no pior caso, mesmo para a tensão de 1200 kV, estão abaixo dos critérios adotados. O edital aponta como requisito:

Corona visual: A linha de transmissão, com seus cabos e acessórios, bem como as ferragens das cadeias de isoladores, não deve apresentar corona visual em 90% do tempo para as condições atmosféricas predominantes na região atravessada pela linha de transmissão.

Campo elétrico e magnético – O edital estabelece o seguinte:

Devem ser atendidas as exigências da Resolução Normativa ANEEL nº 398, de 23 de março de 2010, que regulamenta a Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz.

Conforme estabelecido pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP) e recomendado pela Organização Mundial de Saúde - OMS, os níveis de referência para exposição do público em geral e da população ocupacional a campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 Hz são apresentados no quadro a seguir:

	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μ T)
<i>Público em Geral</i>	4,17	83,33
<i>População Ocupacional</i>	8,33	416,67



As transmissoras devem realizar os cálculos baseados em metodologia consagrada, elaborando relatório que devem conter pelo menos, as seguintes informações:

- *nome da linha de transmissão;*
- *intensidade do campo elétrico (expresso em kV/m);*
- *intensidade do campo magnético (expresso em μT);*
- *tensão nominal da linha de transmissão;*
- *corrente nominal de projeto por fase;*
- *corrente máxima admissível por fase;*
- *número de fases;*
- *distância entre fases;*
- *especificação do cabo fase;*
- *especificação do cabo pára-raios;*
- *tipo de estrutura;*
- *configuração típica e seqüência de fases;*
- *número de circuitos por torre;*
- *número de condutores por fase;*
- *temperatura máxima admissível de projeto;*
- *largura da faixa de servidão;*
- *altura mínima dos condutores;*
- *extensão do vão da linhas de transmissão;*
- *tipo de rede (aérea ou subterrânea);*
- *subestação de origem da linha de transmissão (e o nome do município);*
- *subestação de destino da linha de transmissão (e o nome do município);*
- *a lista dos municípios atravessados pela linha de transmissão;*
- *método utilizado para calcular o campo elétrico;*
- *método utilizado para calcular o campo magnético;*
- *pontos calculados (informando a distância para a projeção do centro geométrico da linhas de transmissão ao solo).*

REQUISITOS MECÂNICOS

O edital apresenta diversos requisitos relacionados aos aspectos mecânicos de uma linha de transmissão, como por exemplo confiabilidade das estruturas, parâmetros de vento, cargas mecânicas sobre os cabos, cargas mecânicas sobre as estruturas, fadiga mecânica dos cabos. São os seguintes estes requisitos:

Confiabilidade – O projeto mecânico da linha de transmissão deve ser desenvolvido segundo a IEC 60826 – International Electrotechnical Commission: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines. O nível de confiabilidade do projeto eletromecânico, expresso pelo período de retorno do vento extremo, deve ser compatível com um nível intermediário entre os níveis 2 e 3 preconizados na IEC 60826. Deve ser adotado período de retorno do vento igual ou superior a 150 anos para linhas de transmissão de tensão nominal igual ou inferior a 230 kV e igual ou superior a 250 anos para linhas de transmissão de tensão superior a 230 kV.

Parâmetros de vento – Para o projeto mecânico de uma linha de transmissão, os carregamentos oriundos da ação do vento nos componentes físicos da linha de transmissão devem ser estabelecidos a partir da caracterização probabilística das velocidades de vento da região, com tratamento para fenômenos meteorológicos severos, tais como, sistemas frontais, tempestades, tornados, furacões, etc.

Os parâmetros explicitados a seguir devem ser obtidos a partir de dados fornecidos por estações anemométricas selecionadas adequadamente para caracterizar a região atravessada pela linha de transmissão:

- Média e coeficiente de variação (em porcentagem) das séries de velocidades máximas anuais de vento a 10 m de altura, com tempos de integração da média de 3 (três) segundos (rajada) e 10 (dez) minutos (vento médio);*
- Velocidade máxima anual de vento a 10 m de altura, com período de retorno correspondente ao vento extremo, como definido no item 1.2.4.1, e tempos de integração para o cálculo da média de 3 (três) segundos e 10 (dez) minutos. Se o número de anos da série de dados de velocidade for pequeno, na estimativa da velocidade máxima anual deve ser adotado, no mínimo, um coeficiente de variação compatível com as séries mais longas de dados de velocidades de ventos medidas na região;*
- Coeficiente de rajada para a velocidade do vento a 10 m de altura, referenciado ao tempo de integração da média de 10 (dez) minutos;*
- Categoria do terreno adotada para o local das medições;*
- No tratamento das velocidades de vento, para fins de dimensionamento, deve ser considerada a categoria de terreno definida na IEC 60826 que melhor se ajuste à topologia do corredor da linha de transmissão.*



Cargas mecânicas sobre os cabos – *O cabo deve ser dimensionado para suportar três estados de tracionamento – básico, de tração normal e de referência –, definidos a partir da combinação de condições climáticas e de envelhecimento do cabo como se segue:*

a) Estado básico

- *Para condições de temperatura mínima, a tração axial máxima deve ser limitada a 33% da tração de ruptura do cabo;*
- *Para condições de vento com período de retorno de 50 anos, a tração axial máxima deve ser limitada a 50% da tração de ruptura do cabo;*
- *Para condições de vento extremo, a tração axial máxima deve ser limitada a 70% da tração de ruptura do cabo.*

b) Estado de tração normal (EDS - everyday stress)

- *o assentamento final, à temperatura média, sem vento, o nível de tracionamento médio dos cabos deve atender ao indicado na norma NBR 5422. Além disso, o tracionamento médio dos cabos deve ser compatível com o desempenho mecânico no que diz respeito à fadiga ao longo da vida útil da linha de transmissão.*

c) Estado de referência

- *A distância mínima ao solo do condutor (clearance) deve ser verificada sem considerar a pressão de vento atuante.*

Cargas mecânicas sobre as estruturas – *O projeto mecânico de uma linha de transmissão deve ser desenvolvido segundo a IEC 60826. Além das hipóteses previstas na IEC, é obrigatória a introdução de hipóteses de carregamento que reflitam tormentas elétricas. Devem ser previstas necessariamente as cargas a que as estruturas estarão submetidas nas condições mais desfavoráveis de montagem e manutenção, inclusive em linha viva.*

Fadiga mecânica dos cabos – *Os dispositivos propostos para amortecer as vibrações eólicas devem ter sua eficiência e durabilidade avaliadas por ensaios que demonstrem sua capacidade de amortecer os diferentes tipos de vibrações eólicas e sua resistência à fadiga, sem perda de suas características de amortecimento e sem causar danos aos cabos. É de inteira responsabilidade da transmissora a elaboração de estudos, o desenvolvimento e a aplicação de sistema de amortecimento para prevenção de vibrações eólicas e efeitos relacionados com a fadiga dos cabos, de forma a garantir que estes não estejam sujeitos a danos ao longo da vida útil da linha de transmissão.*

REQUISITOS CIVIS – FUNDAÇÕES

O edital apresenta diversos requisitos relacionados aos aspectos civis de uma linha de transmissão, como por exemplo:

No projeto das fundações, para atender o critério de coordenação de falha, as solicitações transmitidas pela estrutura às fundações devem ser majoradas pelo fator mínimo 1,10. Essas solicitações, calculadas a partir das cargas de projeto da estrutura, considerando suas condições particulares de aplicação – vão gravante, vão de vento, ângulo de deflexão, fim de linha e altura da estrutura – passam a ser consideradas cargas de projeto das fundações.

As fundações de cada estrutura devem ser projetadas estrutural e geotécnicamente de forma a adequar todos os esforços resultantes de cada estrutura às condições específicas do solo.

As propriedades físicas e mecânicas do solo devem ser determinadas de forma reconhecidamente científica, de modo a retratar, com precisão, os parâmetros geomecânicos do solo. Tal determinação deve ser realizada a partir das seguintes etapas:

- *Estudo e análise fisiográfica preliminar do traçado da linha com a conseqüente elaboração do plano de investigação geotécnica;*
- *Estabelecimento dos parâmetros geomecânicos a partir do reconhecimento do subsolo com a caracterização geológica e geotécnica do terreno, qualitativa e quantitativamente;*
- *Parecer geotécnico com a elaboração de diretrizes técnicas e recomendações para o projeto.*

No cálculo das fundações, devem ser considerados os aspectos regionais geomorfológicos que influenciem o estado do solo de fundação, seja no aspecto de sensibilidade, de expansibilidade, seja de colapsividade, levando-se em conta a sazonalidade.

A definição do tipo de fundação, bem como o seu dimensionamento estrutural e geotécnico, deve considerar os limites de ruptura e deformabilidade para a capacidade de suporte do solo à compressão, ao arrancamento e aos esforços horizontais, valendo-se de métodos racionais de cálculo, incontestáveis e consagrados na engenharia geotécnica.

Corrosão eletrolítica – É de inteira responsabilidade da transmissora a elaboração de estudos para prevenção dos efeitos relacionados à corrosão em elementos da linha de transmissão em contato com o solo,



de forma a garantir a estabilidade estrutural dos suportes da linha de transmissão e o bom funcionamento do sistema de aterramento ao longo da vida útil da linha de transmissão.

Corrosão ambiental – Todos os componentes da linha de transmissão devem ter sua classe de galvanização compatível com a agressividade do meio ambiente, particularmente em zonas litorâneas e industriais.

Construção e Comissionamento

Para início da construção até o comissionamento, a transmissora deve apresentar cronograma de implantação das instalações de transmissão pertencentes a sua concessão, com a indicação das seguintes atividades: licenciamento ambiental, projeto básico, topografia, instalações de canteiro, fundações, montagem de torres, lançamento dos cabos condutores e instalações de equipamentos, obras civis e montagens das instalações e comissionamento, que permitam aferir, mensalmente, o progresso das obras e assegurar a entrada em operação comercial no prazo máximo estabelecido no contrato (em geral 24 meses).

Com base neste cronograma e de relatórios mensais emitidos pela transmissora, a ANEEL acompanhará o andamento da implantação.

Operação

A transmissora deverá integrar o ONS como agente de transmissão, com as responsabilidades e os encargos de mantenedora definidos nos termos do Estatuto do ONS e das demais normas aplicáveis.

A transmissora atuando como agente de transmissão e de acordo com o Contrato de Concessão deve dar livre acesso às suas instalações de transmissão, firmando Contratos de Conexão ao Sistema de Transmissão (CCTs) com os usuários que a ela se conectarem, os quais assumirão os encargos da conexão, nos termos da Lei nº. 9.074, de 1995, regulado pela Resolução ANEEL nº. 281, de 1º de outubro de 1999, alterada pela Resolução nº. 208, de 7 de junho de 2001.

A transmissora, para cumprimento desta função no sistema interligado nacional e para permitir a conexão de outra concessionária de transmissão ou de usuários, deverá:

- disponibilizar os estudos, projetos e padrões técnicos utilizados nas suas instalações;
- promover, em acordo com a concessionária acessante, a cessão de uso ou transferência de bens e instalações, com o objetivo de otimizar os investimentos e melhor caracterizar as respectivas responsabilidades pela sua operação e manutenção; e
- compartilhar instalações e infraestruturas existentes e permitir a edificação em áreas disponíveis, sem remuneração, caso já estejam sendo remuneradas pela receita anual permitida.

Remuneração do Ativo de Transmissão

A remuneração da disponibilidade do ativo linha de transmissão se dará mediante pagamento da Receita Anual Permitida (RAP) em 12 parcelas mensais na forma prevista no Contrato de Concessão e estabelecida nos seguintes contratos:

- CCI – Contrato de Compartilhamento de Instalações: contrato a ser celebrado entre duas ou mais concessionárias de transmissão, estabelecendo os procedimentos, direitos e responsabilidades para o uso compartilhado de instalações.
- CCT – Contrato de Conexão às Instalações de Transmissão: contrato que estabelece os termos e condições para a conexão dos usuários às instalações de transmissão, a ser celebrado entre a transmissora e cada usuário.
- CCG – Contrato de Constituição de Garantia: contrato a ser celebrado entre o usuário, o ONS e as concessionárias de transmissão representadas pelo ONS, para garantir o recebimento dos valores devidos pelos usuários às concessionárias de transmissão e ao ONS pelos serviços prestados.
- CPST – Contrato de Prestação de Serviços de Transmissão: contrato a ser celebrado entre o ONS e a concessionária de transmissão, que estabelece os termos e condições para prestação de serviço público de transmissão de energia elétrica aos usuários, por uma concessionária detentora de instalações de transmissão pertencentes à rede básica, sob administração e coordenação do ONS.
- CUST – Contrato de Uso do Sistema de Transmissão: contrato a ser celebrado entre o ONS, a concessionária de transmissão e os usuários, que estabelece os termos e condições para o uso da rede básica por



um usuário incluindo a prestação do serviço público de transmissão pelas concessionárias de transmissão, mediante controle e supervisão do ONS e a prestação, pelo ONS, dos serviços de coordenação e controle da operação dos sistemas elétricos interligados.

Manutenção

É de responsabilidade da transmissora a manutenção das instalações de transmissão, de tal forma a garantir a maior disponibilidade destas, fornecendo ao ONS as informações necessárias, definidas nos Procedimentos de Rede, de modo a possibilitar o desenvolvimento de suas ações de coordenação, supervisão e controle da operação.

A manutenção da linha e das subestações terminais é de extrema importância, pois as indisponibilidades são contabilizadas e afetam diretamente o faturamento da empresa.

Estes procedimentos de contabilização são detalhados no Contrato de Prestação de Serviço de Transmissão, onde é relevante indicar os seguintes itens:

- *Pagamento Base: Parcela equivalente ao duodécimo da Receita Anual Permitida associada à plena disponibilização das instalações de transmissão que compõem uma função transmissão;*
- *Parcela Variável por Indisponibilidade – PVI: Parcela a ser deduzida do pagamento base por desligamentos programados ou outros desligamentos decorrentes de eventos envolvendo o equipamento principal e/ou os complementares da função transmissão, de responsabilidade da transmissora;*
- *Parcela Variável por Restrição Operativa Temporária – PVROT: Parcela a ser deduzida do pagamento base por restrição operativa temporária existente na função transmissão, de responsabilidade da transmissora, que resulte na redução da(s) capacidade(s) operativa(s) da própria função transmissão;*
- *A transmissora deverá submeter ao ONS os seus Planos de Manutenção, contemplando os serviços de manutenção que tenham influência sistêmica, cabendo ao ONS compatibilizá-los com os Planos de Manutenção das demais concessionárias de transmissão, geração e distribuição, a fim de adequá-los às conveniências operativas e de segurança do sistema, também de acordo com os procedimentos de rede.*

Comentários Gerais

O desafio mais significativo dos técnicos envolvidos com as diversas etapas de implantação de linhas de transmissão é a determinação do projeto mais econômico no atendimento aos diversos requisitos, critérios e restrições.

Todos os parâmetros examinados anteriormente devem ser reunidos de maneira lógica e tratados de forma integrada na procura do projeto global otimizado.

Existem diversas tentativas de estabelecer o caminho lógico por meio da elaboração de fluxogramas. Dependendo das variáveis envolvidas e dos seus inter-relacionamentos, em geral estes fluxogramas se tornam bastantes complexos.

Mesmo assim, é relevante apresentar esta visão global dos aspectos relacionados às linhas de transmissão, de maneira a facilitar o entendimento do projeto de prospecção e hierarquização das inovações tecnológicas que será detalhado nos capítulos seguintes.

Referências

Edital da ANEEL nº 001/2010 – ANEEL. *Licitação para a contratação de serviço público de transmissão de energia elétrica, mediante outorga de concessão, incluindo a construção, a operação e a manutenção das instalações de transmissão da rede básica do sistema interligado nacional*. Brasília, maio de 2010.

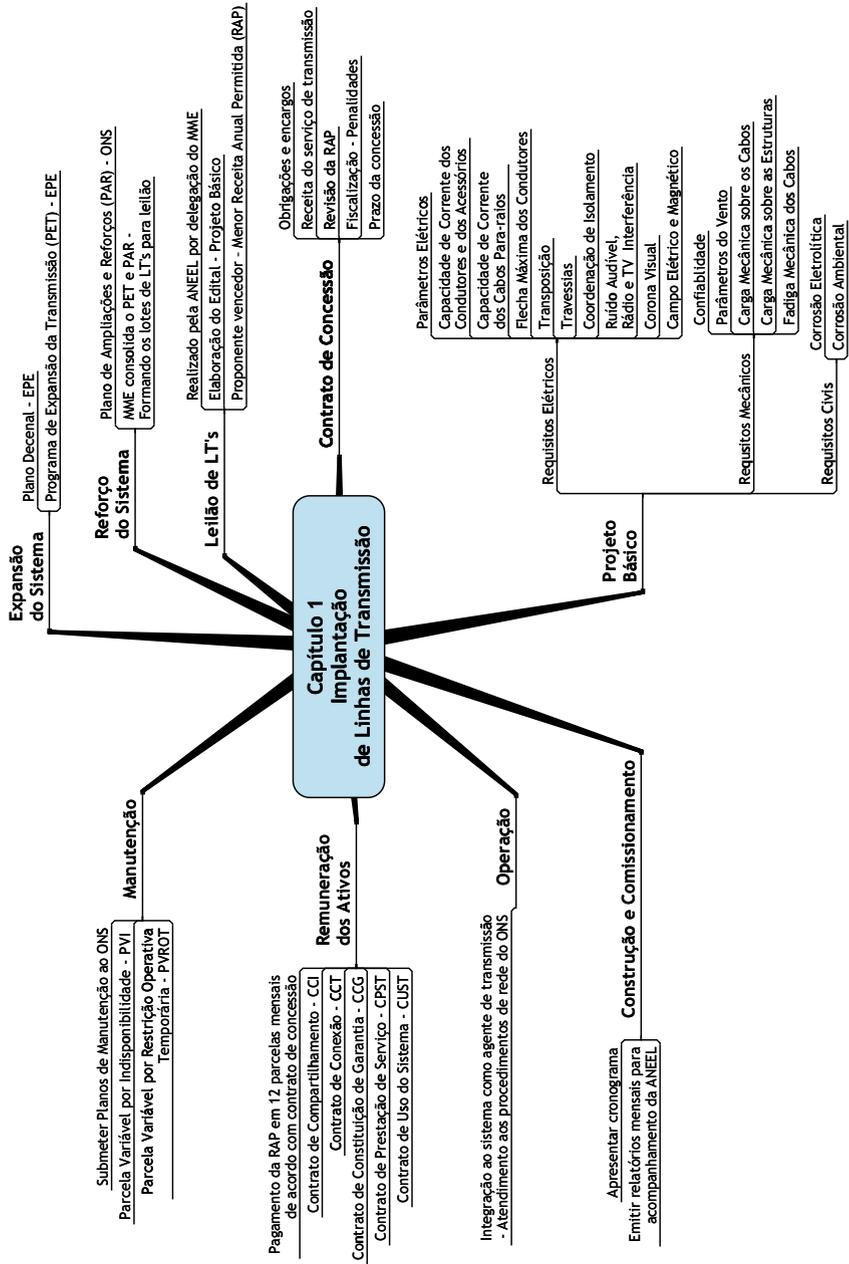
CARVALHO, D.S.; ESMERALDO, P.C.V. *O planejamento da transmissão como Indutor de novas tecnologias*. XX SNPTEE. Recife: 2009.

DÁJUZ, A.; FONSECA, C.S.; CARVALHO, F.M.S.; AMON, J.; NORAS DIAS, L.E.; PEREIRA, M.P.; ESMERALDO, P.C.V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S.O. *Transitórios elétricos e coordenação de isolamento. Aplicação em sistemas de potência de alta tensão*. Niterói: EDUFF: 1987.

NORAS DIAS, L.E.; PEREIRA, M.P.; FRONTIN, S.O. *Tensões Induzidas na Linha Cachoeira Paulista – Adrianópolis: 500 kV – CIER – 1980*.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *Transmission Line Reference Book. 345 kV and Above*. Second Edition. Palo Alto – Estados Unidos: 1982.

TEIXEIRA J.S., FRONTIN S.O. *Estudo de correntes em cabos pára-raios durante curtos monofásicos nas linhas de transmissão do sistema de Furnas*. IV SNPTEE: 1977.





CAPÍTULO 2

Planejamento e Custos de Linhas de Transmissão

Arnoldo Rodrigo Saavedra
Sergio de Oliveira Frontin



PREFÁCIO

Paulo César Vaz Esmeraldo

O planejamento da expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) consiste em se definir novas instalações de geração e transmissão, necessárias para se atender ao crescimento dos requisitos do mercado, segundo critérios de garantia de suprimento pré-estabelecidos, de forma ambientalmente sustentável e minimizando os custos totais esperados de investimento, inclusive socioambientais, e de operação.

Assim, constitui função da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entre outras, realizar os estudos de planejamento para a definição da melhor alternativa de expansão da rede de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), cotejando sob o ponto de vista técnico, econômico e socioambiental, as diferentes alternativas de expansão para cada área de atendimento do sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro e verificando a compatibilidade desta alternativa com o conjunto de ampliações previstas nos estudos de avaliação do Plano Decenal de Energia (PDE). O programa das instalações de transmissão resultante será determinativo num horizonte de até 5 anos à frente, e uma proposta indicativa do 6º ao 10º ano.

A EPE, portanto, elabora o Programa de Expansão da Transmissão (PET) que contém as instalações de Rede Básica dos cinco anos à frente, tomando como referência as análises dos estudos de planejamento dos sistemas regionais, os estudos de integração de novas usinas e as consultas de acesso dos Agentes de Geração e Consumidores Livres.

Considerando a data de entrada em operação de cada instalação de transmissão da Rede Básica e a necessidade da outorga de sua concessão por meio de um processo de licitação ou autorização, a EPE procede aos estudos e elabora, com apoio dos concessionários, relatórios correspondentes



para os empreendimentos, a fim de fornecer os subsídios para o processo licitatório de outorga.

Estas novas instalações a serem integradas à Rede Básica deverão, então, ser recomendadas por estudos de planejamento, projetadas em observância aos Critérios de Planejamento e aos Procedimentos de Rede e respaldadas pelos respectivos estudos técnicos e econômicos, visando subsidiar o correspondente processo de licitação de concessão ou de autorização. Em se tratando de instalações de transmissão que sejam objeto de licitações para outorga de concessão, deve ser encaminhado para o Ministério de Minas e Energia (MME) um conjunto de documentos relacionados às instalações, que deem suporte à agência reguladora ANEEL na preparação dos processos licitatórios cabíveis.

O processo de planejamento da transmissão se inicia com uma fase preliminar, em que o novo empreendimento ou ampliação surge como a melhor alternativa para equacionar uma necessidade do sistema, identificada nos estudos. Essa alternativa é incorporada ao Programa Decenal de Energia (PDE) ou mesmo ao Programa de Expansão da Transmissão (PET), dependendo do ano em que o empreendimento é necessário ao sistema.

Um aspecto a destacar é que sistemas de transmissão de grande porte possuem relativa flexibilidade locacional, podendo, entretanto, atravessar uma grande diversidade de ambientes naturais e antropizados. Visando à internalização dos aspectos socioambientais, desde as etapas preliminares de planejamento, o enfoque mais indicado para a definição da melhor localização dos sistemas elétricos é aquele que parte de uma visão mais estratégica e abrangente integrando os aspectos de engenharia, construtivos e socioambientais.

É importante ressaltar que o planejamento sofre revisões cíclicas, e um empreendimento que conste hoje no Programa Decenal de Energia poderá sofrer modificações ou mesmo substituição devido a alterações no programa de geração, mercado ou mesmo de outras premissas.

Quando, entretanto, um empreendimento da Rede Básica consta do Programa de Expansão da Transmissão (PET) e a data de entrada em operação recomendada está cerca de três anos à frente, é chegado, então, o momento de preparar a documentação para o processo de outorga.

O processo de documentação para a outorga de uma nova instalação a ser integrada à Rede Básica passa por quatro fases distintas: a demonstração de sua viabilidade técnico-econômica e socioambiental documentado no relatório denominado R1; o detalhamento técnico da alternativa de referência documentado no relatório denominado R2; a caracterização e análise so-

cioambiental do corredor selecionado para o empreendimento, documentadas no relatório denominado R3; e, por último, a definição dos requisitos do sistema circunvizinho, de forma a assegurar uma operação harmoniosa entre o novo empreendimento e as instalações existentes, documentado no relatório denominado R4.

Caso as análises, no âmbito dos relatórios R2 e R3, indiquem modificações nas instalações de transmissão da alternativa de referência, estabelecida no R1, este relatório deverá sofrer os ajustes necessários para consolidar a alternativa de referência em todas as fases de planejamento.

Os estudos de viabilidade técnico-econômica e socioambiental, caracterizados no Relatório R1, devem proceder a uma análise demonstrando a sua competitividade frente a outras alternativas e estabelecendo as características básicas preliminares das instalações do empreendimento, bem como uma expectativa de seu custo, baseado em referências de custos modulares utilizadas no planejamento.

As principais alternativas selecionadas com base nas análises de viabilidade técnico-econômica também devem ser comparadas considerando os aspectos socioambientais das alternativas, de maneira integrada aos demais aspectos técnicos, ficando demonstrado que estes aspectos não restringem nem oneram significativamente as suas implantações.

Ressalta-se que, dependendo do porte, das características do empreendimento em consideração, da topologia e da complexidade do sistema elétrico na região em análise, alguns dos estudos podem merecer uma maior ênfase em relação aos demais.

A alternativa selecionada por meio dos estudos de planejamento é, então, objeto de detalhamento de suas características técnicas, Relatório R2, de modo a permitir à ANEEL a preparação do Edital de Licitação correspondente. Deve-se enfatizar que o detalhamento do empreendimento visa assegurar a sua exequibilidade sob o ponto de vista técnico sem, no entanto, se constituir em um projeto básico, normalmente conduzido pelos agentes ganhadores dos leilões.

Os estudos relacionados a esta fase devem prover as informações necessárias para estabelecer as características técnicas das novas instalações de transmissão e as adequações das instalações existentes da Rede Básica. Neste sentido, os estudos devem abranger análise de transitórios eletromagnéticos, bem como análises específicas referentes à definição das características elétricas básicas de linhas de transmissão, subestações, unidades transformadoras, compensações de potência reativa série e em derivação (banco de capacitores série e compensador estático).



Para que uma nova instalação seja licitada, faz-se, ainda, necessário prover as informações da viabilidade de execução da obra, também do ponto de vista socioambiental. Para tal, deve ser feita uma avaliação das possíveis dificuldades, caracterizadas no Relatório R3, a serem solucionadas pelo proponente vencedor da licitação ou pelo agente autorizado a implantar a nova instalação.

Estes estudos envolvem a caracterização socioambiental do corredor de passagem selecionado nos estudos realizados para a elaboração do R1. A análise dos aspectos ambientais do corredor deve permitir a identificação dos pontos de destaque, sob a ótica socioeconômica e ambiental, que possam aportar maior complexidade para a implantação da linha de transmissão, refletindo-se em maiores custos ambientais e maiores prazos no processo de licenciamento do empreendimento. Observa-se que esta avaliação servirá de subsídio aos estudos necessários ao futuro licenciamento ambiental.

Reitera-se aqui a importância da avaliação prévia da solução proposta, conduzida pela EPE na fase inicial de planejamento, sob a ótica socioambiental. Tal prática irá minimizar, ou mesmo evitar, que restrições desta natureza sejam identificadas tardiamente, impondo custos adicionais ao projeto ou mesmo inviabilizando-o. Neste caso, ter-se-ia que reavaliar a viabilidade econômica do empreendimento e, eventualmente, buscar outra solução, o que, certamente, contribuirá para atrasos no cronograma de implantação.

Dando prosseguimento ao processo de outorga, o Relatório R4 deve requisitar aos concessionários de transmissão, proprietários das instalações que serão compartilhadas ou que serão adjacentes a uma nova subestação, o fornecimento das características técnicas de suas instalações e requisitos necessários para que o novo empreendimento venha a operar de forma harmoniosa com o sistema circunvizinho.

Do exposto, ficam caracterizadas as diversas fases do processo atual de planejamento da expansão da transmissão em curso no Brasil, e melhorias neste procedimento ainda se fazem necessárias, visando dar maior celeridade e objetividade ao processo. A busca dessas melhorias deve sempre ser vista como uma tarefa incansável e estar sempre entre as principais prioridades do setor elétrico brasileiro.

Planejamento e Custos de Linhas de Transmissão

Arnoldo Rodrigo Saavedra
Sergio de Oliveira Frontin

Objetivo

O objetivo deste capítulo é apresentar as características básicas das linhas de transmissão existentes e planejadas, incluindo informações sobre os investimentos futuros em sistemas de transmissão. As características básicas referem-se principalmente aos níveis de tensão, comprimentos e custos totais e parciais por unidade de comprimento.

As informações sobre as linhas de transmissão existentes foram consolidadas a partir de relatórios do planejamento de curto prazo do ONS (Operador Nacional do Sistema), de documentos da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e da EPE (Empresa de Pesquisa Energética). As informações sobre as linhas de transmissão planejadas foram obtidas no Plano Decenal publicado pela EPE.

Sistema Interligado Nacional

A figura a seguir apresenta o Sistema Interligado Nacional com a indicação das principais linhas existentes e planejadas no país. É relevante apontar o futuro sistema de transmissão de corrente contínua de 600 kV entre Porto Velho e Araraquara, projetado para a transferência de energia das usinas de Jirau e Santo Antônio para os centros de carga.



DIAGRAMA GERAL DA REDE DE LINHA DE TRANSMISSÃO DO SIN – SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL



Identificação das Necessidades de Transmissão da Rede Básica

A identificação das necessidades de transmissão da Rede Básica é determinada pela EPE (Programa de Expansão da Transmissão – PET – e Plano Decenal) e pelo ONS (Plano de Ampliações e Reforços – PAR). Com base nessa identificação, consolidada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), a ANEEL prepara as licitações das novas instalações de transmissão.

O PET, elaborado pela EPE após estudos de planejamento de longo prazo, e o PAR, elaborado pelo ONS após estudos das necessidades de curto prazo da rede elétrica, indicam as linhas de transmissão e subestações necessárias

para a adequada prestação dos serviços de transmissão de energia elétrica pela Rede Básica (RB) do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O PAR e o PET são consolidados sob condução do MME, o que resulta num conjunto de empreendimentos de transmissão necessário para o atendimento da geração e da carga do SIN, e para o adequado desempenho do sistema no período considerado.

No que concerne ao setor elétrico, os principais papéis na expansão do sistema de energia elétrica pertencem aos agentes de geração e transmissão responsáveis pelos investimentos e aos agentes de distribuição responsáveis pela contratação da parcela de energia, com antecedência necessária à implantação dos novos empreendimentos.

Para o setor elétrico, o planejamento decenal tem, portanto, a função de orientar e subsidiar a realização dos futuros leilões de compra de energia; de novos empreendimentos de geração e de transmissão; a definição de quais estudos de expansão da transmissão devem ser priorizados, estudos de viabilidade técnico-econômica e socioambiental de novas usinas geradoras e, ainda, quais estudos de inventários deverão ser feitos ou atualizados.

Extensão das Linhas de Transmissão em Operação

Apresentam-se a seguir informações que mostram as extensões das linhas de transmissão por nível de tensão. Observam-se algumas diferenças entre as informações de extensão das linhas de transmissão, pois, além da Rede Básica, por vezes também são incluídas outras redes elétricas interligadas.

A tabela seguinte mostra as extensões das linhas de transmissão da Rede Básica e da Rede Complementar por nível de tensão para os anos 2001 a 2008.

As linhas de transmissão com tensão de 500 kV apresentam o maior aumento em extensão (cerca de 82% no período). As linhas de 138 e 230 kV tiveram menores acréscimos, mas continuam com as maiores extensões.



EXTENSÃO EM KM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO EM OPERAÇÃO DA REDE BÁSICA E DA REDE COMPLEMENTAR

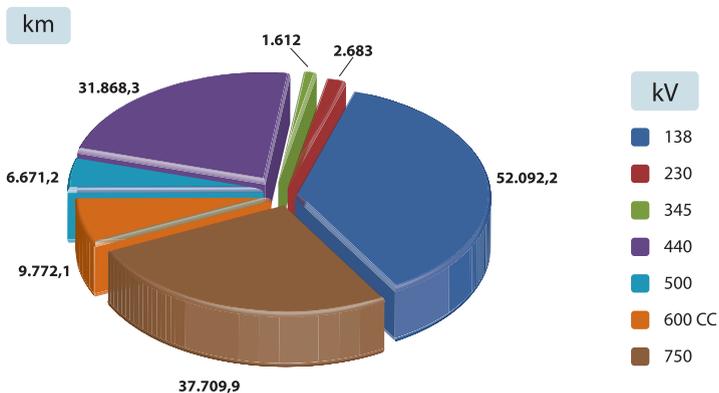
Tensão (kV)	ANO							
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
138	51.301,9	51.658,6	51.709,0	51.523,2	52.019,0	51.970,9	52.019,2	52.092,2
230	32.537,3	32.997,4	33.999,7	35.073,8	35.736,5	36.342,5	37.155,5	37.709,9
345	9.023,5	9.021,0	9.021,0	9.047,0	9.579,1	9.579,1	9.772,1	9.772,1
440	6.667,5	6.667,5	6.667,5	6.667,5	6.667,5	6.671,2	6.671,2	6.671,2
500	17.510,1	19.525,2	23.659,0	24.924,4	26.771,1	29.341,2	29.392,2	31.868,3
600 CC	1.612,0	1.612,0	1.612,0	1.612,0	1.612,0	1.612,0	1.612,0	1.612,0
750	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0
TOTAL	121.335,3	124.164,6	129.351,1	131.530,9	135.068,2	138.199,8	139.305,1	142.408,6

Nota: Os valores acima se referem à Rede Básica (instalações com tensão maior ou igual a 230 kV) mais as linhas de transmissão da Rede Complementar (DITs, conexões de usinas e interligações internacionais ligadas diretamente à Rede Básica). As linhas de transmissão de 138 kV correspondem a informações dos agentes com as adições da rede complementar. Fonte: ONS.

O gráfico abaixo mostra a distribuição das linhas de transmissão da tabela anterior, por nível de tensão, para o ano 2008.

DISTRIBUIÇÃO DAS EXTENSÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO POR NÍVEL DE TENSÃO PARA O ANO 2008

Participação por Nível de Tensão em km em 2008



Fonte: EPE (Plano Decenal 2019).

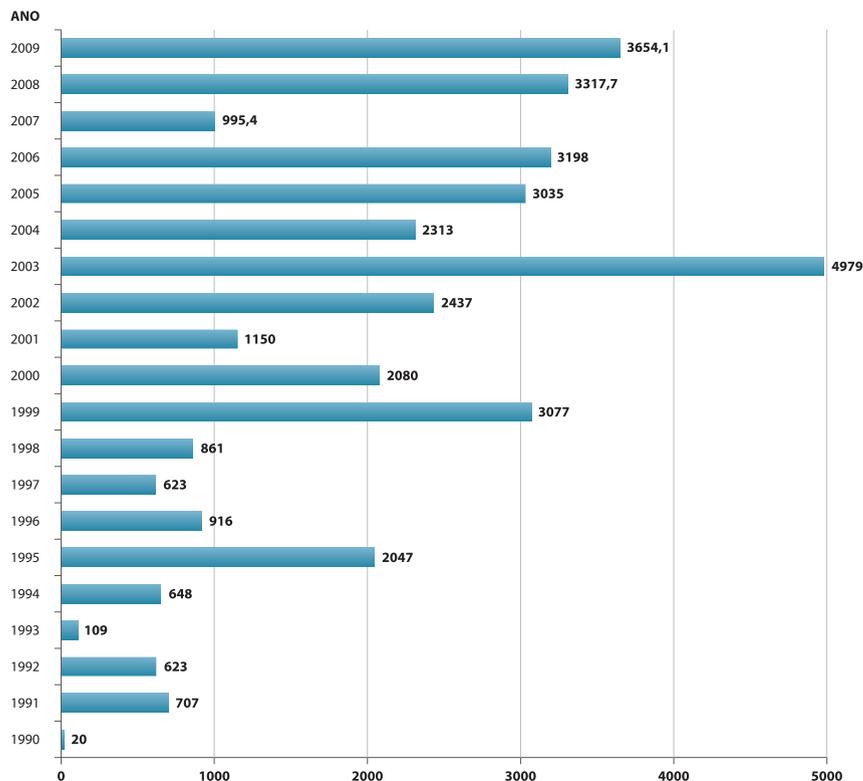
O gráfico a seguir mostra a evolução dos acréscimos na extensão de linhas de transmissão da Rede Básica por nível de tensão para os anos de 1990 a 2009.

Analisando o período 1990–1998, verifica-se um acréscimo total de 6.554 km com uma média anual de crescimento 728 km. Por outro lado, o período 1999 – 2009 apresentou um acréscimo total de 30.236 km com média anual de 2.748 km.

REDE BÁSICA DE TRANSMISSÃO

Acréscimos anuais de LT's em km

Fonte: ANEEL (com adição dos anos 2008 e 2009).



Extensão de Linhas de Transmissão Planejadas

A próxima tabela mostra os comprimentos de linha de transmissão por nível de tensão para os anos 2009 a 2013, considerando os projetos já autorizados e com datas previstas de entrada em serviço, incluindo o sistema de transmissão das usinas do Rio Madeira, onde se considerou dois bipolos de Corrente Contínua de 600 kV de 2.375 km cada em adição aos dois bipolos de 806 km da Usina de Itaipu.



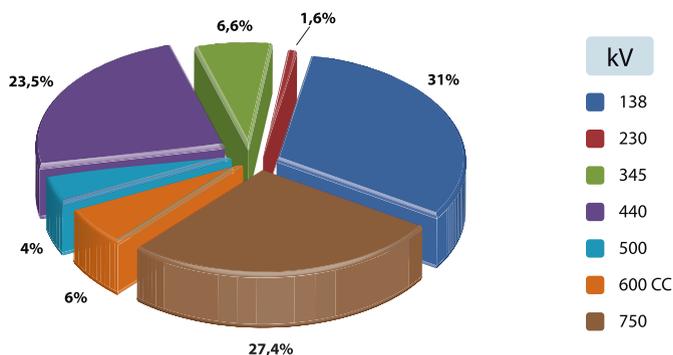
EXTENSÃO EM KM DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO COM A INCLUSÃO DAS LINHAS JÁ AUTORIZADAS DA REDE BÁSICA E DA REDE COMPLEMENTAR

Tensão (kV)	ANO				
	2009	2010	2011	2012	2013
138	52.097,9	52.305,4	52.365,4	52.365,4	52.365,4
230	38.643,5	42.787,6	46.141,5	46.236,1	46.236,1
345	9.772,1	9.987,4	10.164,6	10.164,6	10.164,6
440	6.671,2	6.685,2	6.707,0	6.707,0	6.707,0
500	33.192,4	34.520,7	38.717,3	39.359,3	39.659,3
600 CC	1.612,0	1.612,0	1.612,0	6.362,0	10.962,0
750	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0
TOTAL	144.672,0	150.581,2	158.390,7	163.877,4	168.777,4

Nota: Os valores acima se referem à Rede Básica (instalações com tensão maior ou igual a 230 kV) mais as linhas da Rede Complementar (DITs e de conexões de usinas e interligações internacionais ligadas diretamente à rede básica). As linhas de transmissão de 138 kV correspondem a informações dos agentes com as adições da Rede Complementar. O ano de 2009 considera linhas de transmissão em serviço na data da tabela mais as previstas até o final do ano. Fonte ONS.

No gráfico seguinte, mostra-se a distribuição percentual das linhas de transmissão para o ano 2013 por nível de tensão.

DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS LT'S DA REDE BÁSICA E DA REDE COMPLEMENTAR PREVISTAS PARA O ANO DE 2013



Fonte: EPE (Plano Decenal 2019).

A tabela seguinte apresenta a estimativa da evolução física dos sistemas de transmissão no período 2010-2019, relativamente à extensão das linhas de transmissão (km) por nível de tensão para a rede básica.

Nota-se que as linhas de transmissão de 500 kV continuam tendo uma evolução bastante importante. Além da inclusão do sistema de corrente contínua do Rio Madeira, foi adicionada a alternativa de um possível sistema de corrente contínua para a usina de Belo Monte com extensão total de 4.600 km.

ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO FÍSICA DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO NO PERÍODO 2010-2019

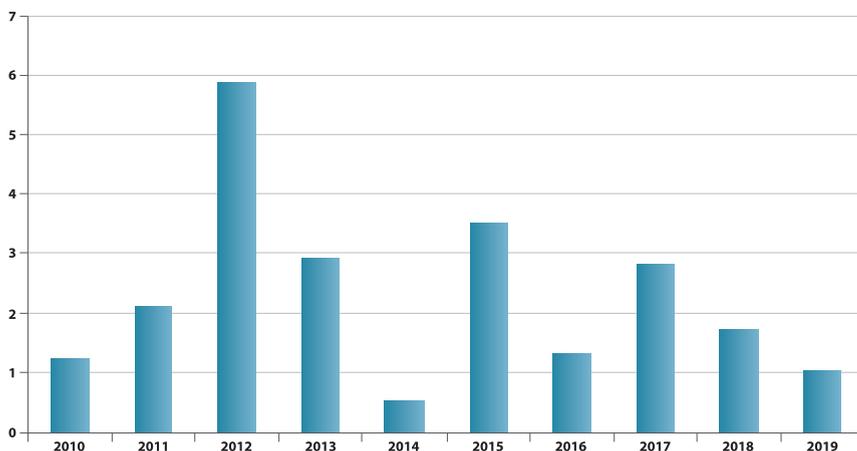
	Tensão						TOTAL
	750 kV	± 600 kV	500 kV	440 kV	345 kV	230 kV	
Evolução 2010-2019	–	9.350	16.146	17	538	10.746	36.797
Estimativa 2019	2.683	10.962	49.653	6.808	9.932	52.326	132.364

Fonte: EPE (Plano Decenal 2019).

Investimentos para as Linhas de Transmissão Planejadas

As estimativas de investimentos totais anuais para o período 2010-2019 são mostradas no gráfico seguinte.

ESTIMATIVA DE INVESTIMENTOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO (EM BILHÕES DE R\$)

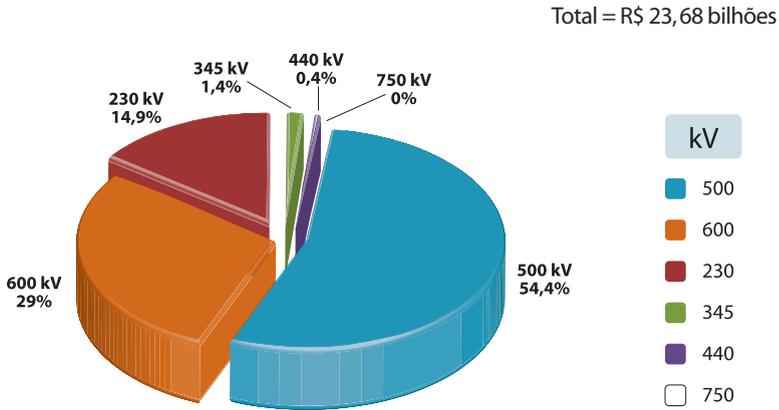


Fonte: EPE (Plano Decenal 2019).



Os investimentos por nível de tensão são mostrados na figura seguinte, com base no valor acumulado neste mesmo período.

**ESTIMATIVA DE INVESTIMENTO TOTAL EM LINHAS DE TRANSMISSÃO,
POR NÍVEL DE TENSÃO NO PERÍODO 2010 – 2019**



Fonte: EPE (Plano Decenal 2019).

Orçamento Simplificado de Linhas de Transmissão

O contrato de concessão do empreendimento de transmissão exige a apresentação de um orçamento que deve consistir, única e exclusivamente, como referência utilizada pela transmissora para a implantação das instalações de transmissão. O modelo para este orçamento é indicado a seguir, considerando as etapas de engenharia, materiais, construção e montagem.

Este orçamento simplificado disponível nos contratos de concessão das linhas licitadas pela ANEEL, desde o ano 2000 até o presente, pode ser utilizado para estabelecer faixas de valor por nível de tensão, tanto para as Receitas Anuais Permitidas (RAP), como para os diversos componentes das linhas de transmissão. Observa-se que estes orçamentos dependem das características de cada linha especificada no edital de licitação.

Médias dos Custos de Linha de Transmissão Construídas nos Últimos Anos

A seguir, apresenta-se uma tabela-resumo dos custos totais e parciais das principais linhas da Rede Básica construídas nos últimos anos. Os valores desta tabela são valores médios obtidos a partir dos orçamentos dos vários contratos de concessão, sendo efetuada atualização de acordo com as taxas mensais do IPCA. Observa-se que estes custos médios permitem uma visão geral da composição dos custos dos principais níveis de tensão de linha de transmissão que atualmente estão sendo construídas no Brasil. Entretanto, adverte-se que, para orçamentos mais detalhados e de maior exatidão, devem ser utilizados os custos referenciais da ANEEL, os quais permitem diferenciar os custos das linhas de transmissão segundo suas características principais, tais como composição de feixes de condutores, bitolas, tipos de estruturas, regiões do país etc. Por outro lado, os custos modulares da Eletrobrás podem ser utilizados para estudos comparativos de alternativas de transmissão.

CUSTOS POR NÍVEL DE TENSÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO (R\$/KM)

TENSÃO	230 kV CS	%	230 kV CD	%	500 kV CS	%	500 kV CD	%	±600kVcc	%
Projeto	6079,33	1,96	7955,77	1,86	4178,87	0,78	6371,968	0,49	1816,842	0,24
Levantamento topográfico	3221,64	1,04	2123,20	0,50	3228,46	0,60	4036,164	0,31	2578,947	0,35
Sondagens	1096,05	0,35	2099,86	0,49	917,13	0,17	2758,381	0,21	1067,368	0,14
Meio ambiente/fundiário	16069,93	5,18	12450,04	2,91	12721,14	2,38	35088,79	2,70	37023,15	4,97
TOTAL ENG.	26466,94	8,53	24628,87	5,76	21045,61	3,93	48255,31	3,72	42486,31	5,71
Suporte Estruturas	54025,47	17,42	54770,45	12,82	83513,50	15,61	239535,3	18,46	98783,16	13,27
Suporte Fundações	14473,63	4,67	6073,78	1,42	4169,15	0,78	6175,199	0,48	4273,684	0,57
Cabo condutor	66838,68	21,55	151605,85	35,47	167218,49	31,25	393253,4	30,30	291905,3	39,21
Cabo para-raios	15526,63	5,01	8523,54	1,99	16551,71	3,09	20005,43	1,54	15877,89	2,13
Contrapesos	2369,43	0,76	1324,34	0,31	6769,79	1,27	5738,438	0,44	1825,474	0,25
Ferragens cadeias	7670,68	2,47	41958,60	9,82	12724,40	2,38	38001,98	2,93	19146,14	2,57
Isoladores	7859,09	2,53	8302,97	1,94	15189,07	2,84	30468,09	2,35	21247,13	2,85
Espaçador (amortec)	4454,79	1,44	7318,51	1,71	5157,27	0,96	4478,302	0,35	8014,737	1,08
Acessórios	3898,10	1,26	2692,32	0,63	10454,51	1,95	5762,081	0,44	20282,11	2,72
TOTAL MATERIAL	177116,49	57,09	282570,36	66,12	321747,89	60,14	743418,2	57,28	481355,6	64,65
Faixa de servidão e acessos	12610,03	4,06	13055,49	3,05	23638,68	4,42	104392,5	8,04	20751,58	2,79
Execução fundações	27892,64	8,99	25396,09	5,94	74150,78	13,86	209915,2	16,17	57486,32	7,72
Montagem e suportes	18194,83	5,87	39580,60	9,26	37139,06	6,94	94255,4	7,26	42915,39	5,76
Instalação cabos e acess.	25040,29	8,07	10962,41	2,56	35803,95	6,69	41407,94	3,19	56952,63	7,65
Instal. Contrapeso (aterr.)	5342,12	1,72	1211,13	0,28	4070,01	0,76	18418,96	1,42	5893,684	0,79
TOTAL CONSTR. E MONT.	89079,90	28,72	90205,73	21,11	174802,48	32,67	468389,9	36,09	183999,6	24,71
Adminstre e Fiscaliz.	12993,77	4,19	8439,65	1,97	10734,44	2,01	22507,3	1,73	23219,31	3,12
Eventuais	4563,69	1,47	21543,94	5,04	6690,87	1,25	15270,85	1,18	13473,68	1,81
TOTAL GERAL	310220,79	100,00	427388,55	100,00	535021,30	100,00	1297842	100,00	744534,5	100,00

CS – Circuito Simples
CD – Circuito Duplo

Fonte: ANEEL



Banco de Preços da ELETROBRÁS

O banco de preços de linhas de transmissão da Eletrobrás, conhecido como Custos Modulares (2004) ou Referências de Custos de linha de transmissão e subestações de alta tensão e extra-alta tensão (dezembro/2006), é utilizado pela EPE e o ONS nos estudos de planejamento de longo prazo (PET) e de curto prazo (PAR), além de outros estudos para analisar alternativas de transmissão.

As tabelas de Referências de Custos de linha de transmissão de AT e EAT apresentam os custos unitários (por km) de linha de transmissão para as tensões da Rede Básica.

Preços de Referência da ANEEL

A ANEEL, por sua vez, apresenta banco de preços de referência para ser utilizado nos processos de autorização, licitação e revisão tarifária das concessionárias de transmissão de energia elétrica.

O levantamento e tratamento dos itens de preços para a composição das unidades modulares e formação do banco de referência foram realizados de acordo com a metodologia, que se julga importante transcrever abaixo, enfatizando que o leitor deve sempre procurar pela versão mais atualizada na página da ANEEL na Internet.

METODOLOGIA DE COMPOSIÇÃO DAS UNIDADES MODULARES E FORMAÇÃO DO BANCO DE PREÇOS DE REFERÊNCIA ANEEL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Este anexo reproduz o primeiro item do ANEXO I do documento de Custos de Referência da ANEEL que se encontra em Tabela de Preços da RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 758, DE 6 DE JANEIRO DE 2009.

Este item estabelece as metodologias de composição das unidades modulares de linhas de transmissão para formação do Banco de Preços de Referência ANEEL, bem como a metodologia de atualização dos valores contidos nesse banco.

O presente texto consolida a metodologia adotada na obtenção de orçamentos de linhas de transmissão. O objetivo deste documento é permitir a elaboração dos orçamentos das unidades modulares de linhas de transmissão e facilitar o uso e o entendimento da estrutura do Banco de Preços de Referência ANEEL.

1. LEGENDA

AAC Estrutura de Aço Autoportante Convencional

AAR Estrutura de Aço Autoportante Raquete

AAT Estrutura de Aço Autoportante Trusspole

AEC Estrutura de Aço Estaiada Convencional

AET Estrutura de Aço Estaiada Trapézio

AER Estrutura de Aço Estaiada Cross Rope

AEY Estrutura de Aço Estaiada TY

CON Estrutura de Concreto

CA Condutor de Alumínio

CAA Condutor de Alumínio com Alma de Aço

CALA Condutor de Liga de Alumínio com Alma de Aço

ACAR Condutor de Alumínio com Alma de Liga de Alumínio

T-CAA Condutor de Liga de Alumínio Termo-Resistente com Alma de Aço

OPGW Cabo Para-Raios com Núcleo de Fibra Óptica (Optical Ground Wire)

ADSS Cabo Óptico Auto-Sustentado Dielétrico (All Dielectric Self Support)

GWWOP Cabo Óptico Espinado (Ground Wire Wrapped with Optical Fiber Cable)

2. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os orçamentos gerados foram concebidos levando em consideração os principais parâmetros característicos dos vários tipos de linhas de transmissão, de acordo com os seguintes itens específicos:

2.1. REGIÕES

Atendendo às diferenças regionais do país (clima, relevo, vegetação, solo, transporte, mão-de-obra, etc.) que implicam a adoção de diferentes critérios de projetos e, conseqüentemente, de parcelas de custos distintas, foram adotados valores diferentes para as cinco regiões geográficas:

- Norte
- Nordeste
- Centro-Oeste
- Sudeste
- Sul



2.2. TIPOS DE CORRENTE

Os orçamentos foram computados de acordo com dois grupos de linhas de transmissão.

- CA - Corrente Alternada
- CC - Corrente Continua

2.3. CLASSE DE TENSÃO

Foram consideradas as seguintes classes de tensão, associadas aos correspondentes grupos de linhas de transmissão:

- CA - Corrente Alternada: 69, 138, 230, 345, 440, 500 e 750 kV.
- CC - Corrente Continua: 600 kV.

2.4. TIPOS DE CIRCUITO

Foram consideradas na estimativa orçamentária linhas de transmissão com os seguintes tipos de circuitos:

- CS - Circuito Simples
- D1 - Circuito Duplo - Um Circuito Instalado
- D2 - Circuito Duplo - Instalação do Segundo Circuito
- CD - Circuito Duplo

2.5. ESTRUTURAS

Foram considerados os seguintes tipos de estruturas:

- Aço Autoportante Convencional
- Aço Autoportante Raquete
- Aço Autoportante Trusspole
- Aço Estaiada Convencional
- Aço Estaiada Trapézio
- Aço Estaiada Cross Rope
- Aço Estaiada TY
- Concreto

2.6. FUNDAÇÕES

Na determinação do orçamento, foram levados em consideração os seguintes tipos de fundações:

- G - Grelha
- C - Concreto (Fundações em concreto contemplam tubulão, sapata, bloco e/ou estacas)

2.7. CABO CONDUTOR

Os cabos condutores empregados para estimativas orçamentárias das linhas de transmissão adotam como padrão o tipo CAA. Para linhas de transmissão específicas, é possível selecionar outros tipos de cabos. A precificação dos cabos baseia-se no peso por quilômetro, definido de acordo com a seção transversal especificada, acrescido do percentual de 5% correspondente às perdas na instalação e catenárias.

2.8. CABO PÁRA-RAIOS

Considera-se o cabo de aço galvanizado classe B como padrão. Para linhas de transmissão específicas podem ser definidos outros tipos de cabos, como CAA-Extra Forte, CALA, Alumoweld, ou Cabo Óptico.

2.9. ATERRAMENTO

Como o grau de influência provocado pelo aterramento nos diferentes orçamentos é mínimo, adotou-se como contrapeso padrão o fio de aço galvanizado revestido de cobre N° 4 AWG para todas as classes de tensão, com uma extensão de 1.000 m por quilômetro de linha, resultando num peso aproximado de 0,172 t/km.

Para as linhas de transmissão específicas, podemos considerar o cabo ou fio de aço galvanizado. Por não ser usual a utilização de hastes de aterramento nas linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, estas não foram consideradas.

2.10. CONFIGURAÇÃO DAS CADEIAS DE ISOLADORES

Foram consideradas as seguintes configurações de cadeias de isoladores para cada grupo de linhas de transmissão:

- CA - Corrente Alternada: III, IVI, Y.
- CC - Corrente Contínua: II.

3. ELABORAÇÃO DE ORÇAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O orçamento de linhas de transmissão pode ser realizado a partir dos dados e expressões contidos nas planilhas disponibilizadas endereço eletrônico (www.aneel.gov.br). As tabelas de quantidades de materiais e serviços foram elaboradas a partir das informações obtidas das diferentes empresas, fabricantes de materiais de linhas de transmissão e normas técnicas, sendo que os dados nelas contidos retratam os valores médios coletados.



Todas as quantidades dos diferentes tipos de materiais, com exceção dos cabos e estruturas, foram acrescidas de 3% referentes às perdas e reserva de construção. Para os cabos condutores e pára-raios, foi adotado um percentual de 5% de acréscimo. Para as estruturas não foi considerado nenhum percentual, uma vez que o quantitativo é baseado em linhas existentes.

A estrutura orçamentária contempla um orçamento básico detalhado, com enfoque nos valores unitários por quilômetro. Os itens que compõem o orçamento de linhas de transmissão estão apresentados a seguir.

3.1. CUSTOS DIRETOS

O Custo Direto consiste nos custos diretos básicos para aquisição de terrenos, equipamentos e execução da obra, somados aos custos de engenharia, meio-ambiente e administração local.

3.1.1. Custo Direto Básico

O Custo Direto Básico é constituído pelo somatório das parcelas Terreno e Servidão, Materiais e Despesas, Construção, Topografia e Geologia.

3.1.1.1. Terrenos e Servidões – *Compreende todas as despesas referentes à constituição da servidão administrativa da faixa e eventuais aquisições e desapropriações de terreno onde será construída a linha de transmissão, incluindo despesas legais, judiciais e impostos.*

O custo de aquisição de terrenos e servidões (TS) é calculado como a área da faixa de servidão, em metros quadrados, vezes o custo unitário do metro quadrado de terreno. O custo por quilômetro é dado pela expressão:

$$TS [R\$/km] = Largura [m] \times 1000 \times Preço [R\$/m^2]$$

A largura da faixa depende do tipo de torre, tipo de corrente, nível de tensão e tipo do circuito, enquanto o preço do terreno depende dos Estados nos quais a linha de transmissão está localizada. Quando a linha atravessa mais de um Estado o valor do metro quadrado é a média dos preços nestes Estados.

Destaca-se que o custo de aquisição de terrenos e servidão por quilômetro de linha foi definido considerando a largura de faixa de segurança preconizada para a classe de tensão envolvida.

3.1.1.2. Aquisição de Materiais – A seguir são descritos os materiais considerados nos orçamentos de linha de transmissão, contudo, o detalhamento do cálculo dos custos envolvidos na aquisição destes materiais encontra-se no item 4.

A) **ESTRUTURAS** – O custo de aquisição de estruturas metálicas treliçadas, autoportantes, depende do peso do aço estrutural por quilômetro de linha. No tocante às linhas com estruturas estaiadas, o peso do aço estrutural corresponde à média dos pesos das estruturas estaiadas e autoportantes usadas na linha.

Por outro lado, em linhas que utilizem estruturas de concreto, o custo de aquisição correspondente envolve todos os componentes da “estrutura completa”, tais como postes, cruzetas, braços, estaiamento e demais acessórios e ferragens, sendo representado em termos globais, por quilômetro de linha.

B) **CABOS E FERRAGENS PARA FINS ESTRUTURAIS** – Esse subitem será computado na composição orçamentária das estruturas metálicas estaiadas Trapézio, Cross Rope e TY. O custo de aquisição é composto dos conjuntos dos cabos de aço e das ferragens de fixação (esticadores e grampos) aos mastros das estruturas, por quilômetro de linha de transmissão.

C) **ESTAIAMENTO** – Considerado apenas em estruturas metálicas estaiadas, compreende o cabo de aço e o conjunto de estaiamento. O custo global de aquisição baseia-se nas quantidades de materiais (cabos e ferragens associadas) por quilômetro de linha.

D) **FUNDAÇÕES** – Esse item aplica-se a linhas de transmissão com estruturas metálicas treliçadas, autoportantes ou estaiadas, e traduz o custo de aquisição das fundações metálicas em grelha, cantoneira de ancoragem e hastes de âncora/tirantes de acordo com os tipos de estruturas e fundações envolvidas.

O valor resultante é representativo dos seguintes componentes:

- Custo das grelhas ou cantoneiras de ancoragem, baseado no peso do aço estrutural por quilômetro de linha.
- Custo médio dos vários tipos de hastes de âncora/tirantes, tomado por quilômetro de linha.



E) CABO CONDUTOR – O custo de aquisição é baseado na quantidade de material (peso do cabo) por quilômetro de linha, que varia com o tipo, área da seção transversal, formação do cabo e número de sub-condutores por fase.

F) CABO PÁRA-RAIOS CONVENCIONAL – O custo de aquisição baseia-se na quantidade de material (peso do cabo) por quilômetro de linha, que varia em função do tipo, bitola ou área da seção transversal, formação do cabo usado e número de cabos pára-raios considerados.

G) CABO PÁRA-RAIOS ÓPTICO – O custo de aquisição é caracterizado pelo número de fibras ópticas padronizado: 12, 18, 24, 36 e 48, sem considerar as características eletromecânicas do cabo. Contempla também o fornecimento de todos os acessórios envolvidos, tais como caixas de emenda, grampos de suspensão e ancoragem, amortecedores, etc.

H) ISOLADORES – O custo de aquisição se baseia na quantidade de isoladores usados por quilômetro de linha, variando de acordo com o tipo de isolador, características eletromecânicas e tipo de arranjo de cadeia. Para facilitar o processamento dos dados, considera-se como referência o custo ponderado dos diversos tipos e as características eletromecânicas dos isoladores existentes na linha de transmissão, tomando como base a tensão da linha.

I) FERRAGENS E ACESSÓRIOS – O custo global de aquisição baseia-se nas quantidades dos seguintes materiais, dependentes de classe de tensão, por quilômetro de linha: conjuntos de ferragens componentes das cadeias de isoladores dos cabos condutores e fixação dos cabos pára-raios (grampo de suspensão, grampo de ancoragem, balancins, manilhas, etc.), amortecedores, espaçadores, espaçadores amortecedores, acessórios de cabos (luvas de emenda, luva de reparo, armaduras, etc.), acessórios de sinalização e identificação (placas de identificação, sinalização, advertência, esferas de sinalização, balizadores, etc.).

J) ATERRAMENTO – Essa parcela representa o custo de aquisição do fio contrapeso e seus acessórios, constante para todas as classes de tensão, por quilômetro de linha.

K) OUTROS ACESSÓRIOS – Adotado o índice de 0,3% sobre o valor de aquisição dos materiais.

3.1.1.3. Inspeção de Material – O custo representativo desta parcela é calculado mediante a aplicação do percentual de 1% sobre o valor de aquisição dos materiais.

3.1.1.4. Canteiro de Obras – O custo representativo dessa parcela inclui os custos com almoxarifado e é calculado mediante a aplicação do percentual de 1% sobre o valor de aquisição dos materiais.

3.1.1.5. Construção

A) LIMPEZA DE FAIXA – O custo correspondente a essa parcela, como a própria rubrica indica, refere-se às despesas de supressão de vegetação, limpeza de faixa da linha e corte seletivo da vegetação. O custo de limpeza da faixa de servidão (LP) da linha de transmissão varia conforme a região geográfica e é calculado multiplicando o custo por metro quadrado pela área da faixa de servidão.

O valor em Reais por quilômetro é dado por:

$$LF [R\$/km] = Largura (m) \times 1000 \times \text{Custo Limpeza de Faixa} [R\$/m^2]$$

B) EXECUÇÃO DE FUNDAÇÕES – O montante dessa parcela depende da classe de tensão e dos tipos de estrutura e fundação, sendo o resultado da composição da variedade de serviços envolvidos, dentre os quais se destacam:

- Escavação, concretagem e reaterro - tomados com base em volumes globais por quilômetro de linha;
- Montagem das grelhas ou cantoneiras de ancoragem - baseadas no peso de aço estrutural por quilômetro de linha;
- Instalação dos conjuntos de fixação de estais e hastes de âncora/tirantes para estaiamento, obtidos através da quantidade de estruturas por quilômetro de linha.

Nota: Entende-se como concretagem o fornecimento e confecção das armaduras, fôrmas e desfôrmas, assim como o fornecimento e aplicação do concreto.



B.a) Torres Autoportantes (Fundação em Grelha) – Para o caso de torres autoportantes com fundação em grelha, o custo total de execução de fundações compreende os custos de escavação e os custos de montagem das fundações em grelha.

Custo Execução de Fundações [R\$/km] = Custo Escavação [R\$/km] + Custo Montagem Grelhas [R\$/km]

A escavação em metros cúbicos por quilômetro depende do tipo de torre, nível de tensão e tipo de estrutura, e seu custo é dado pelo volume de escavação multiplicado pelo custo por metro cúbico:

Custo Escavação [R\$/km] = Volume Escavação [m³/km] x Custo Escavação [R\$/ m³]

O custo de montagem das grelhas é dado pelo peso da fundação em grelha multiplicado pelo custo de montagem.

Custo Montagem Grelhas [R\$/km] = Peso Fundação Grelhas [t/km] x Custo Montagem [R\$/kg] x 1000

B.b) Torres Estaiadas (Fundação em Grelha) – Para torres estaiadas soma-se aos custos de escavação e montagem das fundações em grelha o valor da instalação de hastes/tirantes. Desta forma, o custo de execução de fundações é dado por:

Custo Execução Fundações = Custo Escavação + Custo Montagem Grelhas + Custo de Instalação Hastes/Tirantes

B.c) Torres Autoportantes (Fundação em Concreto) – No caso de fundações em concreto, o custo de execução de fundações compreende os custos de escavação e os custos de concretagem.

Custo Execução de Fundações [R\$/km] = Custo Escavação [R\$/km] + Custo de Concretagem [R\$/km]

Onde, os custos de concretagem são dados por:

Custo de Concretagem [R\$/km] = Volume Concreto [m³/km] x Custo Concreto [R\$/ m³]

B.d) Torres Estaiadas (Fundação em Concreto) – Para torres estaiadas soma-se aos custos de escavação e concretagem o valor da instalação de hastes/tirantes. Desta forma, o custo de execução de fundações é dado por:

Custo Execução Fundações = Custo Escavação + Custo de Concretagem + Custo de Instalação Hastes/Tirantes

B.e) Estruturas de Concreto – Assim como no caso de torres autoportantes com fundação em concreto, para as estruturas de concreto, o custo de execução de fundações compreende os custos de escavação e os custos de concretagem.

Custo de Execução de Fundações [R\$/km] = Custo Escavação [R\$/km] + Custo de Concretagem [R\$/km]

C) MONTAGEM DAS ESTRUTURAS – O custo de montagem das estruturas metálicas treliçadas baseia-se nas quantidades de aço estrutural por quilômetro de linha, variando de acordo com a classe de tensão e tipo de estrutura.

No caso particular de linhas com aplicação de estruturas estaiadas, o peso do aço estrutural por quilômetro leva em consideração também o peso das estruturas autoportantes. O custo total de montagem inclui o dispêndio referente à instalação dos estais, cabos de aço para fins estruturais e respectivas ferragens.

No que tange às estruturas de concreto, o custo de montagem baseia-se na quantidade de “estruturas completas” por quilômetro de linha. O custo de montagem é determinado pela aplicação de um índice percentual sobre o total correspondente à aquisição do material. O percentual depende do tipo de estrutura, conforme definido a seguir:

- *Concreto: 40%*
- *Aço Autoportante: 20%*
- *Aço Estaiada: 27,5%*

O custo de montagem abrange ainda o custo da instalação de placas de identificação, advertência e pintura de torres.

D) INSTALAÇÃO DO CABO CONDUTOR – O custo de instalação do cabo condutor, dado em termos globais por quilômetro de linha, abrange o lançamento, nivelamento e grampeamento do cabo, e a instalação das cadeias de isoladores e outros acessórios, tais como: amortecedores, espaçadores-amortecedores, conjuntos de emenda, luvas de reparo e outros. É determinado pela aplicação do percentual de 15% sobre o valor de aquisição dos cabos condutores.

E) INSTALAÇÃO DO CABO PÁRA-RAIOS CONVENCIONAL – Esta parcela é processada de forma análoga à da instalação dos cabos condutores, contemplando ainda o custo da instalação de esferas de



sinalização aérea. Adotado o índice percentual de 50% sobre o valor de aquisição dos cabos pára-raios convencionais.

F) INSTALAÇÃO DE CABOS PÁRA-RAIOS ÓPTICO – Esta parcela refere-se ao custo de instalação do cabo e seus acessórios, tais como caixas de emenda, grampos de suspensão e ancoragem, amortecedores, etc., e de atividades de confecção de emendas e testes. É determinada pela aplicação do índice percentual de 25% sobre o valor de aquisição dos cabos pára-raios ópticos.

Nota: Os custos de transporte dos materiais do almoxarifado do canteiro de obra até a faixa já estão incluídos nos custos de instalação respectivos.

G) INSTALAÇÃO DE ATERRAMENTO – O custo da instalação do sistema de aterramento baseia-se na quantidade de material (comprimento do fio contrapeso) instalado por quilômetro de linha, englobando, ainda, o custo da medição de resistência de aterramento, corresponde a 100% sobre o valor de aquisição dos materiais necessários ao aterramento.

H) CONSTRUÇÃO DE ACESSOS – O custo da abertura de estradas e caminhos de acesso às torres representa todos os serviços envolvidos nesta atividade, tais como: regularização do terreno e desvio de águas e está expresso por quilômetro de linha.

3.1.1.6. Serviços Técnicos

A) SERVIÇOS DE TOPOGRAFIA – Refere-se aos serviços normalmente realizados para implantação do traçado, levantamento topográfico, locação das estruturas no campo e cadastramento das propriedades públicas e particulares. O custo correspondente é apresentado em termos globais por quilômetro de linha.

B) SERVIÇOS DE GEOLOGIA/SONDAGEM – Refere-se aos serviços de sondagem e classificação de solos que se fazem necessários. Inclui também o custo da atividade de medição de resistividade do solo, por sua peculiaridade. São medidos em termos globais por quilômetro de linha.

3.1.2. Estudos de Engenharia

A parcela referente aos estudos de engenharia (viabilidade econômica, projeto básico e executivo) é determinada pela aplicação de um índice percentual sobre o total correspondente ao Custo Direto Básico.

3.1.2.1. Projeto Básico – *Corresponde à aplicação de 1% sobre o Custo Direto Básico.*

3.1.2.2. Projeto Executivo – *Adotado o índice de 2% sobre o Custo Direto Básico.*

3.1.3. Custos Ambientais

Essa parcela destina-se a cobrir os custos dos estudos ambientais e medidas mitigadoras decorrentes da construção da linha de transmissão, corresponde à aplicação de 3% sobre o Custo Direto Básico. A parcela de compensação ambiental mínima de 0,5% do custo total do empreendimento, exigida pela legislação ambiental, está contemplada neste item.

3.1.4. Administração Local

As despesas subordinadas a esta parcela referem-se às atividades de fiscalização e resultam da aplicação do índice de 2% sobre o Custo Direto Básico.

3.2. CUSTOS INDIRETOS

Compreende o total das despesas não alocáveis diretamente à execução da obra.

3.2.1. Administração Central

Para os custos de administração central foi adotado o índice de 2% sobre o Custo Direto.

3.3. EVENTUAIS

O valor assumido por este item, calculado como 3% sobre o Custo Direto, destina-se a cobrir imprevistos que possam ocorrer durante a execução do projeto ou construção, entre os quais sobressaem: gastos com indenizações de danos causados aos proprietários de terrenos ao longo da faixa de passagem da linha, desvios de estradas, relocação de linhas de transmissão e redes de distribuição ou telecomunicações, etc.



4. CÁLCULO DOS CUSTOS DE AQUISIÇÃO DE MATERIAIS

4.1. AQUISIÇÃO DE ESTRUTURAS

4.1.1. Torres de Aço Autoportantes ou Estaiadas Convencionais

O custo de aquisição de estruturas ($AE1$) é dado pelo peso das estruturas, em toneladas por quilômetro, vezes o preço do aço estrutural por tonelada, conforme a expressão a seguir:

$$A_{E1} [\text{R\$/km}] = \text{Peso Estruturas [t/km]} \times 1.000 \times \text{Preço (R\$/kg)}$$

O peso das estruturas varia com o tipo de torre, nível de tensão, tipo de corrente, seção do cabo condutor e número de cabos por fase, enquanto o preço do aço estrutural depende da região do País onde se localiza a linha de transmissão.

4.1.2. Torres Estaiadas Trapézio, Cross Rope ou TY

No caso das torres estaiadas Trapézio, Cross Rope ou TY, além do custo de aquisição de estruturas ($AE1$), são calculados os valores relativos aos cabos para fins estruturais. Desta forma, o custo por quilômetro de linha será:

$$A_{E2} [\text{R\$/km}] = AE1 + \text{Custo do Cabo Para Fins Estruturais [R\$/km]}$$

4.1.3. Estruturas de Concreto

O custo das estruturas de concreto é calculado multiplicando o número de estruturas por quilômetro de linha pelo custo unitário da estrutura.

$$A_{E3} [\text{R\$/km}] = \text{Número de Estruturas} \times \text{Custo Unitário (R\$)}$$

Vale ressaltar que não são considerados custos com estruturas quando do lançamento do segundo circuito em torres de circuito duplo.

4.2 AQUISIÇÃO DE ESTAIAMENTO

O custo de estaiamento é calculado como quatro vezes o número de estruturas multiplicado pelo custo unitário.

$$A_{\text{Estaiamento}} [\text{R\$/km}] = 4 \times \text{Número de Estruturas [Unid./km]} \times \text{Custo Unitário de Estaiamento [R\$]}$$

4.3 AQUISIÇÃO DE FUNDAÇÕES

4.3.1. Torres Autoportantes (Fundação Grelha)

No caso de torres autoportantes com fundação do tipo grelha, o custo de fundações é igual ao peso das fundações, em toneladas por quilômetro, multiplicado pelo preço do aço estrutural por quilograma. O custo em Reais por quilômetro é dado por:

$$A_{F1} [R\$/km] = \text{Peso Fundações Grelha [t/km]} \times 1000 \times \text{custo aço estrutural (R\$/kg)}$$

4.3.2. Torres Autoportantes (Fundação em Concreto)

O custo de aquisição de concreto para fundação de torres autoportantes será considerado no item referente à execução de fundação em concreto.

4.3.3. Torres Estaiadas (Fundação em Grelha)

Para torres estaiadas, é acrescentado ao custo da fundação o valor de aquisição de hastes de âncora/tirantes (HA), dado por:

$$HA [R\$/km] = 4 \times N^{\circ} \text{ de Estruturas} \times \text{Custo de Hastes de Âncora [R\$]} \times \text{Número de Condutores}$$

Assim, o custo total de fundações será:

$$A_{F2} [R\$/km] = AF1 + HA$$

4.3.4. Torres Estaiadas (Fundação em Concreto)

O custo de aquisição de concreto para fundações de torres estaiadas será considerado no item referente à execução de fundação em concreto, ao qual deve ser acrescentado o valor de aquisição de hastes de âncora/tirantes (HA).

4.4. AQUISIÇÃO DE CABOS CONDUTORES

O custo de aquisição de cabos condutores depende do tipo do cabo e de sua seção transversal e é dado pela multiplicação do peso do cabo condutor, em toneladas por quilômetro, pelo preço por quilograma.

$$A_{\text{condutores}} [R\$/km] = (N) \times \text{Peso Cabo Condutor [t/km]} \times 1000 \times \text{Custo Cabo Condutor (R\$/kg)}$$

Onde: N = Número de subcondutores



4.5. AQUISIÇÃO DE CABO PÁRA-RAIOS CONVENCIONAL

O custo de aquisição de cabo pára-raios convencional é calculado como a multiplicação do peso do cabo pára-raios, em toneladas por quilômetro, pelo preço por quilograma.

$$A_{\text{pára-raios}} [\text{R\$/km}] = \text{Peso Cabo Pára-Raios [t/km]} \times 1000 \times \text{Custo Cabo Pára-Raios (R\$/kg)}$$

4.6. AQUISIÇÃO DE CABO PÁRA-RAIOS ÓPTICO

O custo de aquisição do cabo pára-raios óptico é definido de acordo com o número de fibras ópticas padronizado em: 12, 18, 24, 36 ou 48 fibras, e contempla o fornecimento de todos os acessórios envolvidos, tais como caixas de emenda, grampos de suspensão e ancoragem, amortecedores, etc.

4.7. AQUISIÇÃO DE ISOLADORES

O custo de aquisição dos isoladores é dado pela quantidade de isoladores por quilômetro de linha vezes o custo unitário dos isoladores em Reais.

$$A_{\text{isoladores}} [\text{R\$/km}] = \text{Quantidade de Isoladores [Unid./km]} \times \text{Custo Unitário Isoladores [R\$/]}$$

A quantidade de isoladores varia conforme o tipo de torre, o nível de tensão e a configuração da cadeia de isoladores.

4.8. AQUISIÇÃO DE FERRAGENS E ACESSÓRIOS

4.8.1. Ferragens

O custo de aquisição das ferragens consiste no somatório dos custos relativos à aquisição dos conjuntos de suspensão, ancoragem e jumper, tanto para os cabos condutores quanto para os cabos pára-raios. Para todos os itens, o custo total é igual à quantidade por quilômetro vezes o custo unitário dos conjuntos, sendo que a quantidade varia com o tipo de torre e nível de tensão, enquanto os custos unitários variam com a região geográfica.

4.8.2. Acessórios

O custo associado à aquisição de acessórios engloba os valores de aquisição de amortecedores do cabo pára-raios e amortecedores ou espaçadores

amortecedores do cabo condutor, sendo que o custo de cada item é dado pela quantidade por quilômetro multiplicada pelo custo unitário.

4.9. ATERRAMENTO

O custo de aterramento é dado em R\$/km de linha de transmissão e, conforme mencionado anteriormente, refere-se a um aterramento típico que apresenta como contrapeso padrão o fio de aço galvanizado revestido de cobre N° 4 AWG, com uma extensão de 1.000 m por quilômetro de linha, resultando num peso aproximado de 0,172 t/km.

4.10. OUTROS ACESSÓRIOS

O custo relativo a outros acessórios compreende os conjuntos de emenda, luvas, placas de identificação e/ou advertência, esferas de sinalização, etc, e corresponde à aplicação de um percentual de 0,3% sobre o valor de aquisição dos materiais descritos nos itens de 4.1 a 4.9.

Comentários Gerais

Na etapa da pesquisa correspondente a este capítulo do projeto de P&D, foi efetuado um levantamento das linhas em operação e planejadas, além dos diversos itens de custos necessários a implantação do empreendimento de transmissão.

Neste levantamento, foram indicadas diferentes fontes para o levantamento de custos de linhas de transmissão:

- I) Orçamentos apresentados nos Contratos de Concessão com os quais foram determinados valores médios de custos de linha de transmissão por nível de tensão para os últimos anos;
- II) Banco de preços de referência da ANEEL;
- III) Referências de Custos de linha de transmissão e subestações de alta tensão e extra-alta tensão (dezembro/2006) da ELETROBRÁS.

Referências

Banco de Preços de Referência da ANEEL segundo Nota Técnica nº 039/2009-SRT/ANEEL que alterou o ANEXO II da Resolução Homologatória nº 758 de 06/01/09.

ELETROBRÁS: Referências de Custos de LINHA DE TRANSMISSÃO e SEs de AT e EAT (dez / 2006).



PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA, 2019: EPE-Em-
presa de Pesquisa Energética.

CONSOLIDAÇÃO DE OBRAS DE REDE BÁSICA E REDE BÁSICA DE
FRONTEIRA – Período 2009 a 2011. Revisão – maio/2009. MME, EPE, ONS.



CAPÍTULO 3

Desempenho de Linhas de Transmissão

Arnoldo Rodrigo Saavedra
Sergio de Oliveira Frontin



PREFÁCIO

Mauro Pereira Muniz
Fernando Aquino Viotti

O Sistema Interligado Nacional (SIN) possui características e dimensões que o fazem único em âmbito mundial. A sua malha de transmissão possui atualmente mais de 800 linhas de transmissão com nível de tensão igual ou superior a 230 kV, que totalizam cerca de 85.000 km de extensão.

Por causa da complexidade e dimensão da malha de transmissão do SIN, a gestão do desempenho de seus componentes tem papel importante na função do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Esta gestão é realizada, entre outras, a partir de dados estatísticos originados do processo de análise de perturbações ocorridas no SIN. Nestas análises, são obtidas informações tais como funções transmissão ou geração envolvidas nas perturbações; causa e duração de desligamentos forçados; natureza elétrica e localização das faltas; corte de carga; desempenho de sistemas e esquemas especiais de proteção e de esquemas de religamento automático. A partir dessas informações, é possível analisar o impacto de fatores como fenômenos naturais, queimadas, falhas humanas, falhas em equipamentos e acessórios de componentes, problemas relacionados a sistemas de proteção e reincidência de falhas.

Atualmente, o advento de fatores como a desverticalização da indústria de energia elétrica implicou a utilização cada vez mais intensa dos recursos sistêmicos e a exploração de seus limites operativos, seja por razões econômicas ou por restrições de natureza ambiental, impactando severamente a segurança operativa dos sistemas elétricos. Prova disso, foram os grandes blecautes ocorridos na Europa e nos Estados Unidos nos últimos anos. Por estas razões, o governo tem dado especial atenção à segurança elétrica do Sistema Interligado



Nacional (SIN). Torna-se fundamental, portanto, aprimorar continuamente a gestão de desempenho de componentes e de sistemas de proteção.

Para que a gestão seja viabilizada, deve-se dispor de uma base de dados histórica de perturbações confiável e garantir a sua permanente atualização, fazendo uso de ferramenta computacional específica e estabelecendo um processo de apuração de dados como agentes de operação, cuja participação é fundamental para a obtenção dos resultados. Hoje, o ONS dispõe de uma base de dados histórica consolidada desde 2002, contendo atributos como as datas de entrada e saída de operação dos equipamentos, o Agente proprietário, o Agente operador e, no caso específico de linhas de transmissão, as datas de entrada e saída do esquema de religamento e o seu comprimento.

A metodologia de gestão de desempenho de componentes adotada é baseada no monitoramento contínuo dos indicadores, comparando-os com valores de referência e, no caso específico de linhas de transmissão, de projeto. É dado um destaque às principais interligações do SIN, de forma a permitir a definição de ações que visem à melhoria dos indicadores e, por consequência, do desempenho por estes. Esse monitoramento busca identificar as características dos desligamentos mediante a frequência de ocorrência, o tipo de causa, o impacto do desligamento (corte de carga) e a localização da falta.

No que se refere à Função Transmissão *Linha de Transmissão*, o indicador de taxa de desligamento forçado/100 km/ano, calculado a partir da relação do número de desligamentos forçados causados por descargas atmosféricas e a exposição da linha de transmissão, permite identificar quais componentes possuem desempenho em desacordo com os requisitos mínimos estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

Nos grandes troncos de transmissão, busca-se também identificar as características dos desligamentos simultâneos de causa comum (linhas de circuito duplo) e dos desligamentos série (linhas no mesmo corredor). Outro aspecto, não menos importante, está relacionado com os desligamentos acidentais, os quais são provocados por atuações incorretas ou recusas dos sistemas de proteção e os provocados durante intervenções nas instalações.

No Brasil, o acompanhamento do desempenho dos componentes do sistema elétrico e o registro dos dados estatísticos iniciaram-se em 1981 para as linhas de transmissão e em 1984 para os demais componentes do sistema. Na época, essa gestão era realizada pela Eletrobrás, empresa estatal, responsável pelo planejamento e a operação do sistema elétrico brasileiro. A partir de 1998, com a desverticalização da indústria de energia elétrica e a criação do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, responsável pela operação do SIN, essa atividade passou a ficar sob a sua responsabilidade. Os critérios

de classificação de desempenho foram estabelecidos pelo gestor, o ONS, e os demais agentes do setor elétrico, e revista e discutida anualmente.

No início desse processo, a coleta e a análise dos dados dos desligamentos forçados e de atuações de proteção eram realizadas utilizando-se o programa SIAP, visando à obtenção de estatística de desligamentos e apuração de desempenho da proteção. Os dados eram coletados pelos agentes responsáveis pelos equipamentos e enviados anualmente ao gestor.

Em 2005, foi concebido o desenvolvimento do programa SIPER, com o objetivo de unificar as bases de dados da Operação e da Proteção para possibilitar respostas mais rápidas com relação ao número de perturbações, corte de carga, causa origem da perturbação, desligamentos forçados e atuações de sistemas de proteção, permitindo o cálculo de indicadores de desempenho de operação (Robustez, DREQ e FREQ) mensalmente e o subsídio ao processo de apuração mensal da parcela variável. As perturbações no SIN são cadastradas pelo Tempo Real dos Centros de Operação no SIPER, consistidos pela Pós-Operação (dados de corte de carga e data/horário dos eventos), os dados são informados pelos agentes num prazo máximo de 10 dias e posteriormente analisados pela equipe de proteção do ONS (análise dos desligamentos que compõem a perturbação, da atuação dos sistemas de proteção e do religamento automático). Esses dados são armazenados na Base de Dados Técnica – BDT, do ONS.

Atualmente, o ONS está trabalhando para integrar os dados coletados pelo SIAP na BDT, de forma a dispormos também dos dados de perturbações de 1998 a 2006, com a causa da origem da perturbação e os desligamentos associados em uma única base.

Com a metodologia de acompanhamento contínuo e semanal das perturbações do SIN, aliada a uma base histórica contendo as características de desempenho dos equipamentos e das linhas de transmissão, espera-se poder sinalizar com ações preditivas, baseadas na detecção de desvios de comportamento dos equipamentos, de forma a minimizar o impacto das perturbações, principalmente aquelas que possam levar o sistema elétrico a desligamentos de grande porte.



Desempenho de Linhas de Transmissão

Arnoldo Rodrigo Saavedra
Sergio de Oliveira Frontin

Objetivo

O objetivo deste capítulo é apresentar informações relativas aos indicadores de desempenho das linhas de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), com a identificação das falhas classificadas por causas, tendo em conta níveis de tensão e quilometragem das diversas linhas de transmissão.

As estatísticas de desempenho das linhas de transmissão do SIN são elaboradas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) a partir das informações relativas às ocorrências e às perturbações, que são prestadas pelos agentes do sistema. O processo de coleta, análise e tratamento destas informações está documentado nos Procedimentos de Rede publicados pelo ONS e aprovados pela ANEEL.

Serão essencialmente utilizadas as informações reunidas mais detalhadamente no relatório do ONS, “Estatística de Desligamentos Forçados de Componentes do Sistema Elétrico Brasileiro Referente ao Ano de 2006” e algumas informações preliminares para os anos de 2007 a 2010. Todos os dados apresentados foram extraídos destas fontes.

Sendo assim, deve ser enfatizado que as informações apresentadas a seguir têm como objetivo exemplificar, de forma bastante resumida, como o assunto é tratado e consolidado pelo ONS. Para informações mais detalhadas, o leitor é incentivado a consultar os relatórios referenciados ou acessar a página na *internet* do ONS (www.ons.org.br).

Definições

Serão utilizados neste capítulo alguns termos relacionados ao tema em pauta que são definidos pelo ONS da seguinte maneira:

Desligamento forçado – Ato de retirar de serviço um equipamento ou linha de transmissão, em condições não programadas, resultante de falha ou de desligamento de emergência. O desligamento forçado impõe que o equipamento ou a linha de transmissão seja desligado automática ou manualmente para evitar riscos à integridade física de pessoas ou do meio ambiente, danos ao equipamento, à linha de transmissão e/ou outras consequências ao sistema elétrico.

Desligamento de natureza permanente – são aqueles que, para serem restabelecidos, são necessárias intervenções de manutenção.

Desligamento de natureza fugitiva – são aqueles com ato da retirada do componente, prontamente de serviço, em condição não programada, automaticamente ou não, cujo retorno do componente ao serviço pode ser feito automaticamente, ou tão logo operações de manobra sejam executadas, sem correção, reparo ou reposição de componentes. A simples inspeção do componente onde nada for constatado deve ser enquadrada neste caso.

Desligamento de origem Interna (I) – A causa do desligamento forçado relaciona-se com as partes energizadas dos componentes ou de seus equipamentos terminais, inclusive disjuntores, seccionadoras, filtros de onda, transformadores de corrente e potencial.

Desligamento de origem Secundária (S) – A causa do desligamento forçado relaciona-se com os lados secundários, complementares ou auxiliares do componente do sistema elétrico em análise, tais como painéis, fiações, relés, serviços auxiliares etc. Incluem-se neste caso as causas acidentais (provocadas) e as atuações incorretas de relés de proteção para faltas externas ao componente em análise (problema no ser humano ou no relé, e não no componente).

Desligamento de origem Operacional (O) – Se a causa do desligamento forçado relaciona-se com problemas operacionais do sistema de potência (oscilações, sobretensões, rejeições de carga etc.) As manobras operacionais para acerto de configurações, sejam por acionamento manual, sejam por esquemas automáticos, não são considerados desligamentos forçados (desligamento de linha para controle de tensão, desligamento de unidade geradora para controle de carga etc.).

Desligamento de origem Externa (E) – São os demais casos de desligamentos forçados, com a causa se localizando em outro componente. Duas condições podem existir para origens externas. Caso em que a natureza elétrica



neste outro componente manifestar-se também no componente em análise. Casos em que os desligamentos de componentes ocorrerem por atuações diretas das proteções de outros componentes. Por exemplo, uma proteção diferencial de barra desligando um terminal de linha. Nota: é bom observar que a origem externa só deve ser usada quando a atuação da proteção do componente em análise for correta.

Defeito – Toda alteração física ou química no estado de um componente, não a ponto de causar o término de sua habilidade em desempenhar sua função requerida.

Desligamento – É o ato de abertura de dispositivo(s) que interliga(m) circuitos de potência, interrompendo a continuidade elétrica por meio de um componente.

Falha – Efeito ou consequência de ocorrência em equipamento ou linha de transmissão, que acarrete sua indisponibilidade operativa em condições não programadas e que, por isso, impede o equipamento ou a linha de transmissão de desempenhar suas funções em caráter permanente ou temporário.

Frequência de falhas – Número de vezes em que ocorreram falhas no período de apuração.

Perturbação – Ocorrência no SIN caracterizada pelo desligamento forçado de um ou mais de seus componentes, que acarretam quaisquer das seguintes consequências: corte de carga, desligamento de outros componentes do sistema, danos em equipamentos ou violação de limites operativos.

Taxa de desligamento forçado – Expressão da incidência de falhas e desligamentos de emergência nas horas de serviço de uma função, de um equipamento ou de uma linha de transmissão, no período considerado, referida para um ano padrão de 8.760 horas.

Desligamentos Forçados de Linhas de Transmissão

Serão apresentados a seguir dados de desligamentos forçados de linha de transmissão analisando diversos períodos e causas. As interpretações inseridas têm como objetivo indicar possíveis pontos promissores em termos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que possam trazer melhorias no desempenho de linhas de transmissão.

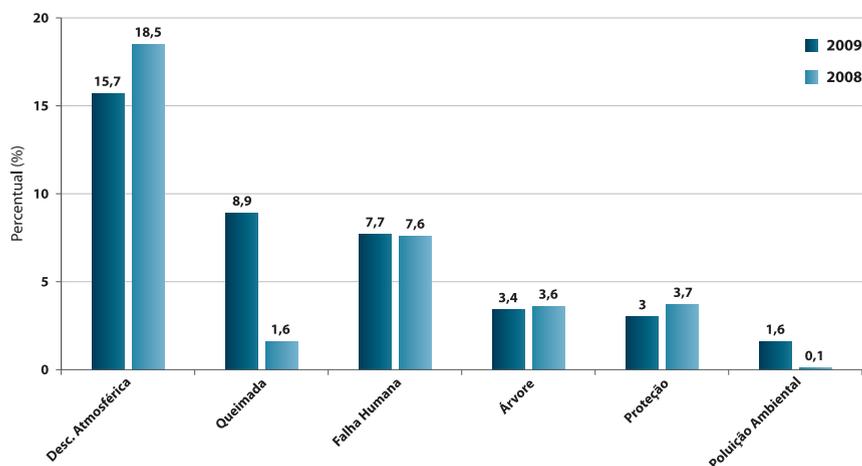
Os desligamentos forçados podem ter diversas causas. A figura seguinte mostra um gráfico com a distribuição percentual das causas das perturbações das linhas de transmissão em relação ao total das perturbações para o ano de 2008 e primeiro semestre de 2009.

Nota-se a grande importância relativa das descargas atmosféricas, revelando a relevância da investigação de medidas que possam reduzir a frequência e duração deste tipo de desligamentos forçados, seja mediante maior blindagem e isolamento das linhas de transmissão, seja mediante religamentos com alta probabilidade de sucesso.

Pode-se igualmente apresentar estes dados de forma mais detalhada por nível de tensão, conforme indicado na tabela a seguir para os anos de 2007 e 2008.

CAUSAS DAS PERTURBAÇÕES EM % NO PERÍODO 2008 E 1º SEMESTRE DE 2009

Fonte: ONS





DISTRIBUIÇÃO DOS DESLIGAMENTOS FORÇADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR NÍVEL DE TENSÃO E POR CAUSAS PARA OS ANOS 2007 E 2008

Nível de Tensão	750kV		500kV		440kV		345kV		230kV											
	Ano	Freq.	%	Ano	Freq.	%	Ano	Freq.	%	Ano	Freq.	%								
Causas																				
Cond. Climáticas Adversas	6	19,35	8	66,67	107	18,71	137	22,80	7	12,07	32	35,56	62	21,23	75	26,77	276	29,49	224	27,22
Queimada	0	0,00	0	0,00	127	22,20	121	20,13	13	22,41	10	11,11	41	14,04	15	5,58	63	6,73	46	5,59
Falhas Humanas	3	9,68	0	0,00	39	6,82	33	5,49	3	5,17	2	2,22	22	7,53	18	6,69	63	6,73	44	5,35
Vegetação	0	0,00	0	0,00	28	4,90	50	8,32	3	5,17	9	10,00	7	2,40	8	2,97	23	2,46	10	1,22
Prot./Teleproteção	10	32,26	1	8,33	40	6,99	36	5,99	6	10,34	13	14,44	43	14,73	36	13,38	118	12,61	103	12,52
Fugitiva	9	29,03	1	8,33	139	24,30	148	24,63	15	25,86	16	17,78	77	26,37	75	27,88	243	25,96	254	30,86
Falhas e defeitos em equip/acess	1	3,23	1	8,33	21	3,67	24	3,99	7	12,07	5	5,56	16	5,48	25	9,29	62	6,62	42	5,10
Outras	2	6,45	1	8,33	71	12,41	52	8,65	4	6,90	3	3,33	24	8,22	20	7,43	88	9,40	100	12,15
TOTAL	31	100	12	100	572	100	601	100	58	100	90	100	292	100	272	100	936	100	823	100

Os dados também podem ser agrupados considerando as causas de desligamentos classificadas em interna, secundária, externa e operacional. A tabela a seguir exemplifica esta modalidade para o ano de 2006 com a indicação do número de desligamentos (Freq) e do tempo médio de restabelecimento do circuito em horas (Dur. med.). Neste ano, ocorreram 5.036 desligamentos com 2,25 horas de tempo médio de restabelecimento.

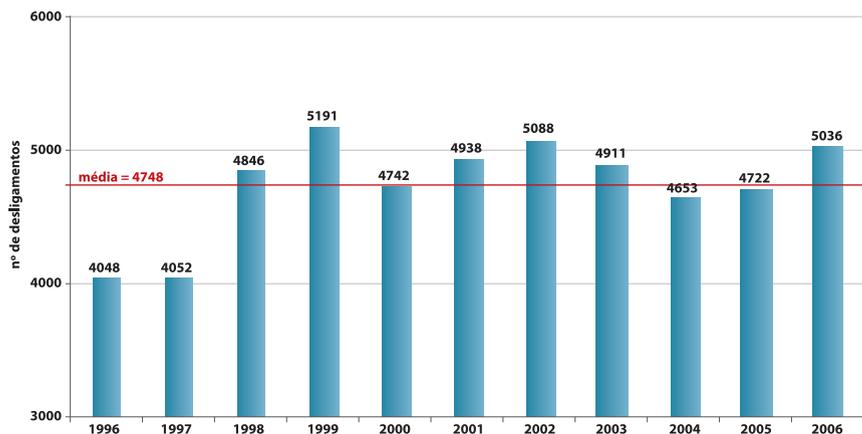
DESLIGAMENTOS POR NÍVEL DE TENSÃO E POR ORIGEM DAS CAUSAS EM 2006

Tensão (kV)	Interna			Secundária			Externa			Operacional			Total	
	Freq	%	Dur med	Freq	%	Dur med	Freq	%	Dur med	Freq	%	Dur med	Freq	Dur med
750	9	52,9	21,233	7	41,2	0,533	1	5,9	0,400	0	0,0	0,000	17	11,483
500	327	68,4	1,633	102	21,3	0,683	42	8,8	4,433	7	1,5	2,083	478	1,683
440	45	64,3	0,333	14	20,0	3,117	10	14,3	0,617	1	1,4	0,050	70	0,917
345	152	71,4	3,233	40	18,8	0,417	20	9,4	0,367	1	0,5	0,033	213	2,417
230	533	62,0	1,850	154	17,9	1,150	161	18,7	1,250	12	1,4	1,217	860	1,600
138	2704	79,6	2,817	224	6,6	0,983	440	12,9	1,150	30	0,9	0,300	3398	2,450
TOTAL	3770	74,9	2,600	541	10,7	0,983	674	13,4	1,350	51	1,0	0,750	5036	2,250

Estas informações também podem ser apresentadas de forma global, conforme o gráfico abaixo, que mostra o perfil das frequências de desligamentos no período 1996 a 2006 considerando todas as causas. Neste período, o número médio anual de desligamentos foi de 4.748.

FREQUÊNCIAS DE DESLIGAMENTOS NO PERÍODO 1996 A 2006

Fonte: ONS





Pode-se também considerar o universo estatístico em termos de número de circuitos e extensão de linhas de transmissão existentes e calcular a porcentagem de desligamentos em relação ao universo examinado. Observa-se que, como os circuitos que entram em serviço durante o ano podem entrar em qualquer data do ano, é considerada somente a fração do ano após a entrada em serviço para contabilizar o aumento dos “circuitos x ano” e da extensão em “km x ano”. Para exemplificar, seguem abaixo as tabelas correspondentes.

UNIVERSO ESTATÍSTICO NO ANO 2006

Tensão (kV)	Circuitos X Ano	Extensão km X Ano
750	9,0	2698,0
500	159,7	27129,0
440	38,5	7017,4
345	101,0	8802,5
230	443,7	36612,0
138	1199,4	51970,9
TOTAL	1951,4	134229,7

PORCENTAGEM DE LINHAS DESLIGADAS EM RELAÇÃO AO TOTAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ano	Desligamentos relativos (%)						
	750 kV	500 kV	440 kV	345 kV	230 kV	138 kV	TOTAL
2002	100,0	65,2	97,1	78,8	58,7	72,8	70,3
2003	100,0	68,1	79,4	76,2	64,2	67,8	67,8
2004	77,8	74,5	67,6	72,3	60,8	65,2	65,4
2005	100,0	73,2	74,9	68,8	62,3	64,7	65,3
2006	77,8	76,4	85,7	69,3	64,5	63,8	65,7
TOTAL	91,1	72,0	81,1	73,1	62,2	66,8	66,9

Da tabela acima, observa-se que, em média, nos 5 anos analisados, cerca de 67,0% das linhas de transmissão apresentaram desligamentos forçados.

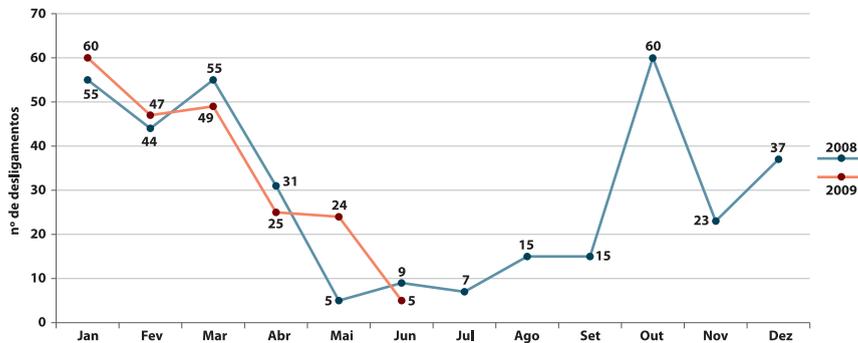
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Descargas Atmosféricas

Como anteriormente indicado, a descarga atmosférica é a causa principal de desligamento forçado das linhas de transmissão. Neste item, serão apresentados alguns indicadores correspondentes.

A próxima figura exibe um gráfico da distribuição de saídas de linhas de transmissão por descargas atmosféricas no ano de 2008 e primeiro semestre de 2009. Pode-se notar de imediato o efeito da sazonalidade desta perturbação que atua com maior intensidade nos meses de janeiro a março e no mês de outubro.

**DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 2008 E 1º SEMESTRE DE 2009**

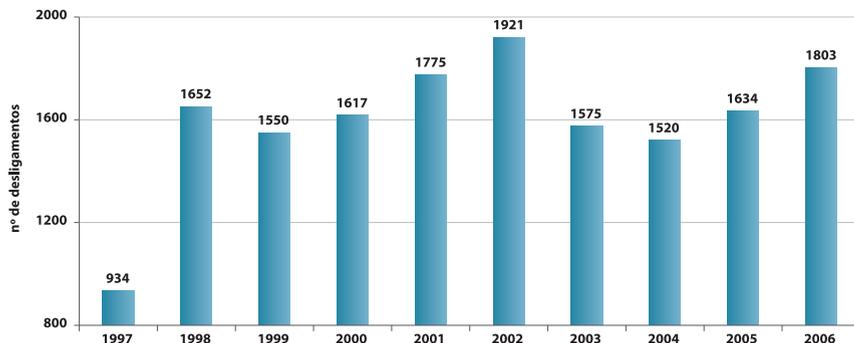
Fonte: ONS



O gráfico abaixo mostra as frequências de desligamentos por descargas atmosféricas no período 1997 a 2006.

FREQUÊNCIAS DE DESLIGAMENTOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS 1997 A 2006

Fonte: ONS

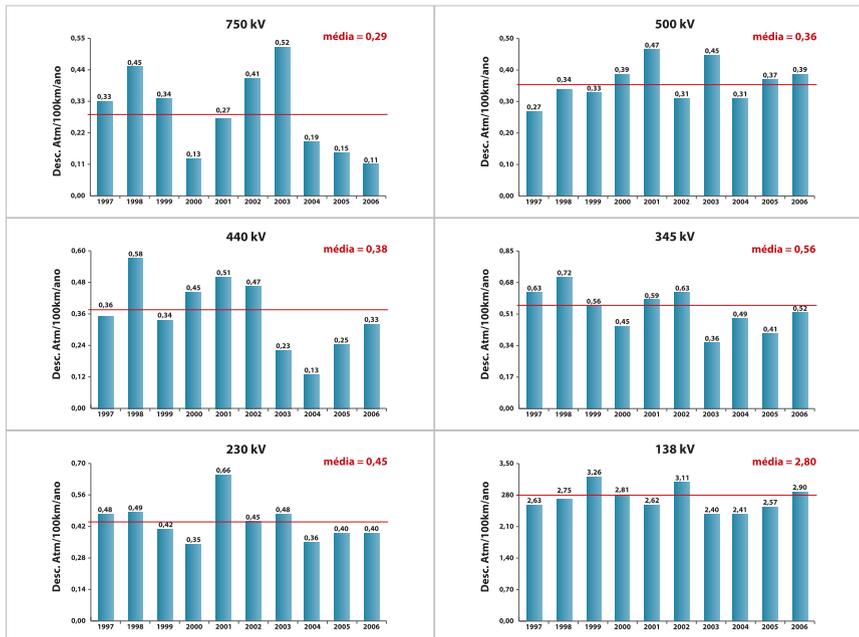




Este gráfico anual pode ser detalhado de forma a mostrar o comportamento por nível de tensão. Nota-se que, em termos de média por 100 km por ano, o melhor desempenho refere-se ao nível de tensão de 750 kV seguido dos níveis 500 kV, 440 kV, 230 kV, 345 kV e 138 kV.

ÍNDICES DE DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO/100KM/ANO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DE 1997 A 2006

Fonte: ONS



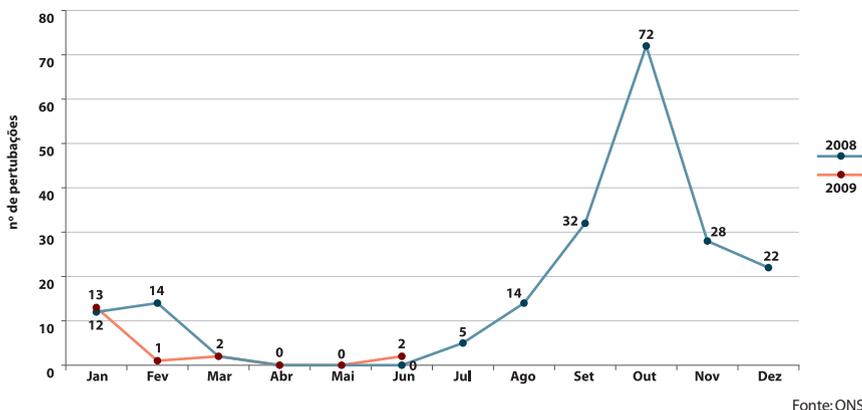
Desligamentos de Linhas de Transmissão por Queimadas

A segunda maior causa de desligamentos forçados reporta-se a queimadas próximas às linhas de transmissão. O gráfico a seguir destaca a distribuição dos desligamentos provocados por queimadas durante o mesmo período.

Nos três primeiros meses de 2008 e 2009, as perturbações com origem em queimadas concentraram-se, sobretudo, na região Nordeste.

A partir de julho, o efeito das queimadas começa a aumentar com o máximo de efeito em outubro, tendo em vista principalmente o período de colheita em diversas regiões do Brasil. Isto indica a necessidade de um trabalho de conscientização, a fim de reduzir o número de ocorrências. A investigação de métodos de detecção e informação dos pontos críticos ao longo das linhas de transmissão pode ser importante para a aplicação de medidas preventivas.

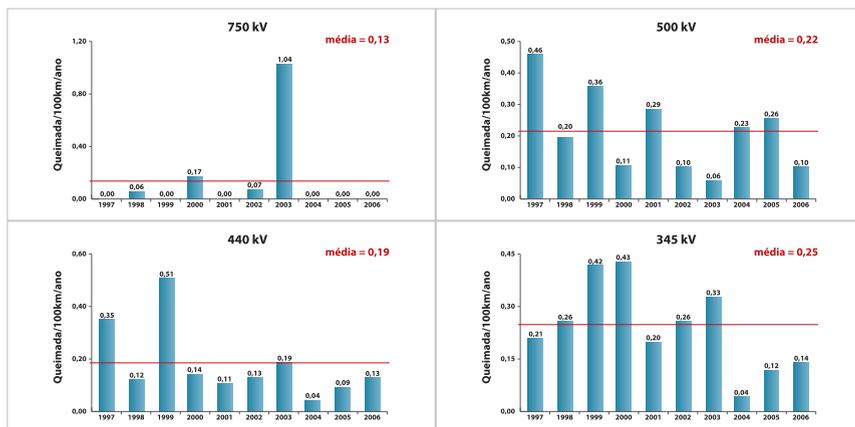
DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR QUEIMADAS, 2008 E 1º SEMESTRE DE 2009

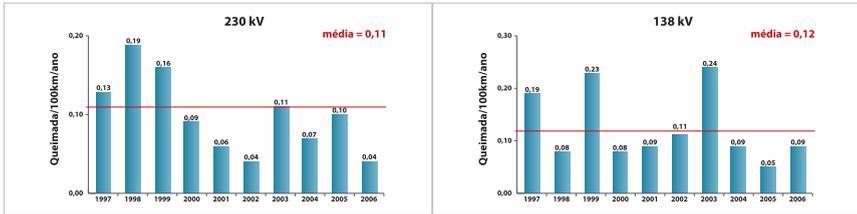


Em 2008, o destaque foi o mês de outubro, com perturbações envolvendo principalmente as interligações Norte-Sudeste (34 perturbações) e Nordeste-Sudeste (10 perturbações). Apenas em uma destas perturbações ocorreu corte de carga, em razão da ocorrência de contingências múltiplas.

Este tipo de gráfico anual pode ser detalhado de modo a mostrar o comportamento por nível de tensão. Nota-se que, em termos de média por 100 km por ano, o melhor desempenho no período de 1997 a 2006 reporta-se ao nível de tensão de 230 kV seguido dos níveis 138, 750, 440, 500 e 345 kV.

ÍNDICES DE DESLIGAMENTOS /100KM/ANO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR QUEIMADA SOB A LINHA





Fonte: ONS

Desligamentos de Linhas de Transmissão por Queda de Árvore

Dos desligamentos de linhas de transmissão por causas do grupo “Corpos Estranhos e Objetos”, a maior parcela (41,7%) coube à “árvore sob a linha” (2,2% do total de desligamentos de linhas de transmissão por causa interna). Em 2006, houve um acréscimo acentuado (50,9%) de desligamentos provocados por árvores em relação ao ano anterior.

DESCLIGAMENTOS PROVOCADOS POR ÁRVORE SOB A LINHA EM 2002 A 2006

Ano	Frequência de desligamentos	% em relação ao ano anterior
2002	45	+21,6
2003	47	+4,4
2004	64	+36,2
2005	55	-14,1
2006	83	+50,9

Desligamentos de Linhas de Transmissão por Falhas nos Componentes

A tabela seguinte apresenta a relação dos desligamentos por causa do grupo de Equipamentos e Acessórios ocorridos no ano 2006, classificando os eventos por nível de tensão, indicando também a frequência e duração média total de cada causa.

Os 23 desligamentos forçados de linhas de transmissão devido à “queda de torre” ocorridos em 2006 estão indicados nesta tabela, junto com outras causas deste tipo, tais como corte de condutores e cabos para-raios, falha de isoladores etc.

**DESLIGAMENTOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
POR CAUSA DO GRUPO EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS EM 2006**

Causa do desligamento	Nível de tensão (kV)						TOTAL	Duração (hora)	
	750	500	440	345	230	138		TOTAL	MÉDIA
CD-Conductor	0	0	0	0	3	14	17	153,45	9,03
Defeito	0	0	0	0	1	0	1	4,60	4,60
Rompimento/Desconexão	0	0	0	0	1	11	12	127,38	10,62
Enlaçamento (Cabos)	0	0	0	0	1	1	2	14,82	7,41
Sobreaquecimento	0	0	0	0	0	2	2	6,65	3,33
CP-Cabo Para-raios	0	5	1	0	5	8	19	152,08	8,00
Defeito	0	0	0	0	1	0	1	23,98	23,98
Rompimento/Desconexão	0	5	1	0	4	8	18	128,10	7,12
IS-Isolador/Cadeia	0	3	0	0	17	33	53	256,82	4,85
Defeito	0	0	0	0	2	10	12	14,07	1,17
Falha	0	0	0	0	1	4	5	30,47	6,09
Explosão	0	0	0	0	0	1	1	9,63	9,63
Rompimento/Desconexão	0	0	0	0	3	17	20	112,80	5,64
Isolação - Falha/Defeito	0	3	0	0	11	1	15	89,85	5,99
TO-Estrutura (torre) /Pórtico	2	1	0	1	2	17	23	1506,78	65,51
Queda	2	1	0	1	2	17	23	1506,78	65,51
JC-Jumper/Conector	0	0	1	0	0	12	13	95,20	7,32
Rompimento/Desconexão	0	0	1	0	0	12	13	95,20	7,32
OU-Outras Localizações	0	2	0	0	0	1	3	880,07	293,36
Falha	0	1	0	0	0	0	1	0,43	0,43
Isolação - Falha/Defeito	0	1	0	0	0	0	1	0,05	0,05
Equip/Aces.de Terceiros - Falha/Defeito	0	0	0	0	0	1	1	879,58	879,58
TOTAL LINHA	2	11	2	1	27	85	128	3044,4	23,78



Desligamentos de Linhas de Transmissão por Tipo de Curto-Circuito

É igualmente possível quantificar os desligamentos forçados de natureza elétrica por tipo de curto-circuito, conforme apresentado abaixo. Nota-se que a grande maioria de curtos é do tipo monofásico. E, como esperado, é reduzida a ocorrência de curtos trifásicos (3,75%) e trifásico-terra (1,22%).

NATUREZAS ELÉTRICAS OCORRIDAS NO ANO DE 2006

Tensão (kV)	Naturezas Elétricas – 2006							
	01	02	03	04	34	99	Demais	Total
138	1962	136	129	312	42	17	102	2700
230	447	26	10	25	3	6	13	530
345	118	8	0	13	0	5	8	152
440	40	2	0	1	0	1	1	45
500	293	5	2	9	1	3	10	323
750	8	0	0	0	0	1	0	9
TOTAL	2868	177	141	360	46	33	134	3759
(%)	76,30	4,71	3,75	9,58	1,22	0,88	3,56	100,0

Legenda:
 01 – curto fase-terra
 02 – curto bifásico
 03 – curto trifásico
 04 – curto bifásico-terra
 34 – curto trifásico-terra
 99 – sem natureza elétrica

Desligamentos Simultâneos de Linhas de Transmissão

Os quadros seguintes revelam uma tendência relevante das estatísticas mais recentes do ONS, pois, a partir do ano de 2006, são incluídas estatísticas de desligamentos simultâneos de linhas de transmissão. Esta estatística é muito importante, pois as falhas mais críticas do sistema elétrico correspondem geralmente a falhas simultâneas, especialmente quando ocorrem por causa de modo comum, por exemplo, quando um mesmo raio desliga simultaneamente os dois circuitos de uma linha de transmissão de circuito duplo ou quando raios bifurcados atingem duas linhas no mesmo corredor ou, às vezes, com vários quilômetros de separação, ou quando a saída de um circuito produz a saída de outros, seja por sobrecarga ou por outras causas.

Para fins deste levantamento, foram consideradas as seguintes definições:

Circuitos paralelos – são os que compartilham do mesmo corredor de transmissão.

Circuitos duplos – são os que compartilham da mesma torre.

Demais circuitos – são os que não compartilham do mesmo corredor.

DESLIGAMENTOS SIMULTÂNEOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – 2006

Tensão (kV)	Desligamentos Simultâneos - 2006	
	Todos os circuitos	Circuitos Paralelos/Duplos
138	372	104
230	83	9
345	27	8
440	5	0
500	37	3
750	2	0
TOTAL	526	124

DESLIGAMENTOS SIMULTÂNEOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO TODOS OS CIRCUITOS – 2006

Tensão (kV)	Desligamentos Simultâneos - 2006		
	Total desligamentos	Mesma Causa	Causa Diferente
138	372	220	152
230	80	30	50
345	28	9	19
440	6	4	2
500	38	8	30
750	2	0	2
TOTAL	526	271	255

DESLIGAMENTOS SIMULTÂNEOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO SOMENTE CIRCUITOS DUPLOS E PARALELOS – 2006

Tensão (kV)	Desligamentos Simultâneos - 2006		
	Total desligamentos	Mesma Causa	Causa Diferente
138	104	84	20
230	6	8	0
345	9	3	6
440	0	0	0
500	3	1	2
750	0	0	0
TOTAL	124	96	28

Desligamentos Forçados de Linhas de Transmissão de Corrente Contínua (CC)

O ONS não considera, na elaboração de sua análise estatística de ocorrências do Sistema Interligado, as linhas de transmissão de CC do Sistema de Itaipu, tendo em conta que os bipolos são considerados como transmissão exclusiva de Furnas que consolida e publica estas informações sistematicamente.



Índices de Desempenho de Linhas de Transmissão

O ONS, a partir da coleta e consolidação dos dados de desligamentos das linhas de transmissão informados por todos os agentes do Sistema Interligado Nacional, realiza os cálculos dos índices de desempenho. A técnica estatística e as fórmulas empregadas estão apresentadas nos Procedimentos de Rede do operador.

Para exemplificar, serão apresentados para o ano de 2006 os índices de duração média do desligamento (horas), a disponibilidade (%) e taxa de desligamento por 100 km/ano. Serão consideradas as causas de natureza permanente e fugitiva.

DESLIGAMENTOS POR NATUREZAS DAS CAUSAS PERMANENTES E FUGITIVAS EM 2006

Tensão (kV)	Duração média (hora)	Disponibilidade (%)	Taxa de desligamento (deslig/100km/ano)
750	11,494	99,731	0,632
500	1,689	99,918	1,763
440	0,932	99,981	0,998
345	2,432	99,870	2,423
230	1,614	99,949	2,350
138	2,465	99,959	6,541

DESLIGAMENTOS SOMENTE DE NATUREZA DA CAUSA FUGITIVA, 2006

Tensão (kV)	Duração média (hora)	Disponibilidade (%)	Taxa de desligamento (deslig/100km/ano)
750	0,428	99,991	0,556
500	0,852	99,960	1,696
440	0,293	99,993	0,898
345	1,051	99,941	2,296
230	0,853	99,979	2,232
138	0,398	99,982	6,341

Outra maneira de apresentar estas informações é a indicação das taxas de desligamentos totais (todas as causas) por 100 km, por ano e por nível de tensão, conforme exemplificado na tabela a seguir para os anos de 2002 a 2009.

TAXAS DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS POR 100 KM/ANO

Tensão (kV)	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
765	1,74	1,86	1,10	1,51	0,70	1,63	0,35	2,03
500	2,25	2,54	2,47	2,38	2,23	1,89	2,22	2,18
440	2,62	1,19	0,73	0,76	1,31	0,64	1,15	0,71
345	3,13	2,54	2,35	2,78	2,82	3,47	2,93	2,38
230	3,16	3,67	2,94	2,69	2,80	2,23	2,40	3,02
TOTAL	2,82	2,90	2,47	2,40	2,44	2,11	2,25	2,45

Comentários Gerais

Neste capítulo, foram apresentadas de maneira simplificada informações relativas aos desligamentos forçados e índices de desempenho das atuais linhas de transmissão do sistema interligado.

O objetivo primordial foi apresentar o tema ao leitor com vistas à identificação de possíveis inovações tecnológicas que possam atuar de forma efetiva na redução dos desligamentos.

Observa-se que as principais causas de falhas nas linhas são decorrentes de descargas atmosféricas e queimadas.

Os resultados destes levantamentos foram considerados nas etapas seguintes deste projeto de P&D para a investigação de medidas que permitirão melhorar o desempenho das linhas atuais e futuras do SIN.

Referências

RELATÓRIO DE DESLIGAMENTOS FORÇADOS 2006 – LINHAS DE TRANSMISSÃO. Operador Nacional do Sistema. Disponível em: www.ons.org.br.

PROCEDIMENTOS DE REDE – SUBMÓDULO 20.1 – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS – Operador Nacional do Sistema. Disponível em: www.ons.org.br.

PROCEDIMENTOS DE REDE – SUBMÓDULO 25.8 – INDICADORES DE DESEMPENHO DE EQUIPAMENTOS E LINHAS DE TRANSMISSÃO E DAS FUNÇÕES TRANSMISSÃO E GERAÇÃO – Operador Nacional do Sistema. Disponível em: www.ons.org.br.



CAPÍTULO 4

Prospecções Tecnológicas Realizadas

Sergio de Oliveira Frontin

Leonardo Brant Murça

Vinícius Barros Rêgo

Alexandre Maduro-Abreu



PREFÁCIO

Ruy Carlos Ramos de Menezes

Linhas de transmissão são sistemas extremamente interessantes sob a ótica da engenharia, em vários aspectos. Além da sua importância como componentes fundamentais da infraestrutura de um país, são sistemas que demandam multidisciplinaridade em todos os estágios, desde os seus estudos iniciais para concebê-los até as fases avançadas de sua operação. Quando os desenvolvimentos científicos em tais sistemas são comparados aos de outras áreas da engenharia, pode-se dizer que a área de linhas de transmissão apresenta progressos igualmente muito próximos à fronteira do conhecimento. Também é verdade que esta área interage bastante com outras áreas, beneficiando-se e compartilhando alcances das pesquisas comuns.

Os tempos atuais adicionam ainda mais atrativos a temas associados às linhas de transmissão. Entre tantos destaques, um é o aumento, que se dá em âmbito internacional, das restrições aos potenciais impactos ambientais. Com isso, aumentam as buscas por desenvolvimentos de tecnologias e soluções que possibilitem melhor atender a tais restrições. Adicionalmente às restrições, há também o aspecto patrimonial das faixas necessárias às novas linhas de transmissão. Em alguns países, esse conjunto de limitações chegou ao ponto de praticamente inibir totalmente a criação de novos corredores. Em consequência, é evidente o apelo por soluções otimizadas no aspecto do uso da faixa.

Outro destaque que pode ser creditado às linhas de transmissão é o significativo desenvolvimento das metodologias para análise e projeto. Atualmente, as simplificações de abordagem pelas limitações da capacidade de cálculo já não mais se justificam. Os avanços das ferramentas computacionais são notáveis. Fenômenos que claramente se mostram como não lineares já são assim abordados, deixando-se de lado as simplificações por meio de li-



nearização. Igualmente, fenômenos com comportamento nitidamente dinâmicos já não são mais modelados como estáticos, invariantes no tempo. Nesse contexto, modelos matemáticos têm sido aprimorados e tais avanços também demandam validações mediante avaliação experimental.

No mesmo sentido, está a modelagem de fenômenos climáticos que são ingredientes de grande importância nos carregamentos. Sabidamente, a meta de melhor precisar excitações e resistências exige que fenômenos meteorológicos, tais como vento, sejam ainda mais estudados. Nesse aspecto, o Brasil se interessa muito por tormentas do tipo elétricas que, por serem significativamente diferentes daquelas habitualmente contempladas nas normas, provocam carregamentos de natureza distinta dos usualmente considerados. Neles, a importância do comprimento da linha passa a ter elevada importância na avaliação da confiabilidade. Nesse sentido, deve-se registrar o significativo crescimento dos comprimentos das linhas hoje planejadas e outras já em construção no nosso país.

Há ainda o desenvolvimento de novos materiais, que proporcionem maior capacidade, confiabilidade, durabilidade e economia. A engenharia de materiais tem sido bastante eficaz nesse aspecto. Entre outros, pode-se mencionar o desenvolvimento de novos condutores que, no cotejamento dos prós e contras, conseguem praticamente o pleno domínio dos primeiros.

Mais um grande destaque são os largos passos de tecnologias para monitoramento. Sem dúvida, a fibra ótica e a telefonia celular tiveram um grande papel nisso. Tal possibilidade tem alterado expectativas do gerenciamento, possibilitando passar-se para uma situação de operação mais dinâmica e ativa. Um dos primeiros benefícios é a viabilização de se otimizar o carregamento, chegando-se à condição de se saber o seu limite em tempo real. Outro benefício que se vislumbra num futuro próximo é o monitoramento da integridade estrutural, identificando-se de forma tempestiva alterações do seu comportamento que levam a danos. Desenvolvimentos teórico-analíticos significativos têm sido obtidos nesse sentido.

Em suma, todos os mencionados avanços proporcionam diminuição das incertezas. Por outro lado, o aumento do poder dos modelos e ferramentas, que poderia ser entendido como facilitador, também exige mais desempenho dos profissionais, pois as cobranças por soluções mantêm-se no mesmo nível avançado.

A menção anterior sobre normas remete à reflexão sobre a situação de revisão da norma NBR 5422 – Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica – que se constitui inegavelmente numa grande prioridade do setor elétrico. Certamente os Projetos de P&D, regulamentados pela ANEEL,

podem contribuir para isso. Melhor ainda se estes pudessem se constituir numa ação articulada e eficaz, unindo contribuições de várias entidades concessionárias, para promover e alcançar alguns objetivos de desenvolvimento que são comuns a todos.

O CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*) tem a meta de promover o intercâmbio e o desenvolvimento técnico e tecnológico e da engenharia brasileira no campo da transmissão de energia elétrica. Trata-se de um fórum fértil para isso, onde devem atuar entidades e indivíduos, de maneira coletiva. No tema de linhas de transmissão, está o Comitê de Estudos CE-B2 e seus respectivos Grupos de Trabalho (GTs). Lá, vários desses temas estão na pauta. Obviamente que ações complementares são necessárias, de preferência de forma coordenada e organizada.

Desta rápida abordagem, conclui-se que o Projeto INOVALT alinha-se e constitui-se numa grande contribuição ao Setor Elétrico Brasileiro, promovendo a reflexão, a interação e a aproximação entre concessionárias do serviço público e universidades e centros de pesquisa, de modo a sinalizar prioridades e interesses comuns, facilitando o processo.



Prospecções Tecnológicas Realizadas

Sergio de Oliveira Frontin
Leonardo Brant Murça
Vinícius Barros Rêgo
Alexandre Maduro-Abreu

Objetivo

Este capítulo é uma consolidação dos resultados das prospecções realizadas na etapa desta pesquisa referente à busca das inovações tecnológicas em linhas de transmissão. Os resultados apresentados a seguir serão detalhadamente discutidos nos capítulos subsequentes.

Como descrito anteriormente, visando a uma estruturação da metodologia de pesquisa, o tema linhas de transmissão foi dividido em oito áreas de conhecimento:

- 1) Estudos e Projetos.
- 2) Recapacitação.
- 3) Estruturas.
- 4) Condutores.
- 5) Isoladores.
- 6) Manutenção.
- 7) Monitoramento.
- 8) Meio Ambiente.

Com base nos temas apresentados acima, todos os dados obtidos nas fontes de pesquisa foram classificados em uma dessas áreas. Para otimizar a busca de informações, foram escolhidas fontes de pesquisas consideradas mundialmente importantes no cenário de linhas de transmissão, tais como as bienais do CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Electriques*), a base de dados do IEEE

(*Institute of Electrical & Electronics Engineers*). Já para considerar a produção intelectual no Brasil, foram analisadas as seguintes fontes: o Programa de P&D da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), as bienais do SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), a base de teses da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) além da base de dados do INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial). A fim de obter uma rápida visão do cenário mundial, foram utilizadas também as análises estatísticas fornecidas pelo site *Web of Science*, acessado pelo portal de periódicos da CAPES, e que consiste em uma base de dados contendo informação coletada a partir de milhares de periódicos, livros, conferências etc.

Devido ao grande número de fontes de pesquisa, fez-se necessária uma metodologia de prospecção nestas, a fim de que o processo de busca fosse padronizado. Portanto, foram utilizadas apenas duas palavras-chaves para filtrar as pesquisas: Linhas de transmissão de energia elétrica e Linhas aéreas de transmissão (em inglês *Overhead Transmission Lines*).

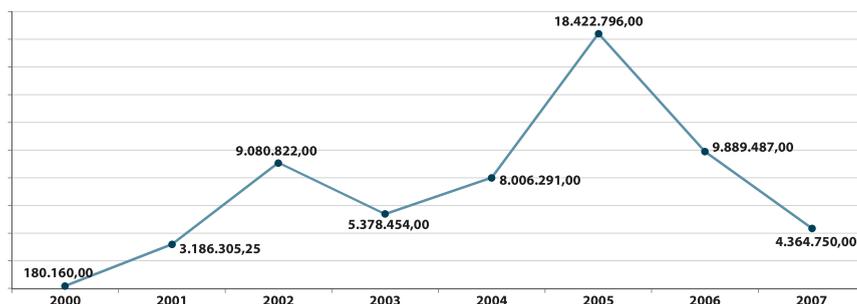
Investimentos em P&D

O Programa de P&D da ANEEL fornece uma boa radiografia dos investimentos no setor elétrico brasileiro para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias. Foi a partir da base de dados dos relatórios disponibilizados pela ANEEL que foram classificados e analisados os investimentos de P&D em linhas de transmissão no país. Como resultado, foram analisados os projetos concluídos e em andamento entre os anos de 2000 e 2007 apresentados na tabela abaixo.

Foram analisados um total de 102 Projetos de P&D e identificados um total de 31 empresas proponentes e 51 empresas/entidades executoras.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D (EM R\$)

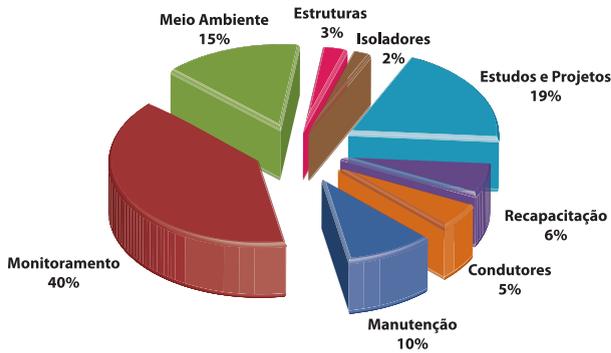
Fonte: Programa de P&D da ANEEL





INVESTIMENTOS EM P&D POR ÁREA DE ESTUDO

Fonte: ANEEL



TOTAL DE INVESTIMENTOS = R\$ 58.509.065,25

Dentre a maior parte dos investimentos do setor de linhas de transmissão, o destaque é para a parte de Monitoramento e Meio Ambiente que, juntas, levam cerca de 55% do investimento no setor, como pode ser visto na figura acima.

Em uma análise ao longo da última década, observa-se que após o ano de 2001 acontece um *boom* de investimentos no setor de transmissão atingindo um auge no ano de 2005, reduzindo a partir daí. Este movimento acompanha não somente os valores em investimento, mas também o número de pesquisas na área de linhas de transmissão, como ilustra a tabela abaixo.

NÚMERO DE PROJETOS POR ÁREA/ANO

Fonte: ANEEL

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Total por área
Estruturas	-	-	1	2	-	1	-	-	4
Isoladores	-	-	1	-	2	-	-	-	3
Estudos e Projetos	-	1	3	3	4	6	5	3	25
Recapacitação	-	-	1	-	2	-	1	1	5
Condutores	-	-	1	2	1	1	-	1	6
Manutenção	-	1	-	1	2	2	2	-	8
Monitoramento	1	6	4	1	8	10	5	-	35
Meio Ambiente	-	-	1	5	-	4	4	2	16
Total por ano	1	8	12	14	19	24	17	7	102

Atual Produção Acadêmica Brasileira

Foram analisadas um total de 83 teses registradas entre os anos de 1999 e 2008 no banco de dados da CAPES, entre mestrados profissionalizantes, mestrados e doutorados. Dentre estas teses, a maioria concentrou-se na

área de Estudos e Projetos, com 27 teses, Estruturas, com 13 teses, e Condutores e Meio Ambiente com 11 teses cada. Ver tabela abaixo.

NÚMERO DE TESES POR ÁREA/ANO

Fonte: CAPES

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Teses por área
Estruturas	1	1	1	-	-	2	2	1	4	1	13
Isoladores	1	-	-	-	1	-	2	1	3	2	10
Estudos e Projetos	3	-	1	1	3	4	6	3	2	4	27
Recapacitação	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	2
Condutores	2	-	-	3	1	-	2	1	-	2	11
Manutenção	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	2
Monitoramento	-	-	1	-	-	-	-	3	1	2	7
Meio Ambiente	1	-	1	1	2	1	-	4	1	-	11
Teses por ano	8	2	5	5	7	8	13	13	11	11	83

TIPO DE TESE DESENVOLVIDA

Fonte: CAPES

	Profissionalizante	Mestrado	Doutorado
Estruturas	-	13	-
Isoladores	1	8	1
Estudos e Projetos	1	21	5
Recapacitação	-	2	-
Condutores	-	11	-
Manutenção	-	2	-
Monitoramento	-	6	1
Meio Ambiente	3	7	1
Total	5	70	8

De acordo com a tabela acima, os projetos de P&D foram resultado de 70 dissertações de mestrado, oito teses de doutorado e cinco mestrados profissionalizantes.

Entre as instituições que mais se destacam na produção de trabalhos acadêmicos está a Universidade de Pernambuco com 15% das teses.

Publicações e Seminários

Buscando classificar e identificar as áreas de evidência no tema linhas de transmissão, foram analisados 117 informes publicados no SNPTEE (2001-2009), 136 artigos publicados nas bienais do CIGRÉ (1998-2008), 82 artigos da base de dados do IEEE (sendo 72 entre os anos 2006 e 2009).



Com base nos dados fornecidos pelo SNPTEE, as áreas que mais se mostraram em evidência foram os temas Estudos e Projetos e Condutores que, juntos, somam 54 trabalhos que representam mais de 40% dos trabalhos publicados, conforme tabela abaixo.

INFORMES PUBLICADOS NO SNPTEE

	2001	2003	2005	2007	2009	Informes por área
Estruturas	1	8	2	–	4	15
Isoladores	3	2	–	–	–	5
Estudos e Projetos	4	10	2	4	9	29
Recapacitação	7	1	2	1	1	12
Condutores	8	5	4	–	8	25
Manutenção	2	1	1	2	3	9
Monitoramento	2	1	1	4	6	14
Meio Ambiente	1	4	1	1	1	8
Trabalhos por ano	28	32	13	12	32	117

O CIGRÉ tem dado mais atenção aos temas Monitoramento e Recapacitação, ficando Estudos e Projetos em terceira posição com relação ao número de trabalhos publicados. Juntas, estas três áreas representam 55% dos trabalhos publicados pelo CIGRÉ em suas Bienais desde 1998.

TRABALHOS PUBLICADOS NAS BIENAS DO CIGRÉ

	1998	2000	2002	2004	2006	2008	Trabalhos por área
Estruturas	4	1	3	4	4	3	19
Isoladores	3	1	–	1	3	1	9
Estudos e Projetos	2	4	4	3	7	3	23
Recapacitação	4	7	1	7	–	6	25
Condutores	3	–	1	6	1	1	12
Manutenção	1	3	2	2	6	3	17
Monitoramento	7	6	2	4	2	6	27
Meio Ambiente	1	–	–	–	3	–	4
Trabalhos por ano	25	22	13	27	26	23	136

A base de dados do IEEE apresenta números que apontam para áreas que se preocupam com a natureza elétrica da linha de transmissão, sendo este um dos focos da instituição. Portanto, a parte de problemas envolvendo isoladores foi um dos temas mais discutidos entre os anos de 2006 e 2009, seguido pelos temas Estudos e Projetos e Monitoramento. Foram analisados 82 trabalhos, que estão classificados na tabela a seguir:

TRABALHOS PESQUISADOS NO IEEE

	2000	2003	2006	2007	2008	2009	Trabalhos por área
Estruturas	–	1	1	–	–	–	2
Isoladores	3	1	2	7	8	6	27
Estudos e Projetos	–	–	1	2	8	6	17
Recapacitação	–	–	2	1	–	3	6
Condutores	1	–	4	–	2	1	8
Manutenção	–	4	4	1	–	–	9
Monitoramento	–	–	1	3	2	4	10
Meio Ambiente	–	1	2	–	–	–	3
Trabalhos por ano	4	7	17	14	20	20	82

Patentes

Uma pesquisa no banco de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) não revelou uma produção nacional muito forte no campo de patentes. Foram encontradas apenas 13 patentes no período de 2000 a 2008. Destaques para as áreas de Manutenção e Monitoramento com cinco patentes cada.

PATENTES REGISTRADAS NO INPI

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Patentes por área
Estruturas	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
Isoladores	–	–	–	–	–	–	1	–	–	1
Estudos e Projetos	–	–	–	1	1	–	–	–	–	2
Recapacitação	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
Condutores	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
Manutenção	1	1	2	1	–	–	–	–	–	5
Monitoramento	–	–	–	1	2	1	1	–	–	5
Meio Ambiente	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
Patentes por ano	1	1	2	3	3	1	2	0	0	13

Panorama Geral

Avaliando todas as fontes apresentadas anteriormente observa-se que a maior parte dos trabalhos em linhas de transmissão analisados, 533 no total, concentra-se nas áreas de Estudos e Projetos, Monitoramento e Condutores. Ficando as outras fontes com uma distribuição praticamente igualitária em número de trabalhos.

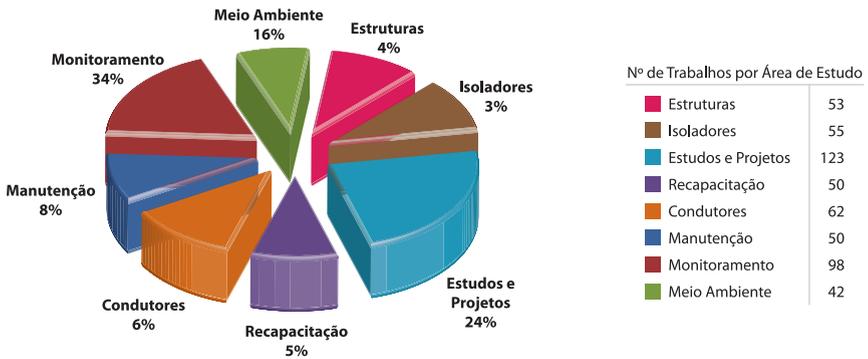


TRABALHOS REFERENTES À LT'S POR FONTE DE PESQUISA

	CAPES	P&D - ANEEL	SNPTEE	CIGRÉ	IEEE	INPI	Total por área
Estruturas	13	4	15	19	2	0	53
Isoladores	10	3	5	9	27	1	55
Estudos e Projetos	27	25	29	23	17	2	123
Recapacitação	2	5	12	25	6	0	50
Condutores	11	6	25	12	8	0	62
Manutenção	2	8	9	17	9	5	50
Monitoramento	7	35	14	27	10	5	98
Meio Ambiente	11	16	8	4	3	0	42
Total por fonte	83	102	117	136	82	13	533

TRABALHOS REFERENTES A LINHAS DE TRANSMISSÃO

Fonte: CAPES, ANEEL, SNPTEE, CIGRÉ, IEEE, INPI



Por meio das teses de mestrado e doutorado da fonte CAPES de 1999 a 2008, é possível notar que as universidades que mais produziram trabalhos no contexto de linhas de transmissão foram as universidades de Pernambuco, Minas Gerais e Rio de Janeiro. No âmbito das áreas de conhecimento que mais produziram projetos de P&D, temos Engenharias Elétrica, Civil e Mecânica, nesta ordem. Estes dados estão representados nas tabelas seguintes.

Universidades	Nº de Teses
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE	12
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG	8
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ	8
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS	5
Pontifícia Universidade Católica do Rio Janeiro - PUC/RJ	4
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	4
Universidade Federal de São Paulo - USP	4
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC/MG	3
Universidade de Brasília - UnB	3
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG	3

Universidades	Nº de Teses
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI	3
Universidade Federal do Pará - UFPA	3
Instituto Militar de Engenharia - IME	2
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF	2
Universidade Federal do Amazonas - UFAM	2
Universidade Federal do Paraná - UFPR	2
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT	1
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUC/PR	1
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUC/RS	1
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP	1
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF	1
Universidade Estadual do Rio Janeiro - UERJ	1
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP	1
Universidade Federal de Goiás - UFG	1
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP	1
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar	1
Universidade Federal de Sergipe - UFS	1
Universidade Federal de Uberlândia - UFU	1
Universidade Federal Fluminense - UFF	1
Universidade Mogi das Cruzes - UMC	1
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR	1

Área de Conhecimento	Nº de Teses
Engenharia Elétrica	26
Engenharia Mecânica	15
Engenharia Civil	14
Engenharia de Estruturas	3
Engenharia de Produção	3
Engenharia dos Materiais	3
Energia Nuclear	2
Engenharia Química	2
Física	2
Tratamento da Informação	2
Ciências Biológicas	1
Economia	1
Engenharia Florestal	1
Geografia	1
Geologia	1
Interunidades de Energia	1
Metereologia	1
Sistema de Computação	1

Com relação aos trabalhos relativos ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, desde 2000, foram avaliadas as empresas que mais propuseram projetos e as entidades que mais executaram projetos de P&D. No que tange às empresas proponentes, a ELETRONORTE se des-



tacou bastante com relação às demais, propondo 22 projetos. O Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), o CEPEL e a Universidade do Pará (UFPA) demonstraram ser grandes polos de execução de projetos de P&D aplicados a linhas de transmissão com 12, sete e seis projetos, respectivamente. Estas análises podem ser feitas de acordo com as tabelas a seguir.

Empresas Proponentes	Nº de Programas
ELETRONORTE	22
FURNAS	9
COPEL	7
CTEEP	6
CHESF	5
CEMIG	5
ETIM	5
ELETROSUL	4
Expansion	3
CELESC	3
CELPE	3
COELBA	3
CEMAT	2
CEEE	2
COELCE	2
EATE	2
ELETROPAULO	2
ENERGIPE	2
LIGHT	2
TSN	2
Cachoeira Paulista Transmissora de Energia Ltda.	1
AMPLA	1
Centrais de Transmissão Nordeste S.A.	1
CPFL	1
ELEKTRO	1
ENTE	1
ERTE	1
ETEP	1
GTESA	1
NOVATRANS	1
Rio Grande Energia S.A.	1

Empresas Executoras	Nº de Programas
Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento - LACTEC	12
Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - CEPEL	7
Universidade Federal do Pará - UFPA	6
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicação - CPqD	3
Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo - FUSP	3

Empresas Executoras	Nº de Programas
Fundação Euclides da Cunha	3
Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - FUNDEP	2
Fundação de Ensino de Engenharia em Santa Catarina - FEESC	2
Sociedade Educacional Ideal Ltda. - FACI	2
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP	2
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG	2
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE	2
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	2
Universidade Federal do Maranhão - UFMA	2
CEFET - MG	1
CEMEF Engenharia	1
Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico - CDT/UnB	1
Cooperativa de Trabalho de Engenheiros e Arquitetura	1
COPPETEC	1
Elepot Estudos e Pesquisas Ltda. - EEP	1
Fundação Aplicações de Tecnologias Críticas	1
Fundação Bio-Rio - FBR	1
Fundação de Apoio à Pesquisa FUNPEA	1
Fundação de Apoio à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FAURGS	1
Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria - FUPAI	1
Fundação Fritz Muller	1
Fundação Sousândrade	1
Guimmy Industrial Ltda.	1
ICF Consultoria do Brasil Ltda.	1
Instituto Brasileiro para o Desenvolvimento - IBRATE	1
Instituto de Desenvolvimento da Fruticultura	1
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Minas Gerais - IPT	1
Instituto Hidroambiental	1
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE	1
Instituto Tecnológico SIMEPAR	1
J2 Consultoria e Engenharia S/S Ltda.	1
JRMED Consultoria Ltda.	1
KEMA Consulting Brasil Ltda.	1
LTS Consultoria e Serviços Ltda.	1
Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUC/PR	1
Pontifícia Universidade Católica do Rio Janeiro - PUC/RJ	1
Ritz do Brasil	1
Universidade de Brasília - UnB	1
Universidade Estadual Paulista - UNESP	1
Universidade Federal de Campina Grande	1
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI	1
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF	1
Universidade Federal do Amazonas - UFAM	1
Universidade Federal do Ceará - UFC	1
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS	1
Universidade Federal do Tocantins - UFT	1



Nos informes nacionais do SNPTEE, foram analisadas as empresas mais representadas na área de linhas de transmissão. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e a Furnas Centrais Elétricas S.A. foram as mais representadas nos informes do Seminário, com 19 e 18 representações respectivamente. A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) e Geração e Transmissão Paranaense S.A. (COPEL) também tiveram importante participação no SNPTEE, cada uma com 15 e 12 representações, respectivamente. Estas análises foram feitas a partir da tabela seguinte.

Empresas Representadas	Nº de Informes
Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - CEPEL	19
FURNAS	18
CEMIG	15
CHESF	12
COPEL	12
ELETRONORTE	10
Instituto de Tecnologia para Desenvolvimento - LACTEC	10
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG	8
BATÁVIA Engenharia e Consultoria Ltda.	4
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicação - CPqD	4
CTEEP	4
ENGETOWER - Engenharia e Consultoria Ltda.	4
Fluxo Engenharia Ltda.	3
Furawaka	3
Hot Line Construções Elétricas Ltda.	3
LIGHT	3
Nexans Brasil	3
3M do Brasil	2
A. Rigueira Consultoria	2
ABB	2
COELBA	2
COPPE/RJ	2
CPFL	2
ELECTROVIDRO	2
Eletrobrás	2
Eletronet	2
ELETROPAULO	2
Enersul Rede de Energia	2
Érico Lisboa Pesquisa e Desenvolvimento	2
Fundação Padre Leonel Franca	2
JFNOLASCO Consultoria	2
Leme Engenharia	2
Lightning Research Center - LRC	2
Marte Engenharia	2
NORTON	2

Empresas Representadas	Nº de Informes
Universidade de São Paulo - USP	2
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG	2
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE	2
Universidade Federal Fluminense - UFF	2
AES Sul	1
AGN Estrutural	1
Atol Topografia	1
AyaCon Consultores Ltda.	1
BB&E	1
Bluestar Silicones	1
CERJ - Cia de Eletricidade do Rio de Janeiro	1
Companhia Paranaense de Energia	1
COPELE	1
DAMP Elétric	1
ELETROSUL	1
Empresa Paulista de Transmissão de Energia Elétrica - EPTE	1
Enerbrasil - Energias Renováveis do Brasil Ltda.	1
ENGETRAN	1
ENPRO Engenharia	1
ESCELSA - Energias do Brasil	1
Escola Politécnica da USP - EPUSP	1
Expansion	1
FCI	1
FDTE	1
FMR Consultoria e Assessoria em Engenharia Ltda.	1
GTESA	1
IMA/RJ	1
Jauru Transmissora	1
KOSMANN Engenharia	1
LAC/UFRGS	1
LTs Consultoria e Serviços Ltda.	1
Nordeste Transmissora de Energia	1
NSA Cons. e Inf. Ltda.	1
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico	1
Pirelli Cabos S.A.	1
PLP	1
Pontifícia Universidade Católica do Rio Janeiro - PUC/RJ	1
PRI Engenharia	1
Sinergia E C Ltda.	1
Solikap	1
TACTA	1
Universidade de Brasília - UnB	1
Universidade Estadual Paulista - UNESP	1
Universidade Federal da Paraíba - UFPB	1
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	1
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS	1
Vértice Engenharia Ltda.	1



Os Estados Unidos, Brasil, Canadá e China apresentaram-se com grandes contribuições em pesquisas relacionadas às linhas de transmissão, considerando o número de informes internacionais apresentados, como pode ser visto na próxima tabela. Nesta tabela, constam os informes apresentados pelo CIGRÉ e pelo IEEE.

País	Nº de Trabalhos
Estados Unidos	21
Brasil	19
Canadá	18
China	18
Japão	12
Alemanha	11
Inglaterra	10
França	9
Holanda	8
Itália	8
Rússia	8
África da Sul	7
Bélgica	7
Coreia do Sul	7
Índia	7
Noruega	7
Austrália	6
Espanha	6
Romênia	6
Suíça	6
Egito	5
Venezuela	5
Eslováquia	4
Finlândia	4
Suécia	4
Áustria	3
Dinamarca	3
Nova Zelândia	3
Arábia Saudita	2
Colômbia	2
Eslovênia	2
Irã	2
Irlanda	2
México	2
Portugal	2
Grécia	1
Israel	1
Jordânia	1
Kuwait	1
Polónia	1

País	Nº de Trabalhos
República das Ilhas Seychelles	1
República Tcheca	1
Sérvia e Montenegro	1
Tailândia	1
Turquia	1
Vietnã	1

Web of Science

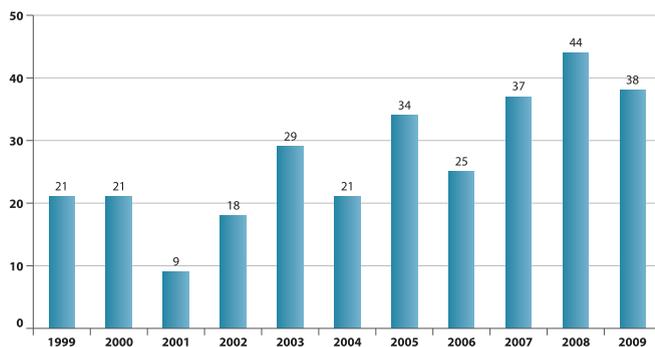
O *Web of Science* é um Banco de Dados de referências bibliográficas do *Institute for Scientific Information* (ISI), que contém informações sobre a produção científica produzida no mundo a partir de 1974. O *Web of Science* é uma ferramenta que permite aos pesquisadores encontrar informações nas áreas das ciências, ciências sociais, artes e humanidade nos 9.300 jornais de pesquisa mais prestigiosos e de alto impacto do mundo.

Com o objetivo de obter uma visão geral quantitativa do número de trabalhos publicados no exterior e identificar os países e instituições mais atuantes, foi feita uma busca com o tema “*Overhead Power Line*” na base de dados do *Web of Science*. A busca considerou os anos de 1999 a 2009. Foi encontrado um total de 297 trabalhos. O número de publicações por ano pode ser observado a seguir:

NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR ANO

ENTRADA: “OVERHEAD POWER LINE”

1999 A 2009



TOTAL DE PUBLICAÇÕES: 297

Fonte: *Web of Science*

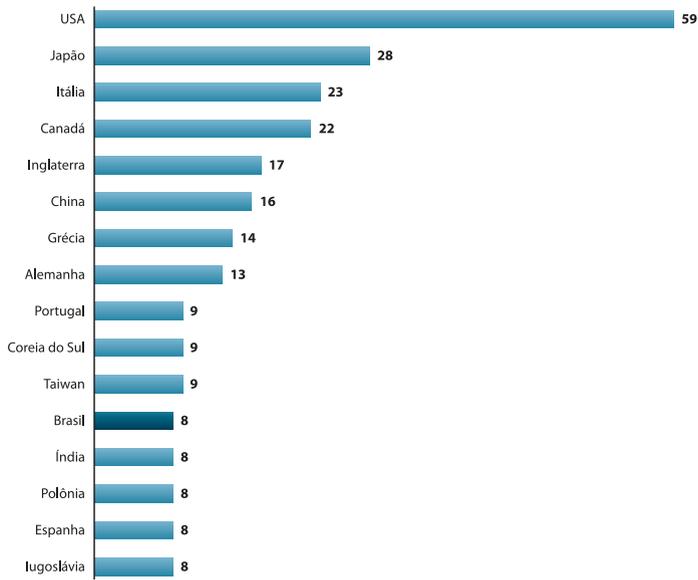
Dentre os países que mais se destacaram na publicação de artigos com o tema “*Overhead Power Line*” estão Estados Unidos, Japão, Itália e Canadá. O Brasil aparece somente em 12º lugar no *ranking*.



NÚMERO DE PUBLICAÇÕES POR PAÍS

ENTRADA: "OVERHEAD POWER LINE"

1999 A 2009



TOTAL DE PUBLICAÇÕES: 297

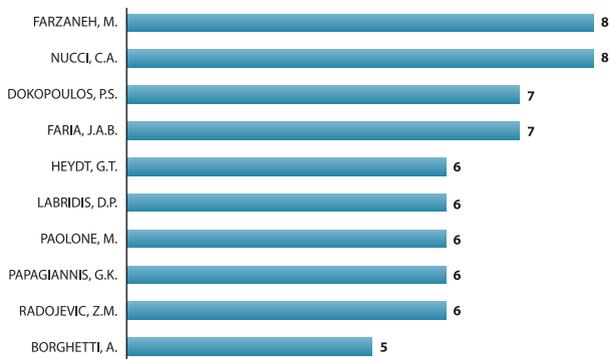
Fonte: *Web of Science*

Entre os 10 autores e as 10 instituições mais citadas estão:

10 AUTORES MAIS CITADOS

ENTRADA: "OVERHEAD POWER LINE"

1999 A 2009



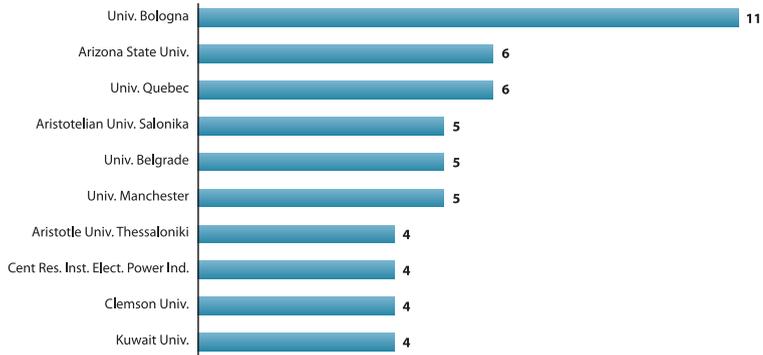
TOTAL DE AUTORES: 761

Fonte: *Web of Science*

INSTITUIÇÕES MAIS CITADAS

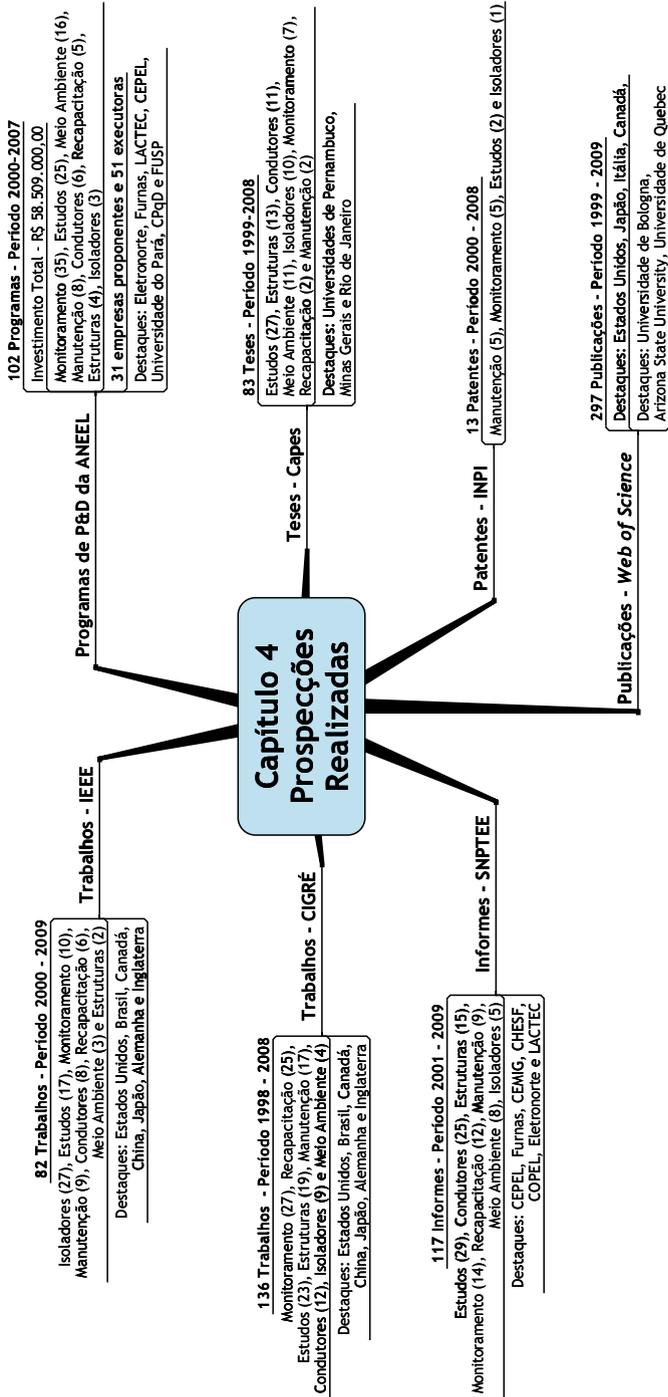
ENTRADA: “OVERHEAD POWER LINE”

1999 A 2009



TOTAL DE INSTITUIÇÕES: 335

Fonte: *Web of Science*





CAPÍTULO 5

Estudos e Projetos para Implantação de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin



PREFÁCIO

José Henrique Machado Fernandes

O Brasil é um país de dimensões continentais e possui características que naturalmente conduzem ao desenvolvimento de um extenso sistema elétrico. As distâncias entre as extremidades norte e sul e leste e oeste do país alcançam, cada uma delas, cerca de 4.000 km, fato este que já levou a implantação de milhares de quilômetros de linhas de transmissão para interligar os centros geradores aos centros consumidores.

Entretanto, o Brasil ainda possui um grande potencial hidroelétrico a ser desenvolvido, sendo que as novas usinas localizam-se em pontos distantes dos grandes centros de consumo, além de possuírem, devido às distâncias, ciclos hidrológicos diferentes que, quando interligados pelas linhas de transmissão, proporcionarão um grande ganho energético para todo o Sistema Elétrico Brasileiro.

Assim, verifica-se que será necessário ampliar a implantação de sistemas de transmissão à longa distância, e que esses sistemas irão transportar blocos de energia cada vez maiores. Adicionalmente, os requisitos ambientais exigirão uma crescente eficiência energética dos corredores de transporte de energia. Neste cenário, será de grande importância o desenvolvimento de alternativas que reduzam o custo do transporte de energia e propiciem uma maior densidade de potência por faixa de corredor ocupada, como linhas de transmissão em corrente alternada com potência natural elevada, linhas com maior número de condutores por fase e linhas com tensões de 750 e 1000 kV. Além disso, será sempre necessário avaliar a utilização da tecnologia de corrente contínua, que é uma opção natural para o transporte de energia à longa distância.

Para dar as devidas considerações a todos esses fatores condicionantes, são realizados os estudos de planejamento que visam definir a alternativa de



mínimo custo técnica, econômica e ambientalmente viável, para cada caso. Nessa etapa, é de fundamental importância que inovações tecnológicas possam ser colocadas à disposição dos planejadores, para que elas sejam consideradas e avaliadas nos estudos de alternativas.

As possibilidades de se realizar grandes otimizações nos sistemas elétricos é a característica principal da etapa de planejamento.

Depois de definidos e aprovados, nos documentos setoriais, as alternativas de transmissão a serem utilizadas, bem como as suas características básicas, a etapa posterior é a oferta pública dessas alternativas, por meio de leilões realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Nessa etapa, o edital de licitação apresenta uma série de requisitos que os empreendedores devem cumprir, mas propicia também liberdade para que otimizações possam ser implantadas nos sistemas de transmissão. Assim, ganham importância os estudos de projeto básico e de pré-projeto nos quais podem ser otimizadas diversas características elétricas e mecânicas das linhas de transmissão que não só propiciarão um projeto mais econômico, como também mais seguro.

Em particular, os estudos integrados para definição dos traçados das linhas de transmissão, para a escolha dos tipos de torres a serem utilizadas, para a definição do tipo de condutor que resulte na linha de transmissão mais econômica, bem como as avaliações dos efeitos eletromagnéticos e das faixas de passagem resultantes e do desempenho a surtos atmosféricos, são alguns tópicos de grande importância a serem considerados.

Entretanto, para o adequado desenvolvimento dos estudos e projetos, é necessário que estejam disponíveis nesse momento para os engenheiros uma grande gama de dados, programas computacionais e ferramentas auxiliares de projeto.

Novamente, também nessa etapa, é necessário que as inovações tecnológicas estejam disponíveis para os projetistas, de modo que as fronteiras do conhecimento humano possam ser alcançadas.

Em seguida, tendo sido realizada a grande maioria das principais definições, tem-se o projeto executivo das linhas de transmissão, etapa na qual várias otimizações ainda podem ser implementadas em particular quanto ao projeto mecânico das estruturas, quanto ao projeto de fundações e quanto à utilização de sistemas computacionais de projeto de linha de transmissão, dentre outros. Portanto, verifica-se que, dentre os empreendimentos de engenharia, a linha de transmissão é um dos que mais oferece possibilidade de otimização.

Os estudos e os projetos representam menos do que 5% dos custos dos empreendimentos, e a diferença de custos entre um projeto normal e um projeto otimizado é menor ainda, sendo que o resultado de um projeto oti-

mizado pode representar grandes economias e possibilidades de expressivos ganhos para o empreendimento. Está, pois, nas mãos dos engenheiros, uma grande oportunidade de escolher entre ser conservador e continuar a repetir o que está estabelecido ou ser inovador e exercer a criatividade que a profissão lhe oferece. Não há, portanto, nenhuma razão para não otimizar. Por isso, investimentos em pesquisas, em desenvolvimentos e o compartilhamento dos resultados e das experiências são fundamentais.

Assim, o projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado INOVA LT constitui uma grande contribuição para o Setor Elétrico Brasileiro, pois estabelece e ordena as principais linhas de pesquisa a serem realizadas no campo das linhas de transmissão no Brasil, bem como propõe a hierarquização dos temas mais promissores, de modo que eles possam, em breve, preencher as lacunas de conhecimento existentes, além de possibilitar o melhor direcionamento para utilização dos recursos financeiros a serem aplicados nessa área que, como vimos, é extremamente promissora e certamente propiciará ganhos expressivos para o país.



Estudos e Projetos para Implantação de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Estudos e Projetos para a Implantação de Linhas de Transmissão*.

Palavras-chave

Linha de transmissão, cabos condutores, cabos para-raios, cabos OPGW, aterramento, feixe expandido, campo elétrico, campo magnético, carregamento, ampacidade, repotenciação, compactação, campo de vento, velocidade do vento, meteorologia, corrosão, proteção catódica, desempenho, risco de falha, descargas atmosféricas, transitórios eletromagnéticos, efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos, estruturas, estudos mecânicos, escolha econômica de condutores, estudos integrados de otimização, erosão do solo, fundações, estudos civis, flechas e trações de cabos, temperatura do condutor, impactos ambientais, gasodutos, dutos, acoplamento indutivo e resistivo, qualidade de energia elétrica, distorção harmônica, confiabilidade, perda joule, perda corona, levantamento topográfico, geoprocessamento, rádio interferência, ruído audível.

Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas 27 teses, sendo 21 de mestrado, cinco de doutorado e um profissionalizante, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
4	2	3	6	4	3	1	1	-	3

UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal de Minas Gerais (4).
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (4).
- Universidade Federal de Pernambuco (3).
- Universidade Federal de São Paulo (2).
- Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2).
- Instituto Militar de Engenharia (2).
- Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Ilha Solteira (1).
- Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais (1).
- Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1).
- Universidade Federal de Santa Catarina (1).
- Universidade Federal de Campina Grande (1).
- Universidade Estadual de Campinas (1).
- Universidade Federal de Goiás (1).
- Universidade Federal do Paraná (1).
- Universidade Federal de Itajubá (1).
- Universidade Federal do Pará (1).

Total de 16 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia Elétrica (16).
- Engenharia de Estruturas (3).
- Engenharia Civil (2).
- Tratamento da Informação (2).
- Sistemas de Computação (1).

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.



- Engenharia Nuclear (1).
- Interunidades de Energia (1).
- Meteorologia (1).

ASSUNTOS INVESTIGADOS: ⁽¹⁾

- Desempenho de linhas de transmissão (10).
- Efeitos eletrostáticos – eletromagnéticos (6).
- Estudos civis – fundações (6).
- Cálculo de parâmetros (2).
- Estudos integrados de otimização (2).
- Carregamento (1).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados 25 programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	1999
-	3	5	6	4	3	3	1	-

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D POR ASSUNTO (EM R\$):

Fonte: ANEEL

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Total por área
Desempenho	-	930.000	870.000	790.000	848.000	625.000	476.000	4.539.000
Estudos	420.000	-	-	1.050.000	1.354.549	333.000	-	3.157.549
Efeitos	-	480.000	-	-	420.000	634.000	-	1.534.000
Mecânico	-	-	-	-	-	443.000	774.000	1.217.000
Civil	-	436.964	-	-	400.000	-	-	836.964
Total por ano	420.000	1.846.964	870.000	1.840.000	3.022.549	2.035.000	1.250.000	
TOTAL					11.284.513			

EMPRESAS PROPONENTES: ⁽²⁾

- ELETRONORTE (4).
- FURNAS (4).
- CEMIG Distribuição S.A. – CEMIG (4).

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.

- Copel Transmissão S.A. – COPEL (3).
- Companhia Hidro Elétrica de São Francisco – CHESF (2).
- Empresa Energética de Sergipe S.A. - ENERGIPE (2).
- Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. – CELESC (1).
- Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL (1).
- Light Serviços de Eletricidade S.A. – LIGHT (1).
- Expansion Transmissão de Energia Elétrica S.A. – Expansion (1).
- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP (1).
- ELETROSUL Centrais Elétricas S.A. (1).

Total de 12 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS:⁽²⁾

- Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (2).
- Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (2).
- Universidade Federal do Pará – UFPA (2).
- Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF (1).
- Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (1).
- Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (1).
- Universidade Estadual Paulista – UNESP (1).
- Fundação Euclides da Cunha – FEC – Universidade Federal Fluminense (3).
- Fundação de Desenvolvimento de Pesquisa – FUNDEP (2).
- Fundação Bio-Rio – FBR (1).
- Fundação de Ensino de Engenharia em Santa Catarina – FEESC (1).
- Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo – FUSP (1).
- Fundação COPPETEC (1).
- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (3).
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (3).
- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG (1).
- Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD (1).
- Instituto Brasileiro para o Desenvolvimento – IBRATE (1).
- Instituto Tecnológico SIMEPAR (1).
- ELEPOT – Estudos e Pesquisas Ltda. – EEP (2).
- Sociedade Educacional Ideal Ltda. – FACI (1).
- Cooperativa de Trabalho de Engenheiros e Arquitetura – COOESA (1).
- CEMEF Engenharia (1).

Total de 23 entidades.



ASSUNTOS INVESTIGADOS: ⁽²⁾

- Desempenho de linhas de transmissão (10).
- Efeitos eletrostáticos – eletromagnéticos (4).
- Estudos mecânicos – ventos (3).
- Carregamento (3).
- Cálculo de parâmetros (2).
- Estudos civis – fundações (3).

SNPTEE

Foram analisados 29 informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica- SNPTEE, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO - ANOS ÍMPARES:

2009	2007	2005	2003	2001
9	4	2	10	4

EMPRESAS REPRESENTADAS: ⁽³⁾

- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (7).
- Furnas Centrais Elétricas S.A. (6).
- Eletronorte (4).
- CEMIG – Centrais Elétricas de Minas Gerais (3).
- Batávia Engenharia & Consultoria Ltda. (3).
- Eletrobrás (2).
- Marte Engenharia (2).
- CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (2).
- LACTEC (2).
- LIGHT Serviços de Eletricidade S.A. (1).
- CERJ – Cia de Eletricidade do Rio de Janeiro (1).
- ELETROPAULO (1).
- Jauru Transmissora (1).
- Érico Lisboa Pesquisa e Desenvolvimento (1).
- Fundação Padre Leonel Franca (1).
- Expansion Transmissão de Energia Elétrica S.A. (1).

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.

- Enerbrasil – Energia Renováveis do Brasil Ltda. (1).
- Lightning Research Center – LRC/UFMG (1).
- Universidade Federal de Minas Gerais (1).
- Universidade Federal de Santa Catarina (1).
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1).
- Universidade Federal da Paraíba (1).
- Universidade de São Paulo (1).
- Universidade de Brasília (1).
- COPPE/UFRJ (1).
- Leme Engenharia Ltda. (1).
- Engetower Engenharia (1).
- Kosmann Engenharia (1).
- PRI Engenharia (1).
- JFNolasco Consultoria (1).
- LTs Consultoria e Serviços (1).
- Fluxo Engenharia Ltda. (1).
- Vértice Engenharia Ltda. (1).
- Solikap (1).
- ABB (1).
- CPqD (1).

Total de 36 empresas.

ASSUNTOS INVESTIGADOS:⁽³⁾

- Carregamento (8).
- Estudos civis – fundações (6).
- Estudos integrados de otimização (6).
- Desempenho de linhas de transmissão (5).
- Efeitos eletrostáticos – eletromagnéticos (3).
- Estudos mecânicos – ventos (1).

CIGRÉ

Foram analisados 23 trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas em Paris de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	2000	1998
3	7	3	4	4	2



PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Brasil (5).
- Austrália (4).
- Alemanha (2).
- Índia (2).
- Rússia (2).
- Irã (2).
- Itália (1).
- Holanda (1).
- Egito (1).
- Inglaterra (1).
- China (1).
- Grécia (1).
- Japão (1).
- Suécia (1).
- África do Sul (1).
- Noruega (1).
- Venezuela (1).

Total de 17 países.

ASSUNTOS INVESTIGADOS:⁽⁴⁾

- Estudos integrados de otimização (8).
- Confiabilidade de linhas de transmissão (6).
- Desempenho de linhas de transmissão (3).
- Efeitos eletrostáticos – eletromagnéticos (3).
- Estudos civis – fundações (2).
- Estudos mecânicos – estruturas (1).

INPI

Para o tema em questão, foram identificadas duas patentes depositadas no INPI.

- 2004 – Captador de descarga elétrica atmosférica (Brasil).
- 2003 – Blindagem do campo magnético gerado por uma linha de transmissão (Itália).

IEEE

Foram analisados 17 trabalhos apresentados durante os diversos seminários promovidos pelo IEEE, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2009	2008	2007	2006
6	8	2	1

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- China (7).
- Venezuela (2).
- Egito (2).
- Índia (1).
- Brasil (1).
- Estados Unidos (1).
- Colômbia (1).
- Kuwait (1).
- Arábia Saudita (1).

Total de 9 países.

ASSUNTOS INVESTIGADOS:⁽⁴⁾

- Efeitos eletrostáticos – eletromagnéticos (8).
- Desempenho de linhas de transmissão (6).
- Confiabilidade de linhas de transmissão (2).
- Estudos civis – fundações (1).

Temas para Futuros Desenvolvimentos

Das 27 teses de doutorado e mestrado analisadas, os assuntos mais estudados foram: desempenho de linhas de transmissão, efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos e estudos civis.

Com relação ao desempenho, os itens abordados foram: efeito das descargas atmosféricas nos cabos OPGW, estudos de aterramento das torres e efeito do tipo do solo, coleta de dados dos parâmetros que caracterizam os raios atmosféricos, correlação entre as variáveis meteorológicas e a intensificação de descargas atmosféricas, modelagem dos diversos componentes das linhas de transmissão para estudos de desempenho a descargas atmosféricas.

No tocante aos demais temas, os assuntos mais relevantes foram: análise de técnicas para redução dos campos elétricos e magnéticos e seus efeitos sobre o corpo humano, corrosão de pés de torres, cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, métodos estatísticos aplicados ao cálculo de ampacidade dos condutores.

Dos 25 Programas de P&D submetidos à ANEEL, 10 se referem ao tema desempenho, tendo como assuntos mais importantes medição e modelagem da impedância de aterramento das torres, dimensionamento de cabos OPGW, tecnologias empregadas para redução de falhas frente a descargas atmosféricas, novos sistemas e critérios para análise de desempenho de linhas de transmissão.

Quatro programas referem-se ao tema efeitos eletrostáticos e eletromag-



néticos, onde foram abordados travessia de linhas de transmissão com dutos, desenvolvimento de modelos eletrogeométricos para linhas de transmissão.

Os 29 informes técnicos apresentados no SNPTEE deram ênfase aos temas carregamento, estudos integrados de otimização e estudos civis. Os estudos integrados de otimização referem-se a linhas compactas, de 765, 500 kV e de 230 kV em circuito duplo.

Com relação ao tema carregamento, foram apresentados informes sobre o comportamento térmico dos condutores, métodos de cálculo da ampacidade estatística considerando a influência do vento e outras variáveis ambientais, monitoramento e medições da temperatura dos condutores.

Os informes relacionados aos estudos civis abordaram temas inovadores como modelagem numérica do solo, rotas otimizadas com uso de inteligência computacional e geoprocessamento.

Sobre o tema desempenho, os principais informes abordaram questões como emprego de para-raios de ZnO através dos isoladores, fatores de correção atmosféricos para o dimensionamento do isolamento em ar, práticas inovadoras para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão.

Os 23 informes apresentados nas seções bienais do CIGRÉ enfatizaram os estudos integrados de otimização e confiabilidade de linhas de transmissão.

Foram apresentadas metodologias para a implantação de um sistema de gestão de risco de falhas de linhas de transmissão, considerando a gestão dos seus ativos, dos bancos de dados das ocorrências e dos dados ambientais. Este sistema forneceria subsídios importantes para a formulação dos procedimentos de manutenção visando ao aumento do desempenho das linhas de transmissão, atuando principalmente nas medidas preventivas.

Alguns informes apresentam a aplicação de modelos estatísticos, modelos econômicos e de ferramentas modernas da tecnologia da informação nos estudos de otimização integrada de linha de transmissão. Com relação à tecnologia da informação, são citados sistemas de informações geográficas e sistemas integrados de gestão. A aplicação destes sistemas permite a análise e simulação dos diversos parâmetros envolvidos na otimização integrada de uma linha de transmissão.

Outros trabalhos abordam os aspectos relativos à transmissão de energia a longas distâncias, principalmente no Brasil, China, Índia, Rússia e Estados Unidos. Este tipo de transmissão vem indicando a necessidade de estudos mais detalhados objetivando a redução de custos, mantendo a confiabilidade dentro dos critérios fixados.

Nos eventos internacionais promovidos pelo IEEE, foram selecionados 17 trabalhos. Os mais relevantes referem-se ao tema efeitos eletrostáticos

e eletromagnéticos, onde foram abordados itens como cálculo dos campos elétrico e magnético nos trabalhadores de manutenção em linha viva, cálculo dos campos para circuito duplo compacto de 500 kV, para 1000 kV AC, efeitos dos campos no meio ambiente e nos seres humanos.

Os trabalhos relacionados ao tema desempenho de linhas de transmissão apresentam os seguintes tópicos: levantamento de problemas de isolamento em linhas de Ultra Alta Tensão, estudos de descargas atmosféricas em linhas de 500 kV CC, em linhas de quatro circuitos de 500 kV numa mesma torre.

Para cada um dos assuntos anteriormente indicados, procurou-se identificar quais os itens que carecem de maior aprofundamento em termos de estudos e/ou pesquisas complementares, de forma que se possa obter um maior retorno em termos de aumento da confiabilidade das linhas de transmissão, aumento dos níveis de carregamento e redução dos custos de implantação e redução dos impactos ambientais.

Os assuntos identificados no tema estudos e projetos de linhas de transmissão foram os seguintes:

Estudos Integrados – Confiabilidade

Os itens mais promissores identificados foram:

- Estudos integrados para a otimização de estruturas e condutores de linhas compactas.
- Desenvolvimento de metodologia e ferramentas estatísticas para determinação da vida útil de linhas de transmissão e seus componentes, considerando fatores como efeitos atmosféricos, carregamento, poluição, vandalismo etc.
- Utilização de sistemas georreferenciados para a gestão, operação e otimização de linhas de transmissão.
- Desenvolvimento de bases de dados integrados relativos às diferentes etapas de implantação das linhas de transmissão (estudos, projetos, construção, operação, manutenção) com a aplicação de modernas ferramentas de gestão empresarial.
- Análises econômicas relacionadas aos custos decorrentes das estratégias de operação e manutenção e melhoria dos componentes de linhas de transmissão, e os custos de penalidades decorrentes do não atendimento das metas de confiabilidade e disponibilidade.
- Análise preditiva da probabilidade de risco de falha de linha de trans-



missão, a partir da coleta, tratamento e análise dos dados externos, internos e operacionais.

- Metodologias relacionadas à gestão de risco de falhas de linhas de transmissão objetivando o aumento dos indicadores de confiabilidade.
- Incorporação às bases de dados de desempenho de linhas de transmissão, aos diversos parâmetros das condições atmosféricas relativas às regiões de passagem.

REFERÊNCIAS (23):

T06-05							
S01-09	S01-03	S02-03	S03-03	S04-03	S01-01		
C01-06	C02-06	C03-06	C04-06	C05-06	C01-02	C02-02	C03-02
C04-02	C01-00	C02-00	C03-00	C04-00	C02-98		
E01-09	E01-08						

Cálculo de Parâmetros, Carregamento e Otimização de Condutores

Os itens mais promissores identificados foram:

- Obtenção, medição de parâmetros e desenvolvimento de modelos computacionais precisos e eficientes que representem as linhas de transmissão em estudos de sistema, tais como distorção harmônica, transitórios eletromagnéticos, fluxo de carga e estabilidade transitória e dinâmica.
- Desenvolvimento de metodologias e modelos computacionais para determinação da capacidade de transporte de linhas de transmissão considerando as restrições elétricas, mecânicas e ambientais, objetivando determinar com maior exatidão os carregamentos em tempo real, temporário e de curta duração.
- Variação estatística da temperatura do condutor considerando a variação do vento ao longo do dia e o seu efeito sobre os limites de carregamento.
- Simulação de dados meteorológicos ao longo da rota de linhas de transmissão considerando as diferentes estações climáticas e os diferentes períodos do dia, objetivando a realização da análise estatística da ampacidade sazonal das linhas de transmissão.
- Desenvolvimento de ferramenta integrada de monitoramento e análise de carregamento de linha de transmissão para utilização no despacho de carga em tempo real, considerando a previsão de carregamento e cálculo de fluxo de potência.

- Estabelecimento de modelo térmico para determinação de condições de carregamento de condutores, considerando a distribuição irregular de corrente e tensão mecânica aplicada aos condutores.

REFERÊNCIAS (17):

T01-08	T01-04	T01-03	T01-99					
A04-06	A02-05	A03-04	A04-04	A01-01				
S02-09	S03-09	S04-09	S01-07	S05-03	S06-03	S07-03	S04-01	

Efeitos Eletrostáticos e Eletromagnéticos

Os itens mais promissores identificados foram:

- Identificação e medição de correntes contínuas de baixa intensidade em pés de torres de linhas de transmissão, devido à presença de dutos enterrados contendo proteção catódica.
- Análise de acoplamentos indutivos e resistivos entre uma linha de transmissão nos cruzamentos e/ou aproximação com dutos.
- Medições e estabelecimento de modelo tridimensional para cálculo referente aos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão.
- Mapeamento de campos elétricos e magnéticos por meio de ferramentas computacionais considerando modelagem de alta precisão e sua comparação com medições no campo.
- Influência da configuração dos feixes dos subcondutores das linhas de transmissão sobre os valores dos campos elétricos e magnéticos.
- Redução do impacto ambiental e efeitos sobre a saúde, decorrentes dos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão, considerando principalmente os aspectos de percepção do público relacionado a possíveis riscos para saúde.

REFERÊNCIAS (25):

T02-08	T02-07	T01-06	T01-05	T02-05	T02-03			
A02-06	A03-06	A01-05	A01-02					
S05-09	S02-07	S08-03						
C01-04	C02-04	C01-98						
I01-03								
E01-09	E03-09	E04-09	E02-08	E03-08	E04-08	E05-08	E02-07	



Desempenho de Linhas de Transmissão

Os itens mais promissores identificados foram:

- Medição da impedância de aterramento de estruturas de linhas de transmissão, objetivando uma maior exatidão de sua representação nos estudos de desempenho contra descargas atmosféricas.
- Modelagem de aterramentos de estruturas de linhas de transmissão, considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência para estudos de desempenho contra descargas atmosféricas.
- Integração dos modelos matemáticos representativos dos diferentes fenômenos envolvidos na análise de desempenho de linhas de transmissão.
- Estudos para a especificação e dimensionamento de cabos para-raios OPGW.
- Análise da instalação de cabos adicionais, abaixo dos cabos energizados e cabos estais conectados a cabos contrapesos, objetivando a melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- Análise da utilização de para-raios de ZnO em paralelo com as cadeias de isoladores para melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- Avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas utilizando redes neurais.
- Metodologia de cálculo para a determinação de fatores de correção atmosférica aplicados ao dimensionamento de isolamentos em ar.

REFERÊNCIAS (35):

T03-08	T02-06	T03-06	T03-05	T04-05	T05-05	T02-04	T03-03
T01-02	T01-01						
A03-07	A05-06	A03-05	A04-05	A01-04	A02-04	A01-03	A02-03
A03-03	A02-02						
S06-09	S03-07	S04-07	S01-05	S09-03			
C06-06	C07-06	C03-04					
I01-03							
E05-09	E06-09	E06-08	E07-08	E08-08	E01-07		

Estudos Mecânicos

Os itens mais promissores identificados foram:

- Desenvolvimento de sistemas de aquisição, transmissão, tratamento e gestão dos dados de vento coletados para posterior realização de testes de consistência, análises estatísticas e simulações a partir da modelagem da velocidade dos ventos para projeto das estruturas das linhas de transmissão.
- Análise dinâmica de estruturas para avaliação das forças geradas nos eventos de ruptura de cabos ou quedas de torres.

REFERÊNCIAS (5):

A01-07	A02-07	A01-06
S02-05		
C01-08		

Estudos Cíveis e Fundações

Os itens mais promissores identificados foram:

- Desenvolvimento de metodologia para análise dos processos erosivos em solos.
- Desenvolvimento de ferramentas para identificação do potencial de eclosão e nível de evolução de erosões para uso pelas equipes de manutenção.
- Dimensionamento de acordo com as causas dos processos erosivos e soluções de baixo custo para a estabilidade das torres.
- Análise técnica e econômica de alternativas para fundação de torres de linhas de transmissão.
- Novos métodos de proteção catódica contra corrosão de fundações de torres de transmissão.
- Desenvolvimento de métodos mais avançados para especificação de fundação de torres para transmissão de energia à longa distância, considerando a tendência dos estudos não lineares e projetos com conceito integrado dinâmico-mecânico.
- Aplicação da tecnologia de *laser scanning* para levantamento do perfil do terreno para plotagem de torres e para mapeamento das torres existentes, considerando a localização, as alturas das torres e condutores



e tipos de vegetação no corredor da linha, objetivando fornecer subsídios para projetos de recapacitação e manutenção.

- Utilização de ferramentas de geoprocessamento para fornecer subsídios complementares aos recursos usualmente empregados para obtenção de dados topográficos necessários à construção de linhas de transmissão.

REFERÊNCIAS (18):

T04-08	T01-07	T03-04	T04-04	T02-99	T03-99
A05-05	A06-05	A03-02			
S07-09	S08-09	S09-09	S10-03	S02-01	S03-01
C02-08	C03-08				
E01-06					

Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL www.aneel.gov.br.

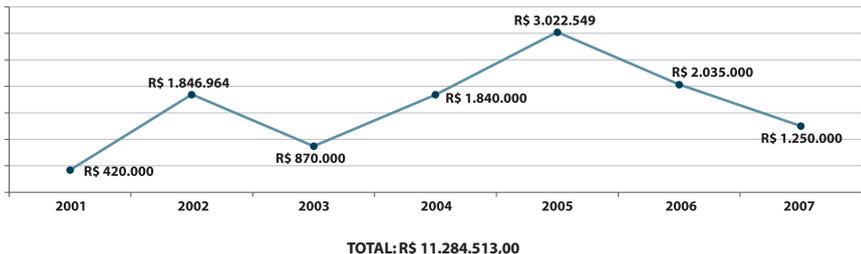
O valor total aplicado nos anos de 2001 a 2007 foi de R\$ 11.284.513,00, o que corresponde a 19,29% do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão em geral.

O ano de 2005 foi o de maior aplicação com R\$ 3.022.549,00. O assunto de maior aplicação foi desempenho de linhas de transmissão com o valor total de R\$ 4.539.000,00.

O gráfico abaixo apresenta os investimentos por ano.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – ESTUDOS E PROJETOS

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema analisado, foram selecionados 123 informes técnicos. A fonte SNPTEE forneceu o maior número com 29 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2003 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de 17.

Fonte	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	98/99	Total por fonte
CAPES	–	4	2	3	6	4	3	1	1	–	3	27
ANEEL	–	–	3	5	6	4	3	3	1	–	–	25
SNPTEE	9	–	4	–	2	–	10	–	4	–	–	29
CIGRÉ	–	3	–	7	–	3	–	4	–	4	2	23
INPI	–	–	–	–	–	1	1	–	–	–	–	2
IEEE	6	8	2	1	–	–	–	–	–	–	–	17
Total por ano	15	15	11	16	14	12	17	8	6	4	5	
TOTAL DE INFORMES: 123												

Referências

CAPES – Teses de Universidades (27)

2008 (4)

T01-08 – FURTADO, R. G. C. *Métodos estatísticos aplicados ao cálculo da ampacidade e risco térmico de linhas aéreas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais: 2008.

T02-08 – BECKER, W. D. *Estudos de técnicas para a redução de campos magnéticos gerados por linhas de transmissão de potência*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina: 2008.

T03-08 – GONZALEZ, L. P. *Análise eletromagnética de cabos OPGW utilizando métodos numéricos e analíticos*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Pará: 2008.

T04-08 – QUENTAL, C. Q. *Comportamento geomecânico do solo na base de fundação de três torres da linha de transmissão Recife 2 / Joairam*.



Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife: 2008.

2007 (2)

T01-07 – AZEVEDO, C. P. B. *Avaliação de confiabilidade de fundações de torres estaiadas em linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2007.

T02-07 – NETO, M. T. M. *Rearranjo otimizado dos feixes de condutores de linhas de transmissão com o foco centrado na minimização de impactos eletromagnéticos*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife: 2007.

2006 (3)

T01-06 – LEÃO, R. M. *Radio interferência proveniente de linhas de alta tensão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul: 2006.

T02-06 – PINTO, R. L. F. *Análise de métodos convencionais na avaliação do desempenho de cabos OPGW em linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2006.

T03-06 – NOGUEIRA, R. L. S. *Análise de sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas: otimização e critérios de segurança em aterramento de estruturas de linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2006.

2005 (6)

T01-05 – GUIMARAES, G. E. *Medições e cálculos de campos elétrico e magnético de uma linha de transmissão de 500 kV*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2005.

T02-05 – FILHO, M. L. P. *Simulação tridimensional do campo eletromagnético de linhas de transmissão de alta tensão*. Tese (Doutorado – Tratamento da Informação) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo: 2005.

T03-05 – REIS, R. J. *Mapeando a climatologia das descargas atmosféricas de Minas Gerais utilizando dados de 1989 a 2002. Uma análise exploratória*. Tese (Doutorado em Tratamento da Informação) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais: 2005.

T04-05 – SHIGIHARA, M. *Avaliação de correntes de descargas atmosféricas de medições diretas em estruturas altas*. Tese (Mestrado em Interunidades de Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo: 2005.

T05-05 – FARIAS, W. R. *Descargas atmosféricas e falhas no sistema de transmissão da CHESF em episódios de El Nino e La Nina. Uma aplicação da análise de componentes principais*. Tese (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba: 2005.

T06-05 – MOURA, W. M. *Um sistema de apoio ao projeto de linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Goiás, Goiás: 2005.

2004 (4)

T01-04 – FERNANDES, M. A. *Implantação, estudos e avaliação paramétrica de linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, São Paulo: 2004.

T02-04 – CAVALCANTI, F. J. M. M. *Controle e análise de desempenho de isolamento de linhas de transmissão em ambiente com poluição visando ações preventivas*. Tese (Profissionalizante em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife: 2004.

T03-04 – CHAVES, R. A. *Fundações de torres de linhas de transmissão e de telecomunicação*. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2004.

T04-04 – ALBERTI, E. L. *Desenvolvimento de técnicas de diagnóstico da corrosão em pés de torres de linhas de transmissão, por meio de aplicação de técnicas eletroquímicas*. Tese (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Paraná: 2004.

2003 (3)

T01-03 – KUROKAWA, S. *Parâmetros longitudinais e transversais de linhas de transmissão calculados a partir das correntes e tensões de fase*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo: 2003.

T02-03 – SOUZA, E. N. *Correntes elétricas induzidas no corpo humano com braços elevados em ângulos diferentes por campo elétrico*. Tese (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro: 2003.

T03-03 – ARRUDA, C. K. C. *Modelagem de linhas de transmissão para análise de comportamento quanto a descargas atmosféricas*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2003.



2002 (1)

T01-02 – NOGUEIRA, P. J. C. *Influência de estratificação do solo na impedância impulsiva de aterramento de linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais: 2002.

2001 (1)

T01-01 – JÚNIOR, A. S. *Modelagem de linhas de transmissão para avaliação de desempenho frente a descargas atmosféricas*. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2001.

1999 (3)

T01-99 – ALMEIDA, M. C. *Arquitetura de sistemas multi-agentes para projetos de linhas de transmissão de energia elétrica*. Tese (Mestrado em Sistemas de Computação) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro: 1999.

T02-99 – WOJCIKCI, F. R. *A influência das correntes de fuga AC advindas dos cabos pára-raios na corrosão das fundações metálicas de linhas de transmissão AC tipo grelha dimensionada*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais: 1999.

T03-99 – SANTOS, A. P. R. *Capacidade de carga de fundações submetidas a esforços de tração em taludes*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 1999.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (25)

2007 (3)

A01-07 – FRANÇA, G. B. *Simulação numérica do campo de vento ao longo das linhas de transmissão 230 kV da PPTE*. CENTRAIS EXPANSION TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA S.A., FUNDAÇÃO BIO-RIO – FBR: 2007.

A02-07 – HENRIQUES, H. O. *Concepções otimizadas de linhas de transmissão em 69 kV e 138 kV*. EMPRESA ENERGÉTICA DE SERGIPE S.A. – ENERGEIPE, FUNDAÇÃO EUCLIDES DA CUNHA – FEC, ELEPOT ESTUDOS E PESQUISAS LTDA. – EEP: 2007.

A03-07 – PAULINO, J. O. S. *Desenvolvimento de um sistema para medição da impedância de aterramento de estruturas de linhas de transmissão utilizando ondas impulsivas*. CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. – CEMIG-D, UFMG – UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG: 2007.

2006 (5)

A01-06 – KURKA, P. R. G. *Utilização de cálculos dinâmicos para otimização de projetos de torres de linhas de transmissão*. COMPANHIA DE TRANSMISSÃO ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, CEMEF ENGENHARIA – CEMEF: 2006.

A02-06 – BASTOS, J. P. A. *Estudo de linhas de transmissão e subestações objetivando a otimização de projetos com relação aos campos elétrico e magnético*. CENTRAIS ELÉTRICAS SANTA CATARINA S.A. – CELESC, FUNDAÇÃO DE ENSINO DE ENGENHARIA EM SANTA CATARINA – FEESC: 2006.

A03-06 – TAVARES, G. M. *Programa digital para cálculos de interferências em cruzamentos ou aproximações de linhas de transmissão com dutos que transportam inflamáveis – incluindo medições de campo para comprovação de resultados*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – FURNAS, FUNDAÇÃO EUCLIDES DA CUNHA – FEC: 2006.

A04-06 – FILHO, J. P. *Metodologia para obtenção dos parâmetros de linhas de transmissão através da medição precisa da energia entre seus terminais*. COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO – CHESF, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – CAMPUS DE I – UNESP, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP: 2006.

A05-06 – SCHROEDER, M. A. O. *Desenvolvimento de modelagem de aterramentos elétricos considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência para determinação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas*. CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A. – CEMIG – D, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET/MG: 2006.

2005 (6)

A01-05 – SILVA, J. M. *Identificação de correntes de interferência em torres de linhas de transmissão devido à presença de gasodutos e apresentação de soluções nas proximidades dessas torres com dutos enterrados contendo proteção catódica*. COPEL TRANSMISSÃO S.A. – COPEL – TRANS, INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2005.

A02-05 – BEZERRA, U. H. *Desenvolvimento de ferramentas para o planejamento ótimo de modo maximizar a capacidade de transporte de linhas de transmissão considerando restrições elétricas, mecânicas e ambientais*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA, CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES – CPQD: 2005.



A03-05 – AREDES, M. *Sistema de avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas utilizando redes neurais*. LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S.A. – LIGHT, FUNDAÇÃO COPPETEC – COPPETEC, ELEPOT ESTUDOS E PESQUISAS LTDA. – EEP, INSTITUTO BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO – IBRATE: 2005.

A04-05 – ABREU, J. P. G. *Desenvolvimento de novos critérios para análise de desempenho de linhas de transmissão baseado nas perdas de carga e afundamento de tensão*. COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI: 2005.

A05-05 – JUNIOR, J. L. C. S. *Estudos e desenvolvimento de obras de contenção de baixo custo para combate à erosão do solo da base de torres de linhas de transmissão localizadas próximas a cursos de água*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, SOCIEDADE EDUCACIONAL IDEAL LTDA – FACI: 2005.

A06-05 – KORMANN, A. M. *Estudos geotécnicos visando inovações em projeto, execução e verificação de desempenho de fundações de linhas de transmissão*. COPEL S.A., INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2005.

2004 (4)

A01-04 – FILHO, S. V. *Concepção e desenvolvimento de um sistema dedicado para detecção e localização de descargas atmosférica ao longo de linhas de transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA – CT – DEM – GVA: 2004.

A02-04 – VASCONCELOS, J. A. *Metodologia para posicionamento ótimo de pára-raios em linhas de transmissão e distribuição*. EMPRESA ENERGÉTICA DE SERGIPE S.A. – ENERGIPE, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – ESCOL – UFMG/EE: 2004.

A03-04 – PEREIRA, J. L. R. *Desenvolvimento de nova metodologia para determinação de carregamentos temporários e de curta duração de linhas de transmissão*. COMPANHIA ENÉRGETICA DE MINAS GERAIS – CEMIG, UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA – UFJF: 2004.

A04-04 – JÚNIOR, O. H. S. *Sistema para cálculo de ampacidade em tempo real de linhas de transmissão*. COPEL TRANSMISSÃO S.A. – COPEL-TRANS, INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC, INSTITUTO TECNOLÓGICO SIMEPAR – SIMEPAR: 2004.

2003 (3)

A01-03 – ZANETTA, L. C. *Software para automação de projetos para proteção de linhas de transmissão aérea - tensão 69 e 138 kV*. COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ – CPFL – PAULISTA, FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – FUSP, COOPERATIVA DE TRABALHO DE ENGENHEIROS ARQU – COOESA: 2003.

A02-03 - *Tecnologias dedicadas para redução de desligamentos de linhas por descargas atmosféricas*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, FUNDAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO E PESQUISA – IN: 2003.

A03-03 - *Desenvolvimento de novos procedimentos para especificação e dimensionamento de cabos pára-raios OPGW*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., FUNDAÇÃO EUCLIDES DA CUNHA, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE: 2003.

2002 (3)

A01-02 – NETO, A. A. M. *Desenvolvimento de modelos eletro geométricos para as linhas de transmissão*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – FURNAS, CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL: 2002.

A02-02 – BARBOSA, C. R. N. *Avaliação do desempenho de linhas de transmissão*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL: 2002.

A03-02 – *Estudo de técnicas de avaliação de corrosão e novos sistemas anticorrosivos em fundações metálicas de torres de linhas de transmissão*. CEPEL: 2002.

2001 (1)

A01-01 – NEVES, W. L. A. *Representação precisa de linhas de transmissão assimétricas*. COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO – CHESF, UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG/ATECEL: 2001.

SNPTEE (29)

2009 (9)

S01-09 – SANTOS, K. R.; NOLASCO, J. F.; SOARES, F. G.; MARTIN, R.; VIEIRA, R. C. *Solução inédita para a LT 230 kV Vilhena – Jauru de circuito duplo. Aspectos elétricos, mecânicos e econômicos*. XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.



S02-09 – ROSSI, J. A. D.; CASTILHO, R. M.; CHARONE, W.; BEZERRA, U. H.; SOARES, R. P.; SOUZA, A. M. *Medição do carregamento de linha de transmissão em tempo real, cálculo da ampacidade e previsão de carregamento.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S03-09 – SALAS, F. M. A.; DOMINGUES, L. A. M. C.; MOREIRA, F. S.; FILHO, J. I. S. *Comportamento térmico em cabos de linhas de transmissão – Medições experimentais.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S04-09 – MANNALA, M. J.; HOFFMANN, J. N. *Medições de parâmetros elétricos em condutores de linhas de transmissão sob condições de tracionamento e temperatura nominais de operação.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S05-09 – CAMARGO, J. M.; MENDES, L. M. R.; BELARDO, C. A. *Estudo técnico e econômico das linhas de transmissão: Pirituba Bandeirante 1-2 e 3-4 para operar com um campo magnético de $1 \mu T$.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S06-09 – NIGRI, A. I.; ABDO, R. F.; CORREA, R. P. *Pára raios de ZnO em linhas de transmissão de 138 kV. Definição dos locais, metodologia de instalação e acompanhamento do desempenho.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S07-09 – GUIMARÃES, G. V. W.; RUFFER, A. P.; DANZIGER, F. A. B. *Análise de fundação de poste para linha de transmissão através de prova de carga instrumentada.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S08-09 – RAMOS, C. *Utilização de modelagem numérica de terreno para quantitativos em projetos de linhas de transmissão.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

S09-09 – NASCIMENTO, C. A. M.; SOUZA, A. R.; ALTOE, R. T.; TEÓFILO, D. R.; BELÉM, F. L.; PIMENTA, L. C. A.; BOSQUE, M. M.; MESQUITA, R. C. *Planejamento de rotas otimizadas para linhas aéreas de energia com uso de inteligência computacional e geoprocessamento.* XX SNPTEE 2009. Recife/PE: 2009.

2007 (4)

S01-07 – COSENTINO, A.; KOSMANN, C.; COLLE, S.; HAAS, R. *Análise estatística da ampacidade sazonal da LT 525 kV Areia – Campos Novos utilizando técnicas de downscaling de dados meteorológicos, com apoio em mapeamento a laser.* XIX SNPTEE 2007. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

S02-07 – SABINO, F. R.; PESSOA, L. V. G.; NETO, A. P.; MORAIS, H. M. *Sobre os campos elétricos e magnéticos no entorno das linhas de transmissão. Análise crítica de projeto.* XIX SNPTEE 2007. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

S03-07 – MIRANDA, D. C.; CUNHA, L. V.; VISACRO, S.; DIAS, R. N.; MESQUITA, C. R. *Resultados da aplicação de metodologia inovadora para melhoria de desempenho da LT Guilman Amorim – Ipatinga 1, 230 kV, frente a descargas atmosféricas.* XIX SNPTEE 2007. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

S04-07 – NETO, A. M.; FILHO, J. I. S.; BARBOSA, C. R. N.; DOMINGUES, L. A. M. C.; ANDRADE, V. H. G.; JÚNIOR, H. P. A. *Desenvolvimento e aplicação de metodologias para análise do desempenho de linhas de transmissão*. XIX SNPTEE 2007. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

2005 (2)

S01-05 – VISACRO, S.; ANTUNES, E. P.; GUEDES, V. T.; SPALENZA, A. *Práticas não convencionais para melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas*. XVIII SNPTEE 2005. Curitiba/PR: 2005.

S02-05 – ARAÚJO, M. R. P.; MENEZES, A. A.; MEDEIROS, M. B.; LIU SU, E.; CARVALHO, R. Z. *Modelo matemático do perfil vertical do vento através de sistema integrado de coleta e de tratamento de dados*. XVIII SNPTEE 2005. Curitiba/PR: 2005.

2003 (10)

S01-03 – PINTO, A.; SILVA, J. B. G. F.; AMARO, R. C. P.; PERONA, R. M.; OLIVEIRA, C. M. F.; VIANA, J. M. V.; ESMERALDO, P. C. V.; RICCO, V. H. C. *LT 500 kV Cachoeira Paulista – Adrianópolis. Uma elevada capacidade de transmissão em um corredor congestionado. Aspectos mecânicos*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S02-03 – NOLASCO, J. F.; JÚNIOR, C. M.; SALIBA, A.; MACHADO, V. G.; GUIMARÃES, R. P. G.; NOVAES, E. O.; VILLAS, J. E. T.; FERNANDES, J. H. M. *LT 500 kV Tucuruí – Vila do Conde II. Soluções inovadoras de projeto e aplicações da IEC 60826*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S03-03 – FERNANDES, J. H. M.; MACHADO, V. G.; FONSECA, C. S. *Análise das alternativas de transmissão em 765 kV para o sistema de transmissão associado à UHE de Belo Monte*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S04-03- NOGUEIRA, M. M.; HADDAD, R. S.; SILVA, M. A. O. *Implantação de linhas de transmissão sob o novo modelo do setor eletroenergético. A experiência da Expansion*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S05-03 – MACEDO, A. B. R.; CADILHE, A.; MENEZES, A. A. *Reavaliação da capacidade de transporte de linhas de transmissão aéreas com base em modelos climáticos regionais*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S06-03 – FILHO, J. I. S.; RUFFIER, A. P.; LISBOA, E. F. A.; ESTRELLA, L. F. *Influência da variação das flechas dos condutores de vãos contínuos na avaliação da ampacidade estatística e no monitoramento de LTs*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.



S07-03 – NASCIMENTO, C. A. M.; BRITO, J. M. C.; SANTOS, C. O.; FILHO, O. C. *Validação do método de cálculo da ampacidade na Cemig*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S08-03 – DOMINGUES, L. A. M. C.; NETO, A. M.; BARBOSA, C. R. N.; ANDRADE, V. H. G.; DART, F. C.; SONDERMANN, M. A. M. V.; FILHO, J. A.; ESMERALDO, P. C. V. *Mapeamento de campos eletromagnéticos em linhas do sistema de transmissão de Furnas (138 – 765 kV)*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S09-03 – AZEVEDO, R. M.; FILHO, J. I. S.; ANDRADE, V. H. G.; COUTINHO, C. E. *O Fatores de correção atmosféricos aplicados ao dimensionamento de isolamento em ar. Nova metodologia de cálculo*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S10-03 – SILVA, R. L. *Aferição dos coeficientes da qualidade de execução da equação geral de estabilidade da metodologia IEC – 826 para fundações tracionadas*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

2001 (4)

S01-01 – SILVA, A. O.; SANTIAGO, N. H. C.; VIANA, J. M. V.; OLIVEIRA, C. M. F.; RICCO, V. H. G.; SANTOS, G. *Estudo de linhas de transmissão compacta 138 kV São José - Magé*. XVI SNPTEE 2001. Campinas/SP: 2001.

S02-01 – SILVA, J. M.; TERSARIOL, L. H. *Proteção catódica de grelhas utilizando a corrente de fuga da linha*. XVI SNPTEE 2001. CAMPINAS/SP: 2001.

S03-01 – FLÓRES, C. A. S.; MARCOLINO, F. G. L.; DUARTE, R. D. A.; GOMES, J. I. *Estacas metálicas helicoidais como elemento de fundação para torres de linhas de transmissão*. XVI SNPTEE 2001. Campinas/SP: 2001.

S04-01 – FILHO, J. I. S.; ANDRADE, V. H. G.; BORGES, J. B. S.; COUTINHO, C. E. *O Considerações sobre o vento no projeto e recapacitação de linhas de transmissão*. XVI SNPTEE 2001. Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (23)

2008 (3)

C01-08 – FERNANDES, J. H. F.; GUIMARÃES, R. P.; NOLASCO, J. F.; SILVA, P. R. R. I. *Eletronorte and the challenge of long distance transmission in Brazil*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C02-08 – CLARK, M.; CLUTTERBUCK, D.; LEHANE, B. M.; RICHARDS, D. J.; ROTHWELL, N.; SPICER, K.; STALEY, M. *Quantifying the strength of 40 year old lattice towers and pyramid foundations*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C03-08 – XIAN-LONG, L.; YONG-FENG, C. *Review and new development on transmission lines towers foundations in China*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2006 (7)

C01-06 – HAQUE, J.; CHANDRA, U.; AGRAWAL, S. K.; KUMAR, P.; VYAS, H. *Use of statistical tools for assessment of residual life of transmission lines viz-aviz steps taken to augment the reliability of transmission network of powergrid (India)*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C02-06 - BRENNAN, G. F. *Economic optimization for transmission line asset renewal*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C03-06 – FILHO, J. I.; DOMINGUES, L. A. M. C.; RUFFIER, A. P.; MENEZES, A. A. *Assessment of environmental statistics as an accessible breakthrough to improve OHTLS design*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C04-06 – TIGAS, K.; AGORIS, D.; KILIAS, V.; STRATIS, P.; PSALLIDAS, M.; ALEXANDRIDIS, A.; PYRGIOTI, E.; CHAVIAROPOULOS, P.; NERIS, A.; VITELLAS, I. *Overhead lines management and planning optimization using geographical information systems*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C05-06 – UEMURA, T.; OIKI, T.; OKA, M.; NISHIOKA, Y. *Kyushu electric's ERP system development and operation for overhead lines system*. CIGRÉ, 2006, França: 2006.

C06-06 – GUTMAN, I.; HALSAN, K.; WALLIN, L.; SOLOMONIK, E.; VOSLOO, W. L.; LUNDQUIST, J. *Line performance estimator software; Calculations of lightning, pollution and ice failure rates compared with service records*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C07-06 – TARAZONA, J.; FERRO, C.; URDANETA, A. J. *Cartographic representation of venezuelan keraunic activity*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

2004 (3)

C01-04 – ARABANI, M. P.; PORKAR, B.; PORKAR, S. *The influence of conductor sag on spatial distribution of transmission line magnetic field*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C02-04 – KRYLOV, S. V.; TIMASHOVA, L. V. *Methods for limiting radio interference from EHV OHL insulator sets*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C03-04 – GILLESPIE, J. A. T.; STAPLETON, G. *Improving double circuit transmission line reliability though lightning design*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.



2002 (4)

C01-02 – CORREIA, D. M.; BRASIL, D. O. C.; LIMA, D. C. *A proposal for the evaluation of transmission line performance in a competitive market*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C02-02 – NOLASCO, J. F.; SILVA, J. B. G. F. *Assessment and improvement of availability of overhead lines and components*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C03-02 – BÜCKNER, W. F. *The electricity supply industry and its impact on transmission line technology – Economic aspects*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C04-02 – HEIDARI, G. O.; HEIDARI, M. *Effect of land price on transmission line design*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

2000 (4)

C01-00 – CLERIC, R.; GAUNTTLETT, I.; HUSSEELS, D.; LINDSEY, K.E.; OEBRO, H.; PIROVANO, G.; REFSNAES, S.; ROGIER, J.; TARCZY, P.; WIJK, G. P. *Management of existing overhead transmission lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C02-00 – POHLMAN, J. C.; LINDSEY, K. E.; AGRAWAL, L. N.; KAPUR, A. K. *Practical steps for increasing availability of existing overhead transmission lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C03-00 – LETCHFORD, C. W.; HAWES, H. *Risk assessment to improve reliability of transmission facilities exposed to sub-tropical high wind storm events*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C04-00 – ROSS A. A. H. J.; RHEBERGEN, B.; OOSTERHOUT, J. P. M.; JONG, C. G. N. *Probabilistic based condition assessment of overhead transmission lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

1998 (2)

C01-98 – AWAD, M. M.; SWIDAN, M.; SAID, H. M.; MOUSTAFA, F. A.; RADWAN, R. M. *The Egyptian experience for electric and magnetic fields and radio noise with compact and traditional towers*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C02-98 – BÖHME, H.; PASCHEN.; BERTAZZI, A.; DI MARCO, G. G.; ELLI, E.; CATENACCI. *Overhead transmission lines: Design aimed to reduce the permitting time*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

INPI (2)

2004 (1)

I01-04 – SILVA, F. J. O. *Captador de descarga elétrica atmosférica*. BR2004MU02429U20041006. Publicação 16 de maio de 2006.

2003 (1)

I01-03 – MAIOLLI, P.; BORGHI, E.; DONAZZI, F.; BELL, S. *Linha de transmissão de energia elétrica e método de blindar o campo magnético gerado*. PRYSMIAN CAVI E SISTEMI ENERGIA S.R.L. PI 0318424-2 A Publicação 01 de agosto de 2006.

IEEE (17)

2009 (6)

E01-09 – ADAMI, J. F.; SILVEIRA, P. M.; MARTINEZ, M. L. B.; PEREZ, R. C.; DALLBELLO, A. C. *New approach to improve high voltage transmission line reliability*. IEEE Transaction on Power Delivery, 2009.

E02-09 – EL DEIN, A. Z., *Magnetic-Field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases*. IEEE Transaction on Power Delivery, 2009.

E03-09 – HUANG, D.; RUAN, J.; HUO, F. *Study on the electromagnetic environment of 1000 kV Double-circuit transmission lines in China*. IEEE, 2009.

E04-09 – FUJIANG, M.; JIANG, J.; HUANG, Y.; WANG, T. *Study the induced voltage caused by lightning flash to overhead power lines tower*. IEEE, 2009.

E05-09 – WEI, B.; ZHENGCAI, F.; YUAN, H. *Analysis of lightning shielding failure for 500-kV overhead transmission lines based on an improved leader progression model*. IEEE Transaction on Power Delivery, 2009.

E06-09 – HENGXIN, H.; JUNJIA, H.; ZHANG, D.; DING, L.; JIANG, Z.; WANG, C.; HUIHENG, Y. *Experimental study on lightning shielding performance of 500 kV HVDC transmission lines*. IEEE, 2009.

2008 (8)

E01-08 – APARICIO, L. E.; THOMAS, J. A. *Stochastic reliability study of the western 765, 400 and 230 kV transmission lines maintained by EDEL-CA*. IEEE, 2008.

E02-08 – SHIZUO, L.; HUAJUN, L. *Electric field calculation of double circuit compact overhead transmission line on same 550kV towers*. IEE, International conference on high voltage engineering and application, 2008.



E03-08 – BELHADJ, C. A.; DAWOUD, M. M.; MAALEJ, N.; HABIBAL-LAH, I. O.; ABDEL-GALIL, T. K. *Electric & Magnetic field assessment for live line workers next to a 132kV transmission line conductor*. IEEE, 2008.

E04-08 – SING, B. K.; SHARMA, R. S.; AJUMEERA, R.; MATHUR, A. K. *Electromagnetic fields in environment and its health hazards*. IEEE, International conference on microwave, 2008.

E05-08 – ISMAIL, H. M. *Effect of tower displacement of parallel transmission lines on the magnetic field distribution*. IEEE, Transaction on Power Delivery, 2008.

E06-08 – JIANG, W.; WU, G. N.; WANG, S. X.; HUANG, Z. *The survey of insulation problems of UHV transmission system*. IEEE, 2008.

E07-08 – BUILES, G.; EASTMAN, C. O.; VILLA, J. F. *Salt contamination impact on transmission line insulation performance and corrosion. Some possible handling measures*. IEEE, 2008.

E08-08 – LODWIG, S. G. *Mitigating lightning outages on 138 kV transmission lines*. IEEE, 2008.

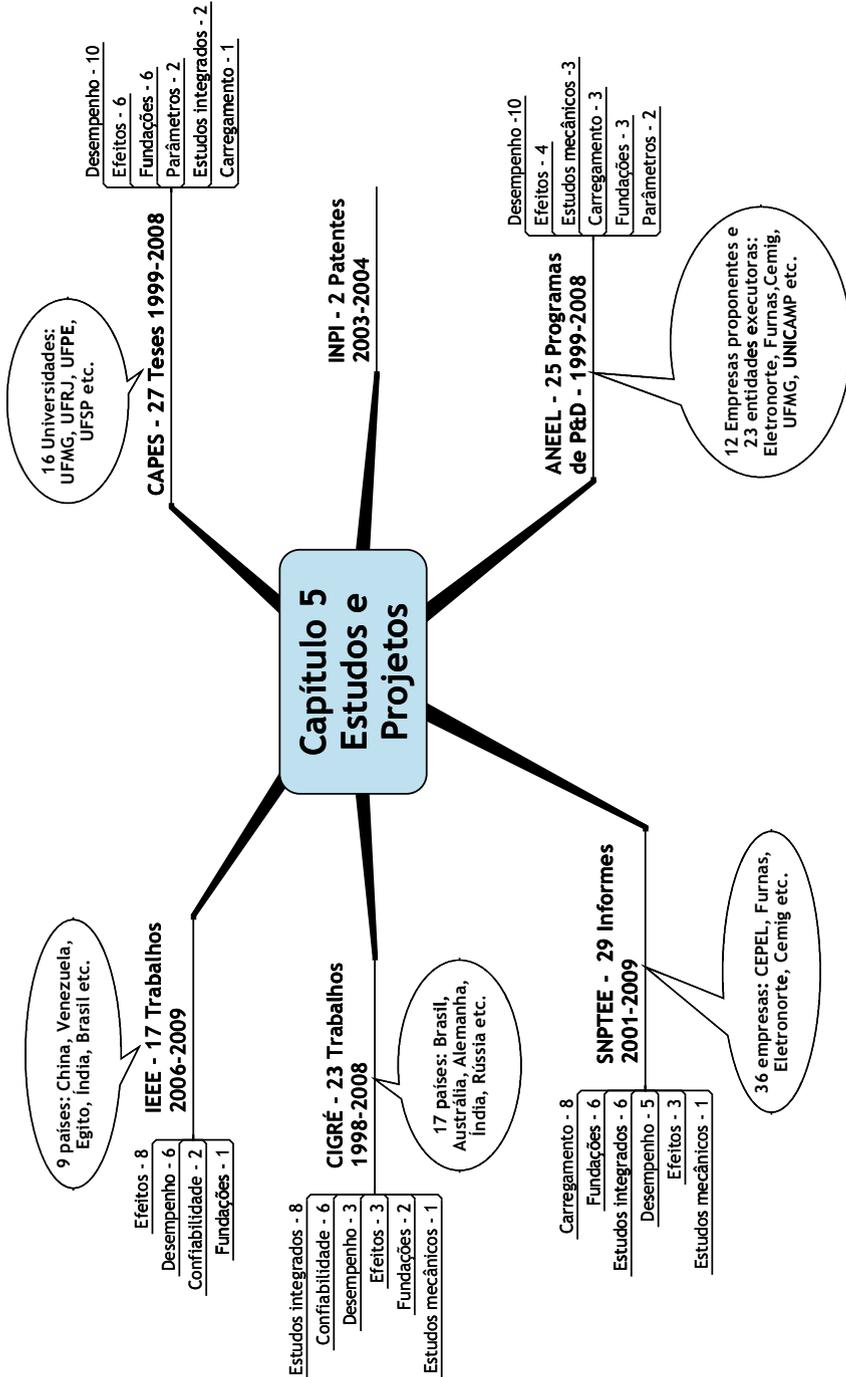
2007 (2)

E01-07 – CHAI, Y.; ZHOU, W.; XUE, L.; LIU, X.; SU, H. *Lightning performances for AC 500kV transmission lines with quadruple-circuit on single tower*. IEEE, International conference workshop, 2007.

E02-07 – EL-MAKKAWY, S. M. *Numerical determination of electric field induced currents on human body standing under a high voltage transmission line*. IEEE, Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, 2007.

2006 (1)

E01-06 – VIERA, F. R.; TOLEDO, H. J. *Optimal location of power transmission lines towers using reformulated dynamic programming*. IEEE, 2006.





CAPÍTULO 6

Recapacitação de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin



PREFÁCIO

João Felix Nolasco

A recapitação de linhas de transmissão vem assumindo, a cada ano, maior importância, tendo em vista a extrema dificuldade de se conseguirem novas faixas de servidão para linhas aéreas de transmissão. A recapitação de linhas existentes tornou-se a ferramenta principal que permite a expansão dos sistemas de transmissão aérea na atualidade.

Diante disso, o desenvolvimento de novas técnicas para recapitação de linhas aéreas tornou-se o campo mais investigado pelos especialistas. Deve-se ressaltar, também, a crescente demanda da sociedade atual em torno da melhoria de qualidade dos sistemas de fornecimento de energia elétrica, entre os quais as linhas representam um papel preponderante. Daí surgiu celeremente o conceito e a execução dos serviços de melhoria de confiabilidade das linhas aéreas (*Upgrading*), ao lado do aumento da capacidade (*Up-rating*), e mesmo a restauração de linhas antigas à sua capacidade original (*Refurbishment*) e da Extensão de vida (*Life extension*).

Duas razões principais levam a esse crescente interesse pela utilização de eixos de transmissão já existentes em lugar da construção de novas linhas: o aumento de capacidade exigido dos eixos de transporte de energia elétrica, função do acréscimo contínuo do consumo e, simultaneamente, as dificuldades crescentes para se conseguirem novas faixas para as linhas de transmissão. Daí o contínuo desenvolvimento de novas técnicas que viabilizem recapitações cada vez mais intensas e a menores custos.

Cumprе mencionar que outro aspecto de importância vital, em especial para países que possuem menor poder econômico, é a redução dos custos das reformas ou melhorias nas linhas.



Três conceitos principais aplicam-se aos processos mencionados, sendo objeto de estudos e investigações, buscando-se novas soluções técnicas de recapacitação e melhoria de confiabilidade, proporcionadas por estudos de P&D e de otimização, de forma a se obterem maiores relações de custo/benefício, ou seja:

- *Uprating*:⁽¹⁾ aumento da capacidade ou potência de uma linha de transmissão.
- *Upgrading*:⁽¹⁾ aumento da confiabilidade estrutural de uma linha de transmissão.
- Extensão de vida: renovação intensa ou reparo de um item, sem restaurar a vida original da linha.

A seguir, indicamos os principais métodos empregados mundialmente para *Uprating* e *Upgrading* de linhas, que são os processos decisórios envolvidos, como se combinam as várias ações e, finalmente, como os resultados são medidos e comparados por meio de indicadores.

MÉTODOS PARA RECAPACITAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (*UPRATING*)

Uprating (Recapacitação) de uma linha de transmissão significa, de maneira geral, o acréscimo de sua capacidade, seja pelo aumento da tensão V , da corrente I ou de ambos os parâmetros, conforme a fórmula da potência.

Indicam-se a seguir os principais processos de *Uprating* existentes, conforme alternativas diversas estudadas e prática das empresas. Ressalte-se que, em prática, todos esses processos são adotados constantemente, sendo objeto de contínuas avaliações e análises, no sentido de aprimorá-los técnica e economicamente.

- Recapacitações de corrente, que abrangem: aumento da temperatura dos condutores (subida do ponto de suspensão ou retensionamento).
- Recondutoramento (com condutores compactos ou de alta temperatura) e Métodos especiais de engenharia (Ampacidade estatística e Ampacidade em tempo real).
- Recapacitações de tensão, abrangendo Reisolamento (Acréscimo ou substituição de Isoladores, Modificação/substituição da viga); Aumento das distâncias de segurança para terra (Subida do ponto suspensão e Retensionamento) e Aumento da distância entre fases (Conversão de circuito duplo para simples, Projeto de nova janela).

1) Nota: os termos em inglês *uprating* (recapacitação) e *upgrading* (melhoria de confiabilidade) são expressões de uso generalizado mundialmente, muito comum também em nossa linguagem técnica.

MÉTODOS PARA MELHORIA DE CONFIABILIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (UPGRADING)

Toda a base do processo de melhoria de confiabilidade consiste em se buscar um acréscimo da confiabilidade mecânica das linhas, por intermédio, principalmente, da utilização de ventos mais intensos no projeto da linha. Isso é caracterizado por novo período de retorno do vento T (ou do gelo, se for o caso) mais elevado que o original, por exemplo, passando-se de $T = 50$ anos para $T = 150$ ou 250 anos. Inversamente, pode-se partir de uma nova confiabilidade desejada e se calcular o período de retorno equivalente. Naturalmente, devem ser avaliadas, de modo econômico, as alternativas de *Upgrading* possíveis ou viáveis para o caso, partindo-se então para o processo decisório respectivo.

ANÁLISE DOS PROCESSOS DE UPGRADING

Como a confiabilidade é o resultado da combinação entre a carga e a resistência mecânica, a melhoria da confiabilidade pode ser conseguida tanto pela diminuição das cargas climáticas quanto pelo acréscimo da resistência característica dos suportes. Essas podem ser descritas por distribuições estatísticas. Dados numerosos de ventos (e/ou gelo), colhidos ao longo de um extenso período de tempo, contribuem para gerar previsões confiáveis das distribuições de carga. Já dados obtidos em número reduzido de anos comprometem as distribuições e introduzem incertezas na previsão da confiabilidade estrutural. Analogamente, se a resistência característica baseia-se em número insuficiente de amostras, sem um tratamento estatístico adequado, podem-se gerar incertezas na previsão da confiabilidade estrutural.

- A redução do impacto das cargas climáticas pode ocorrer pelo decréscimo do número de subcondutores, pela troca dos condutores por condutores compactos, pela redução das cargas de gelo com o uso de camadas repelentes ao gelo (*ice-phobics*) ou solventes do gelo superficial, pelo decréscimo do número de circuitos etc.
- O aumento da resistência característica é o processo mais usual utilizado no reprojeto da linha de transmissão para a melhoria de confiabilidade, consistindo basicamente na introdução de reforços nas estruturas e fundações, e na consideração do fator de uso real, fatores estes desconsiderados no projeto original. Estudos de novos modelos meteorológicos de vento e de novos testes geotécnicos são fundamentais nesta fase.



As principais metodologias para *Upgrading* das linhas abrangem as seguintes medidas:

- Redução do impacto das cargas climáticas, por meio da utilização de condutores compactos, do decréscimo nas cargas de gelo, da redução do número de subcondutores e da redução do número de circuitos.
- Aumento da resistência característica, reforçando-se os montantes das torres e/ou os contraventamentos, e/ou a resistência ao arrancamento (*uplift*) e/ou à compressão das fundações.

Algumas tecnologias novas mais importantes com maiores perspectivas de uso são: tecnologia de levantamento digital a *laser*, o monitoramento em tempo real e a conversão de linhas de corrente alternada em corrente contínua, dentro dos princípios de recapacitação de linhas existentes.

Resumindo, a tendência é que os processos de recapacitação de linhas de transmissão (*Uprating*) e de Melhoria de Confiabilidade (*Upgrading*) se tornem mais importantes e mesmo decisivos para a expansão dos sistemas de transmissão. Cada vez mais a sociedade virá a exigir melhor qualidade e continuidade no suprimento de energia elétrica pelas linhas. Por outro lado, a necessidade de maior capacidade dos eixos de transmissão tornar-se-á cada vez mais intensa. Mas a dificuldade e o custo de obtenção de novas faixas de servidão serão fatores cada vez mais restritivos à construção de novas linhas de transmissão, restando então a alternativa de reforço dos eixos existentes mediante processos de recapacitação (*Uprating*) e melhoria de confiabilidade (*Upgrading*).

Ressalte-se, por fim, a importância dos processos de P&D, visando encontrar alternativas de recapacitação e/ou melhoria de confiabilidade com maior atratividade técnica e econômica.

Recapacitação de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Recapacitação de Linhas de Transmissão*.

Palavras-chave

Linha de transmissão, recapacitação, repotenciação, condutor, ampacidade, sobrecarga, feixe expandido, liga termorresistente, linha de potência natural elevada, vida útil, confiabilidade, desempenho de linhas de transmissão, gerenciamento de risco, mapeamento digital a *laser*, levantamento planialtimétrico, impulso atmosférico, impulso de manobra, corona, radiointerferência, compatibilidade eletromagnética, cálculo mecânico de condutores, otimização de estruturas, monitoração, meio ambiente, riscos ambientais.

Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas duas teses de mestrado, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000
-	-	-	-	-	-	-	1	1



UNIVERSIDADES: ⁽²⁾

- Universidade Federal de Pernambuco (1).
- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1).

Total de 2 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽²⁾

- Engenharia Elétrica (1).
- Engenharia de Produção (1).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados cinco programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	1999
-	1	1	-	2	-	1	-	-

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2001	-
2002	1.663.000,00
2003	-
2004	865.000,00
2005	-
2006	423.000,00
2007	689.000,00
2008	-
TOTAL	3.640.000,00

EMPRESAS PROPONENTES: ⁽³⁾

- Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S.A. – ELETRO-PAULO (2).
- Copel Transmissão S.A. – COPEL (1).

2) Entre parênteses – número de teses relacionadas.

3) Entre parênteses – número de programas relacionados.

- Companhia Energética de Pernambuco – CELPE (1).
- Empresa Amazonense de Transmissão de Energia S.A – EATE (1).

Total de 4 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽³⁾

- J2 Consultoria de Engenharia S/S Ltda. – J2 (1).
- Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (1).
- Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo – FUSP (1).
- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (1).
- KEMA Consulting Brasil Ltda. (1).

Total de 5 entidades.

SNPTEE

Foram analisados 12 informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO - ANOS ÍMPARES:

2009	2007	2005	2003	2001
1	1	2	1	7

EMPRESAS REPRESENTADAS: ⁽⁴⁾

- CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (3).
- COPEL Transmissão S.A. (3).
- Furnas Centrais Elétricas S.A. (3).
- LACTEC (2).
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (2).
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (1).
- ELETROSUL – Centrais Elétricas S.A. (1).
- EPTE – Empresa Paulista de Transmissão de Energia Elétrica (1).
- UFF – Universidade Federal Fluminense (1).
- UFPE – Universidade Federal de Pernambuco (1).
- Fluxo Engenharia Ltda. (1).

Total de 11 empresas.

4) Entre parênteses – número de informes relacionados.



CIGRÉ

Foram analisados 25 trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	2000	1998
6	-	7	1	7	4

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁵⁾

- África do Sul (4).
- Austrália (1).
- Rússia (1).
- Canadá (3).
- Bélgica (1).
- Eslováquia (1).
- França (3).
- Brasil (1).
- Holanda (1).
- Estados Unidos (3).
- China (1).
- Itália (1).
- Espanha (2).
- Japão (1).
- Suécia (1).
- Inglaterra (2).
- Noruega (1).
- Suíça (1).
- Irlanda (2).
- Nova Zelândia (1).
- Sérvia e Montenegro (1).
- Alemanha (1).
- Romênia (1).

Total de 23 países.

INPI – Nenhuma patente selecionada.

IEEE

Foram analisados seis trabalhos apresentados durante os vários eventos patrocinados pelo IEEE em âmbito mundial.

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2009	2007	2006
3	1	2

5) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.

PAÍSES REPRESENTADOS: ⁽⁵⁾

- Estados Unidos (2).
- Romênia (2).
- África do Sul (1).
- Índia (1).

Total de 4 países.

Temas para Futuros Desenvolvimentos

A análise da bibliografia selecionada indicou os seguintes aspectos relevantes:

As duas teses de mestrados relativas ao tema recapitação de linhas de transmissão publicadas nos anos 2000 e 2001 já indicaram a necessidade de um estudo integrado, contemplando os estudos elétricos para o dimensionamento das distâncias mínimas de isolamento na torre, além dos estudos ambientais e o possível aumento dos impactos dos efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos, estudos mecânicos para análise da suportabilidade das estruturas e estudos civis estudando principalmente as fundações e aspectos construtivos.

Diversas alternativas são propostas, como por exemplo: alteração do limite térmico dos condutores, reconduzir a linha de transmissão com aumento da seção dos condutores, lançar mais um condutor por fase, expandir o feixe de subcondutores existentes, usar liga de alumínio termo-resistente etc.

Inicia-se a discussão sobre a quantificação e gerenciamento dos riscos envolvidos por meio da aplicação de um sistema de decisão multicritério.

Os cinco programas de P&D apresentados à ANEEL indicam a necessidade de ensaios no campo da tecnologia selecionada para a recapitação, de forma a avaliar o comportamento da instalação frente às condições operativas e ambientais da região, tais como perdas, flechas, compatibilidade eletromagnética etc.

Indicou-se a preocupação com a padronização de metodologias, capacitação de profissionais nas novas tecnologias e redução dos custos de projeto.

Os 12 informes analisados do SNTPEE apresentam experiências práticas de projetos de recapitação de linhas de transmissão.

Com relação aos estudos civis e mecânicos, apontam-se a análise para determinação das estruturas que poderão ser reutilizadas sob as novas condições de carregamento, cálculo mecânico dos condutores submetidos às altas temperaturas, projeto e dimensionamento das novas ferragens e redimensionamento das fundações.



No tocante aos estudos elétricos, ressalta-se a necessidade de integração entre os especialistas nos estudos de expansão do sistema, os projetistas e o pessoal de operação e manutenção; programas computacionais para dimensionamento das distâncias de isolamento, efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos, perdas etc; aplicação de novas ferramentas analíticas para otimização das alternativas de recapacitação, como por exemplo mapeamento topográfico digital a *laser*.

Com relação aos estudos ambientais, indicou-se a necessidade de análise do impacto das perturbações e aquelas decorrentes da reconstrução.

Abordaram-se ainda os aspectos construtivos com apresentação de procedimentos, especificação de segurança, apoio logístico etc.

Do ponto de vista econômico, indicou-se a necessidade de estabelecer a análise custo *versus* benefício das diversas alternativas visualizadas para um projeto de recapacitação, comparando a situação atual e futura da linha de transmissão.

Foram analisados 25 informes técnicos apresentados nas sessões bienais do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris. Foram apresentadas algumas experiências relacionadas ao aumento da capacidade de transmissão das linhas, análise da alternativa de conversão de linhas de CA em linhas de CC objetivando o aumento da potência transmitida pelo mesmo corredor de passagem. A grande maioria dos informes refere-se à apresentação de metodologias para análise das alternativas de recapacitação, considerando indicadores de confiabilidade, vida útil remanescente, limite térmico dos condutores, restrições elétricas, mecânicas, civis e ambientais.

Foram selecionados seis trabalhos do IEEE relacionados ao tema recapacitação. A alternativa imediata à recapacitação é a plena utilização da linha, considerando a sua máxima capacidade térmica. Neste sentido, um informe propõe a instalação de sensores para avaliação da capacidade dinâmica dos condutores sob as diferentes condições atmosféricas. A comunicação dos dados seria em tempo real para a Central de Operações.

Foram apresentadas possíveis alternativas como, por exemplo, recapacitação de uma linha de 220 kV em circuito duplo, conversão de uma linha de circuito duplo em CA em um sistema composto de uma linha de CA e outra de CC, recapacitação de uma linha de 275 kV em 400 kV, modificação de torres de 138 kV para 230 kV.

Outro aspecto importante abordado é a determinação da vida útil remanescente de uma linha de transmissão considerando todos os seus componentes.

Com base na bibliografia apresentada, procurou-se identificar quais

os itens que carecem de maior aprofundamento em termos de estudos e/ou pesquisas complementares, de forma que se possa obter um maior retorno em termos de aumento da confiabilidade das linhas de transmissão, aumento dos níveis de carregamento, redução dos custos de implantação e redução dos impactos ambientais.

Os assuntos identificados no tema recapacitação de linhas de transmissão foram os seguintes:

- Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de linhas de transmissão existentes, considerando a análise integrada de todos os componentes que compõe a linha.
- Conversão de linha de CA existente em linha de CC como uma alternativa para aumento da capacidade de transmissão no mesmo corredor.
- Novos conceitos, estratégias e critérios de planejamento da expansão do sistema, de modo que a alternativa de recapacitação das linhas de transmissão existentes possa ser efetivamente considerada como uma alternativa técnica e economicamente viável.
- Identificação, análise e consolidação de informações, metodologias e critérios como elemento de integração entre os projetistas de linhas de transmissão e os planejadores da expansão do sistema, como forma de tornar a recapacitação de linhas existentes uma alternativa que deve ser sistematicamente considerada no planejamento a longo prazo.
- Caracterização e identificação dos mecanismos de deteriorização e obsolescência dos componentes de uma linha de transmissão, objetivando a determinação de sua vida útil remanescente.
- Processo de auditoria para a determinação das condições de uma linha de transmissão existente, objetivando fornecer subsídios para tomada de decisão relativa à sua recapacitação.
- Ampliação da capacidade de transmissão de uma linha existente, considerando o monitoramento em tempo real das variáveis elétricas e ambientais.
- Métodos de previsão climática ao longo da rota de uma linha de transmissão com integração aos modelos de capacidade térmica dos condutores e componentes de uma linha de transmissão existente e equipamentos das subestações terminais, de modo a determinar com maior precisão os valores possíveis de sobrecarga dinâmica.
- Metodologias para gerenciamento de riscos, determinação de índices de segurança, disponibilidade e confiabilidade de linhas de transmissão recapacitadas.



Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

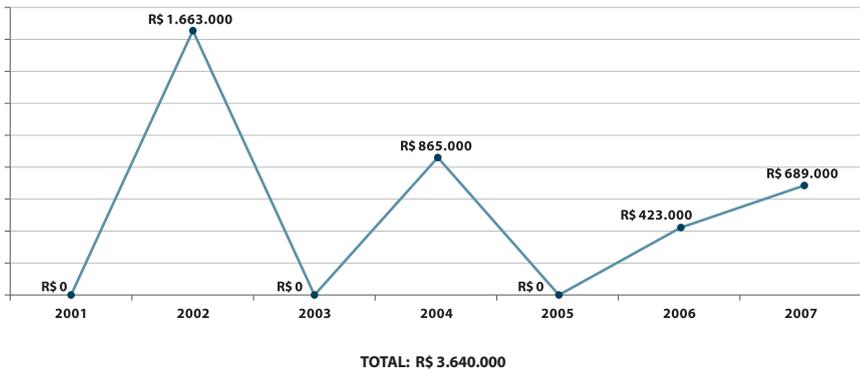
Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL www.aneel.gov.br.

O valor total aplicado nos anos de 2001 a 2007 foi de R\$ 3.640.000,00, o que corresponde a 6,22% do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão em geral.

O ano de 2002 foi o de maior aplicação com R\$ 1.663.000,00. O gráfico abaixo apresenta os investimentos por ano e por assunto.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – RECAPACITAÇÃO

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas, relacionadas ao tema analisado, foram selecionados 50 informes técnicos. A fonte CIGRÉ forneceu o maior número com 25 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2004 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de nove.

NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – RECAPACITAÇÃO

Fonte	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPES	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2
ANEEL	-	-	-	1	-	2	-	1	1	-	-	5
SNPTEE	-	-	7	-	1	-	2	-	1	-	1	12
CIGRÉ	4	7	-	1	-	7	-	-	-	6	-	25
INPI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
IEEE	-	-	-	-	-	-	-	2	1	-	3	6
Total por ano	4	8	8	2	1	9	2	3	3	6	4	
TOTAL DE INFORMES: 50												

Referências

CAPES - Teses de Universidades (2)

2001 (1)

T01-01 – VILELA, R. F. T. *Gerenciamento dos riscos na recapacitação de linhas de transmissão – Uma nova maneira de pensar*. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE: 2001.

2000 (1)

T01-00 – OLIVEIRA, C. M. F. *Recapacitação de linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ: 2000.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (5)

2007 (1)

A01-07 – *Metodologia de análise das vulnerabilidades de uma empresa de transmissão de energia elétrica para mitigar impacto em sua disponibilidade*. EMPRESA AMAZONENSE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA S.A. – EA-TE, KEMA CONSULTING BRASIL LTDA: 2007.

2006 (1)

A01-06 – JARDINI, J. A. *Repotencialização de linhas de transmissão e melhoria de desempenho*. ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRIC-



DADE DE SÃO PAULO S.A. – ELETROPAULO, J2 CONSULTORIA DE ENGENHARIA S/S LTDA – J2: 2006.

2004 (2)

A01-04 – BEZERRA, J. M. B. *Análise dos métodos de correção dos limites de carregamentos das linhas de transmissão da CELPE*. COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO – CELPE, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE: 2004.

A02-04 – MÜLLER, M. *Otimização e padronização das técnicas de recapacitação de linhas de transmissão da Copel*. COPEL TRANSMISSÃO S.A. – COPEL – TRANS, INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2004.

2002 (1)

A01-02 – GOUVEA, M. R. *Desenvolvimento de tecnologia para aumento da capacidade de transporte das linhas de transmissão urbanas da Eletropaulo; com aproveitamento da infraestrutura existente e redução dos custos de implantação*. ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRICIDADE DE SÃO PAULO S.A. – ELETROPAULO, FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – FUSP: 2001.

SNPTEE (12)

2009 (1)

S01-09 – STEPHAN, J. C. S. *Projeto de recapacitação de fundações de suporte de linhas de transmissão. A experiência da Eletrosul*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

2007 (1)

S01-07 – WIEDMER, R. S.; SOUZA, O. H.; SILVA, V. P.; HOFFMANN, J. N. *Recapacitação de linhas de transmissão 138 kV utilizando cabo de alumínio liga 8201*. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

2005 (2)

S01-05 – KERSTING, A. P. B.; MULLER, M.; HOFFMAN, J. N. *Recapacitação de linhas de transmissão com a utilização de tecnologia de mapeamento digital a laser*. XVIII SNPTEE. Curitiba/PR: 2005.

S02-05 – WIEDMER, R. S. *Recapacitação de linha de transmissão 230 kV utilizando cabo termorresistente TACSR*. XVIII SNPTEE. Curitiba/PR: 2005.

2003 (1)

S01-03 – SILVA, R. L.; NETO, A. P.; JÚNIOR, O. R. *Subsídios para análise de remuneração do investimento nos projetos de recapacitação das linhas de transmissão*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

2001 (7)

S01-01 – SILVA, R. L.; NÓBREGA, J. E. T.; NETO, A. P.; JÚNIOR, O. R.; CAVALCANTI, S. G. *Procedimentos de recapacitação da linha de transmissão 230 kV Milagres-Banabuiú-Fortaleza pelo sistema Festão*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S02-01 – GABAGLIA, C. P. R.; OLIVEIRA, C. F.; SONDERMANN, M. A.; ESMERALDO, P. C. V.; RICCO, V. H. G.; DART, F. C.; BARBOSA, C. R. N.; NETO, A. M.; DOMINGUES, L. A. M. C. *Utilização do conceito de feixe expandido para recapacitação de linhas de transmissão de 500 kV de Furnas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S03-01 – SILVA, A. O.; SANTIAGO, N. H. C.; GABAGLIA, C. P. R.; ALENCASTRO, A. F. D. *Recapacitação de linha de transmissão de 138 kV – A experiência de Furnas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S04-01 – COSTA, A.; RUEDA, F. A.; MARÇO, L. C.; MORENO. *Repotencialização de linhas de transmissão: Aspectos técnicos e ambientais*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S05-01 – ABDO, R.; LIMA, D.; SCHILLING, M. T. *Índices de desempenho probabilístico de linhas de transmissão*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S06-01 – CORREIA, D. M.; BRASIL, D. O. C.; LIMA, D. C. *Uma proposta de avaliação do desempenho de linhas de transmissão*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S07-01 – JÚNIOR, O. R.; FREIRE, A. R. F.; BEZERRA, J. M. B. *Sobrecarga em ativos do agente de transmissão: A questão das linhas aéreas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (25)

2008 (6)

C01-08 – HALSAN, K.; LOUDON, D.; GUTMAN, I.; LUNDQUIST, J. *Feasibility of upgrading 300kV AC lines to DC for increased power transmission capability*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C02-08 – STEPHEN, D.; GAUNT, T.; MUFTIC, D.; MARAIS, R.; NAIDOO, P.; NARAIN, S. *AC to DC conversion and other techniques to uprate*



transmission lines based on input from planners. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C03-08 – LAGO, J.; SAVCAK, M.; SKURCAK, L.; BOJDA, P. *Transmission capacity increasing of overhead heavy-current lines with the respect of the environmental limits of population protection against the effect of electromagnetic field.* CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C04-08 – PRAMAYON, P.; CATCHPOLE, P.; GUERARD, S.; NORTON, M.; PUFFER, R.; SORENSEN, A.; AANHAANEN, G.; WEIBEL, M.; BAKIC, K. *Increasing capacities of overhead lines needs and solutions.* CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C05-08 – BARTHOLD, L.; DOUGLASS, D.; WOODFORD, D. *Maximizing the capability of existing ac transmission lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C06-08 – STEPHAN J.; COSTA C. *Uprate and upgrade of overhead transmission lines methodologies and reliability.* CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2004 (7)

C01-04 – DEVINE, K.; NOBLE, R.; MEKHANOSHIN, B.; MEKHANOSHIN, K.; SHKAPTSOV, V. *Uprating of OHTL on the base of verification of component condition and indirect determination of conductor temperature.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C02-04 – SÁNCHEZ, D.; ALONSO, C. *Increase in transmission capacity in high-voltage power lines on the Levante (Eastern Spain) coastal path.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C03-04 – ADACHI, K.; KUMEDA, T.; NAGANO, K. *A method for expanding the current capacity of overhead transmission lines.* CIGRÉ, 2004, Paris, França: 2004.

C04-04 – HOFFMANN, S.; CLARK, A. *The approach to thermal uprating of transmission lines in the UK.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C05-04 – BRENNAN, G. *Refurbishment of existing overhead transmission lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C06-04 – STEPHEN, R. *Description and evaluation of options relating to uprating of overhead transmission lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C07-04 – DUTINA, M.; NIMRIHTER, M.; NOVAKOVIC, S. *Development and application methodology for revitalization of overhead lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

2002 (1)

C01-02 – CAUZILLO, B.; PARIS, L.; PIROVANO, G. *Ampacity assessment of overhead line conductors as a compromise between safety and deregulated market requirements.* CIGRÉ, Paris, França: 2002.

2000 (7)

C01-00 – STEPHEN, R.; MUFTIC, D. *Determination of the thermal rating an uprating method for existing lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C02-00 – STEPHEN, C. *Description of state of the art methods to determine thermal rating of lines in real-time and their application in optimizing power flow*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C03-00 – SMITH, P. *Ageing of the system – Impact on planning*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C04-00 – DOUGLASS, D.; MOTLIS, Y.; SEPPA, T. *IEEE's approach for increasing transmission line ratings in North America*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C05-00 – LAMSOUL, J.; ROGIER, J.; COUNESON, P.; OVERMEERE, A. *Belgian experience on initiatives to improve the capability of existing overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C06-00 – TUNSTALL, M.; HOFFMANN, S.; DERBYSHIRE, N.; PYKE, M. *Maximizing the ratings of national grid's existing transmission lines using high temperature, low sag conductor*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C07-00 – GAUDRY, F.; GOURIT, J.; LARRIPA, B. *Assessment of existing overhead transmission lines and solutions for extending their residual lifetimes*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

1998 (4)

C01-98 – SOTO, F.; ALVIRA, D.; MARTIN, L.; LATORRE, J.; LUMBRELAS, J.; WAGENSBERG, M. *Increasing the capacity of over head lines in the 400 kV Spanish transmission network: real time thermal ratings*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C02-98 – POPESCU, A.; CARAIMAN, M.; MECULESCU, M.; GHEORGHITA, G.; BONCU, L.; IVAN, M.; COATU, S.; GOLOVANOV, N.; NICOARA, B.; COSTEA, M.; RUCINCHI, D. *400kV Romanian – Hungarian link. Upgrading the existing interconnection line*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C03-98 – KIESSLING F.; HUSSELS, D.; JUERDENS, C.; RUHNAU, J. *Upgrading high-voltage lines to increase their capacity and mitigate environmental impacts*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C04-98 – GAUDRY, M.; CHORE, F.; HARDY, C.; GHANNOUM, E. *Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

INPI – Nenhuma patente selecionada.



IEEE (6)

2009 (3)

E01-09 – YANG, Y.; HARLEY, R.; DIVAN, D.; HABETLER, T., *Adaptive echo state network to maximize overhead power line dynamic thermal rating*. IEEE: 2009.

E02-09 – FLOREA, G. A.; LIPAN, L.; GAL, S.; KAYTAR, E.; METIU, V.; RODEAN, I. *Assessing the remaining life time of 220 kV and 440 kV OHTL and the required measures for the coordination of remaining life of the various constructive elements of lines*. IEEE, Bucareste Power Tech Conference: 2009.

E03-09 – MATEESCU, E.; MARGINEAN, D.; GHEORGHITA, G.; GRAGAN, E.; GAL, S.; MATEA, C. *Upgrading a 220 kV double circuit transmission line in Romania; study of the possible solutions, technical and economic comparison*. IEEE, Bucareste Power Tech Conference: 2009.

2007 (1)

E01-07 – RAHMAN, H.; KHAN, B. H. *Power upgrading of transmission line by combining AC-DC transmission*, IEEE, Transactions on power systems: 2007.

2006 (2)

E01-06 – NARAIN, S.; MUFTIC, D.; JACOBS, B.; NAIDOO, P. *Upgrading of 275 kV lines to 400 kV as part of a contingency plan for generation integration*. IEEE, 2006.

E02-06 – WOOD, B. C.; MOORE, T. L. *Modifying existing 138 kV transmission towers to 230 kV capacity*. IEEE, 2006.

Outras Fontes

Cigré Brochures:

How overhead lines are redesign for upgrading/upgrading. Analysis of the replies to the questionnaire. 294.2006 – SC B2 WG B2.06.

Guidelines for increased utilization of existing overhead transmission lines. 353.2008 SC B2 WG B2.13.



CAPÍTULO 7

Estruturas de Linhas de Transmissão

Vinicius Barros Rêgo



PREFÁCIO

João Batista Guimarães Ferreira da Silva

O setor elétrico vem passando por profundas transformações nas últimas décadas. Várias causas podem ser apontadas como responsáveis por estas modificações. Dentre essas, duas talvez possam ser consideradas como as mais relevantes. Primeiramente, a evolução do mercado de energia elétrica aberto a novos investidores, muitos dos quais privados, trouxe ao setor novos agentes tais como os Produtores Independentes de Energia (IPP), as novas Empresas de Transmissão (Transco), de Distribuição (Districo), e novas entidades tais como as Agências Reguladoras ou Operadores do Sistema Independentes (ISO). Cada país passou, assim, a adotar um modelo de gestão da energia que melhor se adaptasse às suas circunstâncias e particularidades em termos de matriz energética e centros de cargas.

Um segundo motivo causador de grandes mudanças tem sido as questões ambientais. Se, nas últimas décadas, estas questões vinham sendo debatidas a níveis cada vez mais amplos, a consciência ambiental parece ter se difundido de vez na sociedade, motivada pelas discussões em torno das mudanças climáticas, efeito de aquecimento global, poluição, desmatamento etc. Este fórum ampliado de discussões sobre as questões ambientais, coincide, de certa forma, com a entrada de agentes privados no setor, o que acaba por provocar uma espécie de ressonância nas questões em discussão, colocando-as como um ponto de confronto entre o interesse privado e o bem público.

No que se refere especificadamente ao mercado de linhas de transmissão, essas mudanças ocorridas convergiram para um mesmo ponto, qual seja a supervalorização dos corredores existentes. Por um lado, está cada vez mais difícil obter-se corredores para a construção de novas linhas. Por outro, mo-



tivados pela competição, os proprietários dos ativos de transmissão existentes sempre querem obter o máximo desses corredores em termos de capacidade de transmissão, normalmente com o mínimo de recursos investidos. Como consequência, as linhas antigas e em serviço há vários anos devem agora ser ainda mais confiáveis e eficientes em termos da relação “capacidade de transmissão/custo” e, de preferência, ambientalmente amigáveis. Neste contexto, questões como recapacitação (*uprating*), aumento da confiabilidade (*upgrading*), reforma (*refurbishment*), extensão de vida útil (*life extension*), e/ou conceitos como disponibilidade em serviço, emergência, indisponibilidade forçada e penalidades, tornaram-se questões cruciais que o novo mercado de linhas passou a demandar que fossem estudadas.

No que diz respeito às estruturas para as linhas de transmissão, estas passaram a desempenhar um relevante papel dentro deste contexto, uma vez que a maior parte das questões acima mencionadas está diretamente relacionada a essas estruturas. Isto porque, conforme a norma internacional aplicável ao projeto de linhas aéreas de transmissão IEC 60826, a torre de suspensão deve ser projetada para ser o elo mais frágil do sistema. A coordenação de resistências, associada à sequência preferencial de falhas, impõe que todos os demais elementos do sistema (condutores, isoladores, demais torres, fundações etc.) sejam projetados para falharem após as torres de suspensão.

Analisando a equação básica de equilíbrio proposta pela norma IEC acima citada, tem-se que:

$$\gamma_U Q_T \leq \Phi_R R_C$$

onde, as cargas (Q_T) devem ser “majoradas” conforme seus graus de incerteza, e as resistências características (R_C) “minoradas” conforme seus coeficientes de dispersão (ignorância).

Dentro deste contexto, o conhecimento das cargas como, por exemplo, Q_T (carga de vento associada a um período de retorno T), e sobretudo suas incertezas, é mandatório para se ter um projeto confiável e econômico. Estudos aprofundados ainda são necessários para melhor conhecer os diferentes tipos de vento, suas modelagens e consequentes cargas atuantes sobre os condutores e estruturas. Pesquisas já realizadas mostram que os fenômenos de vento são complexos e podem ter naturezas distintas em termos de ocorrências, intensidades, amplitudes e espectro de variação com o tempo. Investigações neste sentido devem, portanto, ser fortemente incentivadas, uma vez que estudos publicados pelo CIGRÉ revelam que 85% de todas as falhas que já ocorreram em sistemas de transmissão foram devidas a ventos e/ou neve com vento.

No tocante às resistências, muito se estudou nos últimos anos para o entendimento, qualificação e quantificação do “fator de dispersão das resistências” Φ_R . Recentemente, foram publicadas pelo CIGRÉ várias brochuras técnicas que mostram como a resistência das torres pode variar como função do conhecimento e experiência profissional, ou devido à modelagem proposta, às normas e programas de cálculo utilizados, às práticas de cálculo e detalhamento, à variação nas propriedades dos materiais, ou ainda em função das tolerâncias de fabricação e montagem adotadas. Estes estudos se tornaram fundamentais para aplicação do método probabilístico proposto pela IEC 60826, tanto para o projeto de estruturas para novas linhas, quanto para os estudos de recapacitação anteriormente mencionados.

Muito pouco, contudo, já foi realmente estudado sobre o caráter dinâmico das cargas e a resposta das estruturas a estas solicitações. As torres têm sido ainda projetadas como elementos isolados, recebendo carregamentos estáticos oriundos dos condutores e para-raios, e transmitindo-os às fundações. Na realidade, uma linha de transmissão é um sistema estrutural contínuo e como tal deveria ser modelado. O uso extensivo de torres de suspensão estaiadas tem feito aproximar estruturalmente o caráter inicialmente rígido das torres à natural flexibilidade do conjunto condutores/para-raios, isoladores e ferragens, tornando o sistema “linha de transmissão” mais deformável e de comportamento menos linear. Acredita-se, pois, que as novas pesquisas sobre estruturas para linhas de transmissão deveriam estar focadas em entender os aspectos dinâmicos dos carregamentos, bem como em conhecer a resposta estrutural dinâmica das estruturas como parte do sistema linha de transmissão como um todo.

Ainda no campo de futuras pesquisas sobre torres para linhas de transmissão, capítulo à parte deve ser dedicado às estruturas existentes. Estudos, técnicas e ferramentas para diagnóstico são essenciais nos trabalhos de recuperação das torres existentes, visando aumentar-lhes a vida útil, a capacidade de transmissão, e/ou a confiabilidade.

Outro tema importante a se pensar para futuros estudos diz respeito à aceitação pública das linhas de transmissão. Todo esforço deve ser concentrado em melhorar o aspecto visual das estruturas, posto que estas são os elementos mais visíveis na paisagem. Iniciativas objetivando aprimorar a estética das torres e sua aceitação pela população já são realidade em vários países. Interessante brochura técnica a respeito foi recentemente publicada pelo CIGRÉ.



Estruturas de Linhas de Transmissão

Vinícius Barros Rêgo

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Estruturas de Linha de Transmissão*.

Palavras-chave

Linha de transmissão, torre, torre metálica treliçada, estrutura metálica, autoportante, estaiada, estaiada monomastro, *cross-ropes*, linha de potência natural elevada – LPNE, linha compacta, compactação, estrutura compacta, espaçador, fase, disposição triangular, fundações, interação solo-estrutura, feixe de condutores, feixe expandido, poluição visual, túnel de vento, fatores de rajada, velocidade do vento, força do vento, coeficiente de arrasto, propriedades aerodinâmicas, modelos preditivos, otimização, cálculo estrutural, dimensionamento estrutural, modelo computacional, modelos preditivos, ligações parafusadas, teste de carga, coeficiente de minoração de resistência.

Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas 13 teses de mestrado, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999/1998
1	4	1	2	2	-	-	1	1	1

UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal do Rio Grande do Sul (3).
- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2).
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (2).
- Pontifícia Universidade Católica do Paraná (1).
- Universidade de Santa Catarina (1).
- Universidade do Estado do Rio de Janeiro (1).
- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (1).
- Universidade Federal de Ouro Preto (1).
- Universidade Federal de Pernambuco (1).

Total de 9 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia Civil (9).
- Engenharia Mecânica (7).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados quatro programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999/1998
-	-	-	1	-	2	1	-	-	-

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2001	-
2002	559.000,00
2003	590.000,00
2004	-
2005	446.000,00
2006	-
2007	-
2008	-
TOTAL	1.595.000,00

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.



EMPRESAS PROPONENTES: ⁽²⁾

- Eletrosul Centrais Elétricas S.A. – ELETROSUL (1).
- Ampla Energia e Serviços S.A. - AMPLA (1).
- Copel Transmissão S.A. - COPEL-TRANS (1).
- Furnas Centrais Elétricas S.A.(1).

Total de 4 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽²⁾

- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (2).
- Fundação de Ensino de Engenharia em Santa Catarina – FEESC (1).
- Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (1).
- Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FAURGS (1).

Total de 4 entidades.

SNPTEE

Foram analisados 15 informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO – ANOS ÍMPARES:

2009	2007	2005	2003	2001
4	-	2	8	1

EMPRESAS REPRESENTADAS: ⁽³⁾

- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (2).
- COPEL Geração e Transmissão S.A. (2).
- Engetower engenharia (2).
- Furnas Centrais Elétricas S.A. (2).
- A. Rigueira Consultoria Ltda. (1).
- ABB (1).
- AES Sul (1).
- AGN Estrutural (1).

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.

- BATÁVIA Engenharia e Consultoria Ltda. (1).
 - COPPE / UFRJ (1).
 - DAMP Electric (1).
 - Electrovidro S.A. (1).
 - Eletronorte (1).
 - ENPRO Engenharia (1).
 - Érico Lisboa Pesquisa e Desenvolvimento (1).
 - Fundação Padre Leonel Franca (1).
 - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (1).
 - JFNOLASCO Consultoria (1).
 - LAC / UFRGS (1).
 - Leme Engenharia (1).
 - PLP (1).
 - Sinergia E C Ltda. (1).
- Total de 22 empresas.**

CIGRÉ

Foram analisados 19 trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	2000	1998
3	4	4	3	1	4

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Canadá (4).
- França (2).
- Noruega (2).
- Austrália (1).
- Áustria (1).
- Bélgica (1).
- Brasil (1).
- China (1).
- Dinamarca (1).
- Egito (1).
- Índia (1).
- Itália (1).
- Japão (1).
- Reino Unido (1).
- Rússia (1).
- Suécia (1).

Total de 16 países.

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.



INPI – Nenhuma patente selecionada.

IEEE

Foram analisados dois trabalhos apresentados durante os vários eventos patrocinados pelo IEEE em âmbito mundial.

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2006	2003
1	1

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Brasil (1).
- Canadá (1).
- Israel (1).

Total de 3 países.

Temas para Futuros Desenvolvimentos

O atual ambiente do setor elétrico brasileiro, com a abertura legal para os empreendimentos privados e, em particular, com a implantação da sistemática dos leilões para a definição dos concessionários das linhas de transmissão a serem construídas, vem promovendo uma saudável competição entre as empresas de engenharia desse setor. Essas empresas têm desenvolvido estudos de novas concepções e tecnologias, visando vantagens quanto ao desempenho elétrico, mecânico e estrutural, em um mercado que busca soluções mais econômicas, sem deixar de atender aos critérios técnicos, de segurança e manutenção.

Os informes técnicos e as teses da CAPES mostraram claramente o interesse em pesquisas que visam diminuir ou controlar o efeito da ação dos ventos sobre as estruturas. A solução para este problema está sendo a modelagem numérica ou por elementos finitos para ter uma visão mais experimental do que acontece com as torres. Há, também, uma grande preocupação com os parâmetros de projeto, quanto ao desempenho e à confiabilidade.

Nos informes nacionais e internacionais, os pesquisadores mostraram um grande interesse em avaliar e revisar as normas existentes (e.g., NBR 6123/88, IEC 60826, entre outras) que servem como diretrizes de um projeto de uma estrutura de linha de transmissão. As normas podem estar desatualizadas, colocando em perigo o desempenho destas torres. Uma situação típica, que serve como exemplo da necessidade de atualização das normas, é que várias torres estão caindo com intensidades de ventos muito menores do que as previstas no projeto. Diante disso, a forma como é calculada, nas normas, a intensidade do vento também está sendo questionada. A partir do pressuposto de médias de vento, a norma desconsidera o carregamento aleatório que rajadas de ventos podem ocasionar numa estrutura. Esse fato ficou comprovado com os diversos trabalhos focados no que tange aos efeitos de tornados e rajadas de vento.

No âmbito da análise estrutural destas torres, a tecnologia mais utilizada recentemente, que recebeu diversos enfoques nos informes analisados, é o uso de ferramentas de modelagens computacionais das estruturas para fins diversos, principalmente para interação fluido-estrutura, demonstrando um alinhamento das linhas de pesquisas nacionais com as internacionais. Vários tipos de modelagens podem ser utilizadas, porém a que ganhou maior destaque foi a que utiliza o método dos elementos finitos para a representação computacional. Estas modelagens estão sendo utilizadas para fundamentar os argumentos de modificação e revisão das normas existentes.

Outro grande interesse demonstrado por parte dos informes técnicos foi quanto à elaboração do projeto, tendo como objetivo principal reduzir os custos sem perder qualidade da transmissão. Nesse contexto, várias alternativas de geometrias, de tipos de estruturas metálicas, de materiais, de fundações, estão sendo estudadas. Uma grande parte dos trabalhos analisados avalia o desempenho das torres estaiadas, o que parece ser um consenso de projetistas para melhorar o desempenho das estruturas com relação aos critérios mecânicos, elétricos, civis e econômicos. No Brasil, em particular, o estudo da estrutura monomastro estaiada tem ganhado importância nos informes nacionais avaliados. Vale ressaltar que tiveram poucos trabalhos que trataram da revisão do desempenho das estruturas já existentes.

Ainda nesse contexto econômico, outra linha de estudo muito pesquisada, e com datação recente, são as linhas compactas, também conhecidas como Linha de Potência Natural Elevada (LPNE). Esta tecnologia LPNE desenvolvida permite aumentar a capacidade de transmissão de energia elétrica de uma linha por meio da disposição adequada dos condutores das fases, de modo a otimizar a distribuição de campo elétrico. Ou seja, para uma mesma potência a ser trans-



mitida, a LNPE garante um projeto mais econômico que os projetos tradicionais de linhas de transmissão. A tecnologia LPNE pode ser utilizada tanto para novos projetos quanto para recapacitação de linhas em operação.

Nos últimos quatro anos, surgiram diversas pesquisas, tanto no ambiente nacional como internacional, avaliando a viabilidade do uso do máximo de condutores por fases sem prejudicar a qualidade da transmissão de energia. Estudam-se diversas geometrias de junções, de forma a diminuir as distâncias entre fases e permitir o máximo de condutores por fase. Essa compactação permitirá aumentar a quantidade de energia transmitida, sem a necessidade de implantar novas linhas de transmissão.

Esses esforços em compactar a linha têm, em comum, um objetivo e um obstáculo, até então intransponível: o objetivo é de aproximar ao máximo as fases, e o obstáculo é a manutenção do comprimento do vão constante. Linhas compactas são possíveis quando os vãos são pequenos e uniformes. Visto essa barreira, no projeto de LPNE, um trabalho chamou bastante atenção com relação a sua proposta para eliminar o inconveniente de vãos extensos. Neste projeto os condutores são suspensos, ao longo do vão, por cabos de aço que, por sua vez, sustentam-se nas torres. Isso possibilitaria vãos menores, viabilizando uma maior compactação da linha, e menor custo com torres.

Com base na bibliografia apresentada, procurou-se identificar quais os itens que carecem de maior aprofundamento em termos de estudos e/ou pesquisas complementares, de forma que se possa obter um maior retorno em termos de aumento da confiabilidade das linhas de transmissão, aumento dos níveis de carregamento, redução dos custos de implantação e redução dos impactos ambientais.

Os assuntos identificados no tema estruturas de linha de transmissão foram os seguintes:

- Estabelecimento de novos critérios e metodologias para projeto de torres de transmissão de energia elétrica. Uma revisão da metodologia de projeto de estruturas de transmissão, por serem antigas e não considerar novos parâmetros hoje existentes.
- Revisão de normas de projeto quanto à forma do cálculo das intensidades das forças do vento nas estruturas e quanto à existência de fenômenos de rajadas de vento e tornados.
- Desenvolvimento e avaliação de projetos de novas geometrias de torres que possibilitem reduzir os custos, a agressão ao meio ambiente, a facilidade de implantação, e o aumento de confiabilidade. Dentro desse contexto, a avaliação de desempenho das estruturas estaiadas.
- Desenvolvimento de estudos que permitam a máxima compactação

das linhas, podendo ser estudos com relação a novos arranjos das fases, ou novas geometrias que possibilitem essa aproximação das fases, ou da mínima distância entre as fases para que não ocorram interferências entre as fases.

- Análise dos efeitos das ações climáticas nas estruturas de transmissão, como tempestades, terremotos, tornados, furacões, inundações, raios, entre outras.
- Desenvolvimento de métodos de predição de eventos climáticos prejudiciais às estruturas das linhas, para garantir a continuidade do serviço e restabelecimento rápido da prestação do serviço.
- Estudos de impactos das estruturas no meio ambiente. Analisar como as fundações influenciam no solo.

Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

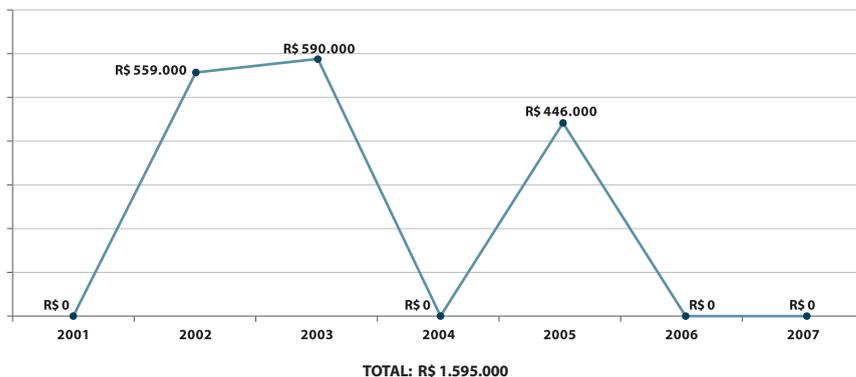
Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL.

O valor total aplicado em estruturas, nos anos de 2001 a 2007, foi de R\$ 1.595.000,00, o que corresponde a 2,73% do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados à linha de transmissão.

O ano de 2003 foi o de maior aplicação com R\$ 590.000,00. O gráfico abaixo apresenta os investimentos em estruturas por ano.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – ESTRUTURAS

Fonte: Programa de P&D da ANEEL





Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema em pauta, foram selecionados 53 informes técnicos. A fonte CIGRÉ forneceu o maior número com 19 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2003 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de 11.

NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – ESTRUTURAS

Fonte	98/99	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPES	1	1	1	-	-	2	2	1	4	1	-	13
ANEEL	-	-	-	1	2	-	1	-	-	-	-	4
SNPTEE	-	-	1	-	8	-	2	-	-	-	4	15
CIGRÉ	4	1	-	3	-	4	-	4	-	3	-	19
INPI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
IEEE	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	2
Total por ano	5	2	2	4	11	6	5	6	4	4	4	
TOTAL DE INFORMES: 53												

Referências

CAPES - Teses de Universidades (13)

2008 (1)

T01-08 – PECIN, T. G. *Ações mecânicas tornádicas globais sobre torres de transmissão de energia elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: 2008.

2007 (4)

T01-07 – ARGENTA, M. A. *Análise de torres de transmissão submetidas à cargas dinâmicas*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina: 2007.

T02-07 – HATASHITA, L. S. *Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná: 2007.

T03-07 – JÚNIOR, J. K. *Incertezas de modelo na análise de torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2007.

T04-07 – AGUILERA, J. R. F. *Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: 2007.

2006 (1)

T01-06 – OLIVEIRA, M. I. R. *Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro: 2006.

2005 (2)

T01-05 – RIPPEL, L. I. *Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2005.

T02-05 – LIBRELOTTO, A. C. *Estudo do carregamento de vento em cabos de linhas de transmissão objetivando aplicação em normas de projeto*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul: 2005.

2004 (2)

T01-04 – GABRILLI, T. V. *Análise do comportamento estrutural de torres de transmissão tubulares via simulação computacional*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto: 2004.

T02-04 – RODRIGUES, R. S. *Mecânica do colapso aeroelástico de torres de Transmissão de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro: 2004.

2001 (1)

T01-01 – JÚNIOR, A. *Análise não-linear geométrica e material de torres de transmissão*. Tese (Mestrado em Ciências de Engenharia) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro: 2001.

2000 (1)

T01-00 – VELOSO, R. L. S. *Contraventamentos simples e cruzado em estruturas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco: 2000.



1999 (1)

T01-99 – RODRIGUES, R. S. *Colapso de torres de transmissão de energia elétrica sob ação do vento*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro: 1999.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (4)

2005 (1)

A01-05 – NICOLAZZI, L. S. *Desenvolvimento de Projeto e Protótipo de Torre de Emergência para linha de transmissão*. CENTRAIS ELETROSUL, FUNDAÇÃO DE ENSINO DE ENGENHARIA EM SANTA CATARINA-FEESC, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-UFSC: 2005.

2003 (2)

A01-03 – *Desenvolvimento experimental de protótipos de nova família otimizada de estruturas de transmissão de energia elétrica*: 2003. AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S.A., INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC.

A02-03 – SWINKA, V. F. *Desenvolvimento de dispositivo eletrônico para proteção contra corrosão das ferramentas da superestrutura de torres de linhas de transmissão de energia elétrica*. COPEL TRANSMISSÃO S.A., INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2003.

2002 (1)

A01-02 – *Determinação de coeficiente de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão*: 2002. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., FUNDAÇÃO DE APOIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.

SNPTEE (15)

2009 (4)

S01-09 – TAVARES, G.; DART, F. C.; MENEZES, R. C. R.; SILVA, J. B. G. F.; RIGUEIRA, A. S.; FERREIRA, L. F. *Otimização de linha de transmissão Não Convencional de Alta Capacidade em 500 kV – Construção de Protótipo para Validação de Modelos, Estabelecimento de Práticas de Manutenção em Linha Viva e Realização de Ensaios de Campo*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

S02-09 – HATASHITA, L. S. H.; NELSON, J.; PEDROSO, C. D. V. *Uso de PLS-CADD e Tower em Projetos de linha de transmissão – Experiência e Metodologia da COPEL na análise de torres*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

S03-09 – JÚNIOR, J. K.; ALVA, G. M. S.; MIGUEL, L. F. F. *Comportamento de Torres Metálicas Trelaçadas de linha de transmissão Considerando a Flexibilidade das Ligações e a Interação Solo-Estrutura*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

S04-09 – SOARES, F. G.; SILVA, P. R. R. L.; MELLO, R. C.; FERREIRA, S. J. *Testes de Carga em Estruturas para linha de transmissão: a Experiência da Engetower Engenharia*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

2005 (2)

S01-05 – SOARES, F. G.; DA SILVA, P. R. R. L.; DE MELLO, R. C.; FERREIRA, S. J.; RIBAS, E. R.; DOS SANTOS, K. R.; NOLASCO, J. F. *LT Montes Claros 2 – Irapé 345 kV, Solução Estrutural com Torre Estaiada Monomastro Cara de Gato Aspectos Elétricos, Mecânicos e Econômicos*. XVIII SNPTEE, Curitiba/PR: 2005.

S02-05 – MACHADO, V. G.; JÚNIOR, C. M.; FERNANDES, J. H. M.; DE ARAÚJO, M. C.; TAKAI, M. N.; SOARES, F. G.; DA SILVA, P. R. R. L.; DE MELLO, R. C.; FERREIRA, S. J. *Desenvolvimento de Estrutura Estaiada Monomastro com Feixe Expandido para Aplicação na linha de transmissão 230 kV Cuiabá/Rondonópolis*. XVIII SNPTEE, Curitiba/PR: 2005.

2003 (8)

S01-03 – COELHO, H. C. *Nova LT – Um Novo Conceito de linha de transmissão*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

S02-03 – HOFFMANN, J. N.; DE SOUZA, R. L.; PROSDÓCIMO, N.; MOREIRA, I. DA SILVA; FILHO, V. S. *Linha de Transmissão Urbana Compacta Experimental em 230 kV*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

S03-03 – HOMRICH, C. A. R. *Estruturas Metálicas Compactas de 69 kV em Perímetro Urbano – Resultado da Aplicação de Materiais e Serviços em linha de transmissão na AES Sul*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

S04-03 – JR., MENEZES; A. A.; TAN, A. L.; FERNANDES, D. *Velocidades de Vento de Elevada Intensidade Ocorridas em Florianópolis e Passo Fundo – um Enfoque Estatístico Metodológico para Projetos de LT's*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

S05-03 – RUFFIER, A. P. F.; JOÃO, I. S.; ESTRELLA, JR.; FELIPPE, L.; LISBOA, E. F. A. *Uma Avaliação da Influência do Método de Cálculo da Carga de Vento para o Dimensionamento de Estruturas de linha de transmissão*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.



S06-03 – RODRIGUES, R. S.; BATTISTA, R. C.; PFEIL, M. S. *Colapso de Torres TEE Sob Ação do Vento – Proposta para Revisão de Normas e Procedimentos de Projeto*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

S07-03 – MACHADO, A. C.; SOUZA, A. M. L.; ROCHA, M. M. *Caracterização das Propriedades Aerodinâmicas de Torres Metálicas Treliçadas para Determinação da Resposta do Vento*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

S08-03 – HOFFMANN, J. N.; DE LIMA, H. E. F. *Custos de Estruturas Metálicas em Projetos de linha de transmissão, em Função do Cabo Condutor, Temperatura de Projeto e Perfil de Terreno*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

2001 (1)

S01-01 – GUIMARÃES, R. R. P.; DA SILVA, J. B. G. F.; MENEZES, L. O.; AMARO, R. C. P.; BORGES, P. S. P.; FERNANDES, J. H. M.; DE OLIVEIRA, J.; SALIBA, A.; TAKAI, M. N. *Estrutura Compacta tipo Cross-Rope para linha de transmissão em 500 kV*. XVI SNPTEE, Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (19)

2008 (3)

C01-08 – GHANNOUM, E. *Assessment of the impacts of the increasing structural reliability and security by designing lines for longitudinal broken conductor and unbalanced icing loads*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C02-08 – CLOET, E.; RISSE, B.; ROGIER, J. *Increasing the availability of the overhead transmission lines in the Belgian Grid*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C03-08 – VYAS, A.K.; ANISH, A.; KRISHNAKUMAR, M.; NAYAK, R.N. *Design and implementation experiences of improving reliability of existing 400kV transmission lines against narrow front wind*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2006 (4)

C01-06 – SILVA, A. O.; MEDEIROS, J. C. P.; SOUZA, A. M. L.; ROCHA, M. M.; RIPPEL, L. I.; CARPEGGIANI, E. A.; NÚÑEZ, G. J. Z. *Wind loads on metallic latticed transmission line towers*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C02-06 – LE DU, M.; PAREY, S.; LAURENT, C.; HUGUET, F. *Assessment of efforts due to extreme winds on overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C03-06 – VINCENT, P.; CHARBONNEAU, M.; BANVILLE, D.; GUILBAULT, P. *Overhead transmission lines evaluation of post-elastic behavior of line components*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C04-06 – CLARK, M.; RICHARDS, D. J.; CLUTTERBUCK, D. *Measured dynamic performance of electricity transmission towers following controlled broken-wire events*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

2004 (4)

C01-04 – OEBRO, H.; BYSTRUP, E.; KROGH, K.; FODER, M. H. *New type of tower overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C02-04 – HEGGI, N. A.; EL-ARAB, S. E., YAZIED, T. A. *An economic strengthening of overhead lattice towers to resist storms and seismic loads*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C03-04 – VICENT, P.; HUET, C; CHARBONNEAU, M.; GUILBAULT, P.; LAPOINTE, M.; BANVILLE, D. *Testing and numerical simulation of overhead transmission line dynamics under component failure conditions*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C04-04 – LUGSCHITZ, H.; ERNST, A.; GROS, T. *Corrosion protection of steel towers and camouflage of lines using the duplex-system*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

2002 (3)

C01-02 – LETOURNEAU, H.; VALLÉE, A.; LEMIEUX, N. *Development of an approach in Extra-High-Voltage tower design to decrease environmental impacts*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C02-02 – LETSCHER, P; HABERSTICH, P; DALLE, B. *Strengthening RTE overhead transmission lines following the storms of December 1999*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C03-02 – VILLA, P; BERTAZZI, A.; LEVA, M. *Compact transmission line with inverted delta configuration*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

2000 (1)

C01-00 – ALBERMANI, F. G. A.; KITIPORNCHAI, S. *Assessment and Upgrading of transmission towers*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

1998 (4)

C01-98 – MURASAWA, Y. H. H. O. I.; TAKAHASHI, H. K. T. *A study on generation condition and mechanism of transmission tower wind*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.



C02-98 – YAFANG, L.; YICHAO, Y.; HUIREN, W.; XUEHAI, G.; KAI-XIAN, Z.; CHUN, D.; DONGSHENG, G. *Study of 500kV compact transmission technology*. CIGRÉ 1998, Paris, França.

C03-98 – LOUDON, D.; HALSAN, K.; JONSSON, U.; KARLSSON, D.; STENSTROM, L.; LUNDQUIST, J. *A compact 420kV line utilizing line surge arresters for areas with low isokeraunic levels*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C04-98 – ALEXANDROV, G. N.; DIKOL, V. P.; KRYLOV, S. V.; NIKITIN, O.A.; TIMASHOVA, L. V. *Overhead line designing in view of environmental constraints-Compact overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

INPI – Nenhuma patente selecionada.

IEEE (2)

2006 (1)

E01-06 – SARMENTO, M.; LACOURSIERE, B. *A state of art overview: Composite Utility Poles for distribution and transmission applications*. IEEE: 2006.

2003 (1)

E01-03 – TUKACHINSKY, A. L. *Combined lattice-tubular electric pole*. IEEE: 2003.

Outras Fontes

RIERA, J. D.; MENEZES, R. C. R.; SILVA, V. R.; DA SILVA, J. B. G. F. *Evaluation of the probability distribution of the strength of transmission line steel tower based on tower test results*. CIGRÉ, Paris, França: 1990.

SILVA, A. O.; OLIVEIRA, A. O.; BARROS, D. C.; CHAGAS, H. P.; MAGALHÃES, H. A.; SANTOS, O. P.; SILVA, J. B. G. F.; GUIMARÃES, R. P. *Reliability and upgrading studies of the 765 kV Itaipu transmission system*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

Electra Articles:

An Experiment to measure the Variation in Lattice Tower Strength due to local design Practice (Electra nr. 138, October 1991).

Variability of the Mechanical Properties of Materials for Transmission Line Steel Towers, (Electra nr.189, April 2000).

Diaphragms in Lattice Steel Towers (Electra nr. 199, December 2001).

Assessment of Existing Overhead Line Supports (Electra nr. 207, April 2003).

Statistical Analysis of Structural Data of Transmission Line Steel Towers (Electra nr. 208, June 2003).

On the Failure Load of Transmission Line Steel Towers Considering Design Techniques and Material Properties, CIGRÉ SCB2 WEB Site, September. 2005.

CIGRÉ WG 08 Publications:

TF 3.2 - *Comparison of general industry practices for lattice tower design and detailing* (Electra 244 – June 2009; TB 384).

TF 4 - *Influence of the hyperstatic modeling* (Electra 245 – August 2009; TB 378).

Joint TF B2-07 & B2-08 - *Investigation on the structural interaction between transmission line towers and foundations* (Electra 246 – October 2009; TB 395).

TF 6 - *Large overhead line crossings* (Electra 246 – October 2009; TB 396).

TF 5 - *Improvement on the Tower Testing Methodology* (Electra 247 – December 2009; TB 399).

CIGRÉ Brochures:

Diaphragms in Lattice Steel Towers, nr.196.

Assessment of Existing OHL Supports, nr. 230.



CAPÍTULO 8

Condutores de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin



PREFÁCIO

Sidney Ueda

Existem dois segmentos mais relevantes e distintos na aplicação e instalação de condutores: um para as longas linhas de transmissão para conectar as hidrelétricas aos centros de consumo, geralmente bem distantes aqui no Brasil, e outro, para a recapacitação das linhas existentes.

As longas linhas de transmissão em corrente alternada são regidas por sua potência natural, onde há o equilíbrio entre os reativos gerados e consumidos. Seguindo as regulamentações do setor elétrico e a consequente competitividade em leilões, as linhas de transmissão têm incorporado algumas implantações de novas tecnologias no país em condutores. Podemos citar, como exemplo, os CAL - Cabo de Al liga 6201 (liga de Al + Mg + Si) e ACAR – Cabo de Al com alma de Al liga. A utilização do CA – Cabo de Al, sem alma de aço, prevista na LT Madeira em corrente contínua é outra novidade significativa em termos de projeto.

No segmento da recapacitação de linhas de transmissão, o aumento da demanda de energia elétrica aliado às dificuldades para a obtenção, principalmente de licenças ambientais, têm direcionado muitas concessionárias de energia a reconduzirem as linhas existentes. Aproveita-se toda a estrutura existente, como as torres e a faixa de passagem, e faz-se a troca, substituindo os condutores existentes por outros de maior capacidade de transmissão. Nestes projetos, novos condutores têm surgido no mercado, invariavelmente com operação em temperaturas mais elevadas que o convencional, como os termorresistentes a 150°C e 210°C, com capacidade de transmissão 50% e 100% maiores, respectivamente.

O Al termorresistente é uma liga com o Zircônio (Zr), que não perde as



características mecânicas mesmo quando submetidos continuamente às temperaturas elevadas, como as citadas. O Al convencional inicia o processo de recozimento a exatos 93°C, com perdas das propriedades mecânicas.

A operação em temperaturas elevadas traz outras duas questões inerentes para a discussão da viabilidade: o aumento das perdas por efeito Joule ($P=RI^2$) e o aumento das flechas.

As perdas, tanto técnicas e não técnicas, tornaram-se questões fundamentais e relevantes para as concessionárias e também para o setor elétrico. Entretanto, a utilização dos condutores de alta capacidade e operação em temperaturas elevadas é justificável pelo fato de atender, predominantemente, às situações de emergência, como em horários de pico, uma linha da mesma rede ou malha desligada ou por manutenção ou acidentalmente, sem interromper o fornecimento da energia elétrica. No cômputo geral, as perdas tornam-se irrelevantes e totalmente justificáveis.

As flechas dos condutores em uma linha de transmissão não podem e não devem ultrapassar os limites estabelecidos nos projetos e, considerando-se que as estruturas são as que já existiam, a solução foi a substituição do núcleo mecânico, a alma de aço no caso dos CAA – Cabo de Al com Alma de Aço, por outro de menor coeficiente de expansão térmica, para viabilizar a operação em temperaturas elevadas como, por exemplo, a 150°C e 210°C.

Surgiram mais recentemente no mercado novos materiais como alma mecânica, o Invar (liga de Aço-Ni) e os compósitos, como fibras de óxido de Al e fibras de carbono, possibilitando a operação segura, mesmo em temperaturas elevadas, sem violar a altura de segurança.

Podemos citar também o condutor compacto que, comparado ao convencional redondo normal de mesmo diâmetro, possibilita uma maior densidade do material condutivo, representando um aumento médio na capacidade de transmissão na ordem de 15%.

A sua utilização em uma linha de transmissão, em um mesmo projeto com as mesmas estruturas, reduziria na mesma proporção as perdas elétricas.

Cada projeto de uma linha de transmissão é específico e para cada um deles a otimização correta ou uma inovação, com uma correta parametrização e escolha dos condutores, pode trazer um impacto significativo nos custos como um todo. Portanto, é imperativo que se façam as análises detalhadas e os estudos específicos com as novas possibilidades e novos condutores.

O projeto INOVALT poderá contribuir significativamente para todos do setor elétrico brasileiro com os projetos de P&D, sinalizando com os resultados a melhor opção técnico-financeira das soluções inovadoras.

Condutores de Linhas de Transmissão

Sergio de Oliveira Frontin

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Condutores de Linhas de Transmissão*.

Palavras-chave

Linha de transmissão de energia elétrica, ensaio de tração do cabo condutor, ensaio de dureza do cabo condutor, metalografia de cabo condutor, fluência em cabos, ensaios mecânicos, tratamento criogênico profundo, limite de resistência mecânica à tração, limite de resistência mecânica à fadiga, vibração eólica, elasticidade, fadiga, vibração, abrasão, ampacidade, retracionamento, cabo condutor, condutores especiais, condutor em compósito ACCR, condutor de alta temperatura, condutor de alta capacidade, cabo de alumínio nu, condutores em compósito para alta temperatura e capacidade, liga de alumínio 6201, cabo invar, cabos termorresistentes, condutor compacto, cabo condutor de alumínio com alma de aço, cabo resistente ao calor, feixe expandido, EDS, coeficiente de dilatação térmica, comportamento térmico, método de Morgan, amortecedores de vibração, ferragens, liga de alumínio, corrosão, degradação de materiais poliméricos, envelhecimento acelerado, envelhecimento natural, vida útil de cabo condutor, efeito corona, gradiente elétrico superficial, trilhamento, campo elétrico, descargas atmosféricas, comportamento elétrico e mecânico de condutores, redução de perdas, linha de potência natural elevada, modelagem de feixe de cabos, cabo para-raios, cabos com fibras ópticas, cabo OPGW, cabo óptico ADSS.



Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas 11 teses de mestrado, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2006	2005	2003	2002	1999
2	1	2	1	3	2

UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal de Minas Gerais (3).
- Universidade Federal do Pará (2).
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2).
- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1).
- Universidade de Brasília (1).
- Universidade Federal de São Carlos (1).
- Universidade Federal de Santa Catarina (1).

Total de 7 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia Mecânica (6).
- Engenharia Civil (2).
- Estruturas e Construção Civil (1).
- Ciência e Engenharia dos Materiais (1).
- Engenharia Elétrica (1).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados seis programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
-	1	-	1	1	2	1	-	-	-

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2001	–
2002	560.000,00
2003	1.300.000,00
2004	236.000,00
2005	780.000,00
2006	–
2007	187.000,00
2008	–
TOTAL	3.063.000,00

EMPRESAS PROPONENTES: ⁽²⁾

- Expansion Transmissão de Energia Elétrica S.A. – Expansion (1).
- Elétricas do Norte do Brasil S.A. – ELETRONORTE (1).
- Furnas Centrais Elétricas S.A. – FURNAS (1).
- Copel Transmissão S.A. – COPEL (1).
- Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF (1).
- Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia – COELBA (1).

Total de 6 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽²⁾

- Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico – CDT/UnB (1).
- Universidade Federal do Pará (1).
- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (1).
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (1).
- Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD (1).

Total de 5 entidades.

SNPTEE

Foram analisados 25 informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.



ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO – ANOS ÍMPARES:

2009	2005	2003	2001
8	4	5	8

EMPRESAS REPRESENTADAS:⁽³⁾

- Cemig Distribuição S.A (7).
- Universidade Federal de Minas Gerais (5).
- Furnas Centrais Elétricas S.A. (4).
- Nexans Brasil (3).
- Furukawa (3).
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (3).
- 3M do Brasil (2).
- CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (2).
- LACTEC (2).
- HOT LINE (2).
- ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (2).
- Eletronet (2).
- CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (1).
- COPEL Transmissão S.A. (1).
- Universidade de São Paulo (1).
- CPFL Energia (1).
- NSA Cons. e Inf. Ltda. (1).
- GTESA/PATESA (1).
- Eletropaulo (1).
- UNESP – Universidade Estadual Paulista (1).
- TACTA (1).
- Norton (1).
- Pirelli Cabos S.A. (1).
- ENGETOWER – Engenharia e Consultoria Ltda. (1).
- A. Rigueira Consultoria (1).
- UFF – Universidade Federal Fluminense (1).
- Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S.A. – ENERSUL (1).
- FMR Consultoria e Assessoria em Engenharia Ltda. (1).
- Fluxo Engenharia Ltda. (1).

Total de 29 empresas.

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.

CIGRÉ

Foram analisados 12 trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	1998
1	1	6	1	3

PAÍSES REPRESENTADOS: ⁽⁴⁾

- Japão (3).
- Finlândia (2).
- Bélgica (2).
- Brasil (2).
- Canadá (1).
- França (1).
- Estados Unidos (1).
- Eslováquia (1).
- Eslovênia (1).
- Coreia (1).

Total de 10 países.

INPI – Nenhuma patente selecionada.

IEEE

Foram analisados oito trabalhos apresentados durante os vários eventos patrocinados pelo IEEE em âmbito mundial.

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2009	2008	2006	2000
1	2	4	1

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.



PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Espanha (3).
- Canadá (2).
- Estados Unidos (1).
- Brasil (1).
- Coreia (1).

Total de 5 países.

Temas para Futuros Desenvolvimentos

As teses de mestrado e doutorado examinadas abordam principalmente os seguintes assuntos: identificação de parâmetros materiais e estruturais dos cabos no domínio da frequência, objetivando a aplicação nos estudos de amortecimento estrutural e rigidez equivalente; análise da vida útil de cabos; modelos para previsão da temperatura; estudos de vibração eólica; ensaios mecânicos a fadiga de cabos condutores; estudo da instabilidade de feixes de condutores.

Nos programas de P&D apresentados à ANEEL, pode-se citar: estudo de técnicas para viabilizar o desenvolvimento de dispositivo visando à identificação de pontos de corrosão interna em cabos condutores; novos processos para execução de emendas em cabos condutores com a utilização de luvas de aço e alumínio; estudo dos efeitos do tratamento criogênico em alumínio e suas ligas, muito utilizado na fabricação dos cabos, grampos de suspensão, armaduras protetoras dentre outros componentes; caracterizar o comportamento dos cabos com alma compósita (ACCC) e com cabos com alma da própria liga, verificando a possibilidade de desenvolver um cabo com tecnologia nacional e com desempenho equivalente ao cabo ACCC; estudar cabos ACSR e acessórios de linhas de transmissão sujeitos à vibração por meio de modelos lineares e não lineares.

No SNPTEE foram analisados informes técnicos que enfatizaram os seguintes assuntos:

Cabos OPGW, avaliação do desempenho a descarga atmosférica, efeitos elétricos decorrentes da substituição de cabos para-raios convencionais por cabos OPGW, estudos comparativos das diversas alternativas para a implantação de cabos OPGW, instalação de cabos OPGW em linha energizada e experiências de instalação.

Validação de ensaios realizados em máquina de tração vertical, ensaios mecânicos e análise química e metalografia para avaliação da vida útil de cabos condutores, vibração eólica, ensaio de fluência e determinação do coeficiente de dilatação térmica.

Cabos especiais, cabos de alumínio liga 6210, condutores termorresistentes, cabos compactos, cabos com configuração de feixe super expandido e condutores com núcleo composto metalo-cerâmico.

Nas sessões bienais do CIGRÉ, foram apresentados trabalhos relacionados a: cabos OPGW (desempenho a descargas atmosféricas e diagnóstico de falhas), método de estimação e diagnóstico de corrosão interna de cabos ACSR, desenvolvimento de tecnologia para estimar a vida útil remanescente de cabos queimados devido a queimadas na faixa de passagem, estudos de aplicações de cabos especiais (teste de campo para cabos ACCR), cabos de feixe expandido para aumentar o SIL da linha, condutores compactos, condutores que apresentem melhor comportamento aerodinâmico durante ventos intensos (*low drag conductors*), cabos de alumínio reforçado de fibra de carbono.

Nos eventos internacionais promovidos pelo IEEE, foram selecionados trabalhos referentes a experiências com cabos OPGW, corrosão em condutores, vibração eólica etc.

Com base nesta bibliografia, procurou-se identificar quais os itens que carecem de maior aprofundamento em termos de estudos e/ou pesquisas complementares, de forma que se possa obter um maior retorno em termos de aumento da confiabilidade das linhas de transmissão, aumento dos níveis de carregamento, redução dos custos de implantação e redução dos impactos ambientais.

Os assuntos identificados no tema condutores de linhas de transmissão foram os seguintes:

- Desempenho de cabos OPGW frente a descargas atmosféricas.
- Análise dos efeitos elétricos decorrentes da substituição dos cabos para-raios convencionais considerando as diversas alternativas de aterramento por cabos OPGW.
- Estabelecimento de métodos e modelos para a determinação da vida útil remanescente de cabos condutores, submetidos a diferentes efeitos, elétricos, mecânicos e ambientais.
- Estudo e ensaios de fadiga de condutores.
- Estabelecimento de vida útil de cabos condutores queimados por ocorrência de queimadas ao longo da faixa de passagem.
- Estabelecimento de critérios e metodologias para análise técnica econômica com vistas à aplicação de condutores especiais.



Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL www.aneel.gov.br.

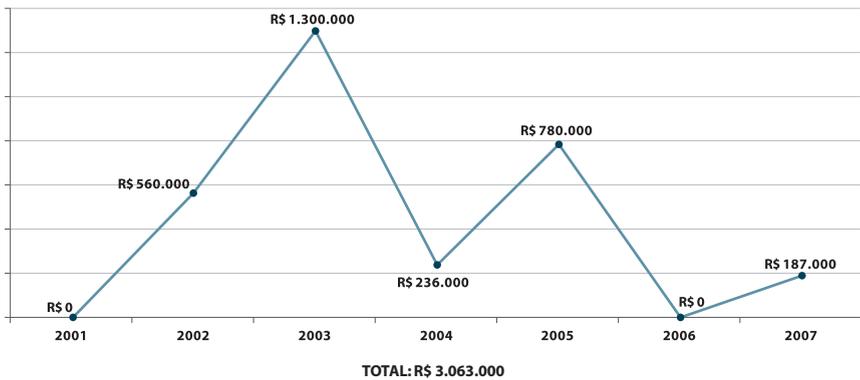
O valor total aplicado nos anos de 2002 a 2008 foi de R\$ 3.063.000,00 o que corresponde a 5,24% do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão em geral.

O ano de 2003 foi o de maior aplicação com R\$ 1.300.000,00.

O gráfico abaixo apresenta os investimentos por ano.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – CONDUTORES

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema em pauta, foram selecionados 62 informes técnicos. A fonte SNPTEE forneceu o maior número com 25 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2009 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de nove.

NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – CONDUTORES

Fonte	1998	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPES	2	–	–	3	1	–	2	1	–	2	–	11
ANEEL	–	–	–	1	2	1	–	–	1	1	–	6
SNPTEE	–	–	8	–	5	–	4	–	–	–	8	25
CIGRÉ	3	–	–	1	–	6	–	1	–	1	–	12
INPI	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
IEEE	–	1	–	–	–	–	–	4	–	2	1	8
Total por ano	5	1	8	5	8	7	6	6	1	6	9	
TOTAL DE INFORMES: 62												

Referências

CAPES - Teses de Universidades (11)

2008 (2)

T01-08 – BRAGA, G. E. *Influência do módulo de elasticidade na mudança de estado de cabos suspensos em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2008.

T02-08 – SANTOS, A. S. *Estudos de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Pará: 2008.

2006 (1)

T01-06 – HENRIQUES, A. M. D. *Bancadas de ensaios mecânicos à fadiga de cabos de condutores de energia*. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Distrito Federal: 2006.

2005 (2)

T01-05 – CAPPELARI, T. T. O. *Determinação da resposta dinâmica de feixes de condutores em linhas aéreas de transmissão*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul: 2005.

T02-05 – LAVANDOSCKI, R. *Estudos das propriedades mecânicas de cabos condutores elétricos do tipo CAA usados e sua adequação ao retracionamento*. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo: 2005.



2003 (1)

JÚNIOR, G. Y. R. A. *Formação de um elemento finito pelo método das forças para análise dinâmica não linear geométrica de estruturas aporticadas*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Pará: 2003.

2002 (3)

T01-02 – OLIVEIRA, T. T. *Estudo da instabilidade de feixes de condutores em linhas aéreas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul: 2002.

T02-02 – DOMINGUES, L. A. M. *Modelo para previsão da temperatura de condutores de linhas aéreas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2002.

T03-02 – FONSECA, B. Q. A. *Análise de vida útil de cabos condutores*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2002.

1999 (2)

T01-99 – NETO, J. M. S. *Identificação de parâmetros materiais e estruturais no domínio da frequência*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina: 1999.

T02-99 – NASCIMENTO, C. A. M. *Metodologia experimental para utilização de cabos termoresistentes-TAL em linhas e redes de distribuição*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 1999.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (6)

2007 (1)

A01-07 – *Impacto do tratamento criogênico profundo nas propriedades físicas e mecânicas de ligas de alumínio de uso em linhas de transmissão e subestações*. EXPANSION TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA S.A. – CENTRO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – CDT/Universidade de Brasília, Distrito Federal: 2007.

2005 (1)

A01-05 – *Caracterização do comportamento estático e dinâmico de cabos condutores de liga de alumínio obtidos por novas tecnologias*. Universidade Federal do Pará, Pará: 2005.

2004 (1)

A01-04 – ISMAIL, K. A. R. *Emendas de cabos condutores em linhas de transmissão*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – FURNAS: 2004.

2003 (2)

A01-03 – JÚNIOR, O. H. S. *Estudo de desempenho de cabos ACSR e acessórios de linhas de transmissão sujeitos a vibrações através de modelos lineares e não-lineares*. CENTRAIS COPEL TRANSMISSÃO S.A. – COPEL – TRANS – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2003.

A02-03 – SEBRÃO, M. Z. *Desenvolvimento de técnica para identificação de pontos de corrosão interna em cabos condutores de linhas de transmissão*. CENTRAIS COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO – CHESF – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL: 2003.

2002 (1)

A01-02 – ANGELINI, J. M. G. *Sensor para verificação de degradação em isoladores poliméricos de linhas de transmissão*. COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA – COELBA – CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES – CPQD: 2002.

SNPTEE (25)

2009 (8)

S01-09 – FONSECAL, B. Q. A.; CIMINI, C. A.; BRACARENSE, A. Q.; PEREIRA, F. L. *Validação de ensaios de cabos condutores de energia elétrica realizados em máquina de tração vertical*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S02-09 – NASCIMENTO, C. A. M.; GUIMARÃES, M. F.; MOTTA, I. L. M.; FILHO, E. B. G. *A experiência da Cemig no uso de condutores especiais nas fases de viabilidade, projeto e construção de linhas aéreas de transmissão*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S03-09 – DOMINGUITE, M. C. C.; JUNQUEIRA, A.; OLIVEIRA, L. C. *Aplicação de cabo compósito em recapacitação de linhas de transmissão – estudo de caso*. XX SNPTEE. Recife/ PE: 2009.

S04-09 – FONSECAL, B. Q. A.; CIMINI, C. A.; BRACARENSE, A. Q.; PEREIRA, F. L. *Avaliação da vida útil de cabos condutores através da comparação dos resultados da análise química, metalografia e ensaios mecânicos realizados*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.



S05-09 – SOUZA, O. H.; MANNALA, M. J. *Nova metodologia para ensaio de fluência em cabos condutores com tempo reduzido e confiabilidade de resultados*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S06-09 – SILVA, A. O.; FILHO, H. A. M.; TAVARES, G. M.; SANTIAGO, N. H. C.; NOEL, R. G.; RIGUEIRA, A. S. *Estudo técnico-econômico para aumento da carga de tração dos cabos condutores de linhas de transmissão*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S07-09 – MANNALA, M. J.; SOUZA, O. H. *Metodologia de ensaio para determinação do coeficiente de dilatação térmica de cabos condutores para linhas de transmissão*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S08-09 – DOMINGUIE, M. C. C.; MIRANDA, S. A. N.; FONSECA, F. M. *Uso de uma nova tecnologia para aumento de capacidade de linha de 88 kV da CPFL*. XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

2005 (4)

S01-05 – JUNIOR, A. E. B.; SILVA, A. L. G.; LAURIA, G. M.; LOURENÇONI, M. L. B. *Utilização de cabos de alumínio liga 6201 em linhas de transmissão 230 kV – casos práticos*. XVIII SNPTEE 2005. Curitiba/PR: 2005.

S02-05 – DOMINGUES, I. T.; LOPES, J. C. R.; MENDES, L. M. R.; CABRAL, S.; ROQUELANE, R.; UEDA, S.; ANAUATE, S. *Emprego de novas tecnologias de materiais em linhas de transmissão aérea com a substituição de condutores ACSR por condutores termorresistentes TACSR e TACIR*. XVIII SNPTEE. Curitiba/PR: 2005

S03-05 – FILHO, G. F. *Implementação de metodologia para cálculo de ampacidade para cabos termoresistentes*. XVIII SNPTEE. Curitiba/PR: 2005.

S04-05 – MIRANDA, G. C.; RODRIGUES, B. J. F.; FILHO, E. B. G.; NASCIMENTO, C. A. M.; BRAGA, G. E.; UEDA, S. M. *O estado da arte na aplicação de condutores compactos em projetos de linhas aéreas de transmissão – aspectos mecânicos e elétricos para o novo modelo desenvolvido no Brasil*. XVIII SNPTEE. Curitiba/PR: 2005.

2003 (5)

S01-03 – ALVIM, M. G.; VIANA, J. M. V.; CORREA, R. P.; COELHO, H.; BRENTAN, J. A.; RIBEIRO, E. E. *Cabo óptico auto-sustentado (ADSS) utilizado em linha de transmissão de extra alta tensão – experiência de Furnas*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

S02-03 – FILHO, E. B. G.; NASCIMENTO, C. A. M.; FILHO, O. C.; GUIMARÃES, G. E.; BRAGA, G. E.; PAULINO, J. O. S. P.; MIRANDA, G.

C.; BRACARENSE, A. Q.; UEDA, S. *Desenvolvimento de condutores compactos aplicados a projetos de linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica*. XVII SNPTEE 2003. Uberlândia/MG: 2003.

S03-03 – RÉGIS, O.; DOMINGUES, L. A. M. C. *LT 2 x 230 kV transformável para 1 x 500 kV Estudos elétricos para operação com configuração de feixe super expandido*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

S04-03 – FONSECA, B. Q. A.; CIMINI, C. A. *Análise de vida útil de cabos condutores de linhas aéreas de transmissão*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

S05-03 – FURTADO, T. A.; NASCIMENTO, C. A. M.; BRAGA, G. E.; FILHO, O. C. *Diagnóstico do estado da arte em vibração eólica de linhas aéreas de transmissão*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

2001 (8)

S01-01 – SALIBA, A.; OLIVEIRA, J.; FERNANDES, J. H. M.; TAKAI, M. N.; REGUEIRO, E. G.; SILVA, P. R. R. L.; MELLO, R. C.; LUCCAS, C. A.; JUNIOR, T. P. *Instalação de cabo OPGW em LT 500kV compacta energizada*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S02-01 – CAMPOS, A. L. S.; FUJIWARA, A. M.; MOREIRA, I. S.; MELLO, J. L. S. *Substituição do cabo pára-raios por OPGW em linhas de transmissão. A experiência da Copel*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S03-01 – GUIMARÃES, A. C.; PARDAUIL, N. B. *Estudo comparativo para implantação de cabos ópticos em linhas de transmissão em operação*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S04-01 – OLIVEIRA, C. F.; ESMERALDO, P. C.; FILHO, J. A.; SONDERMANN, M. A.; ALVIM, M. G.; RESENDE, F. M. *Efeitos da substituição de cabos pára-raios convencionais por cabos OPGW nas linhas de transmissão de Furnas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S05-01 – LOEWENTHAL, C. F. *Avaliação dos efeitos de descargas atmosféricas em cabos OPGW – normalização do método de ensaio*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S06-01 – ALVIM, M. G.; OLIVEIRA, C. M. F.; SILVA, A. O.; NIGRI, A. I.; CORREA, R. P.; VIANNA, J. M. V.; CHAGAS, H. P.; NIEDU, D. B. *Cabo OPGW – desempenho quanto a descargas atmosféricas critério de aceitação de Furnas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S07-01 – CARDOSO, P. A. M.; BOYNARD, A. C.; FILHO, J. A. P. *Melhoria nos índices de desempenho nas linhas de distribuição em 138 kV com o uso do cabo condutor termoresistente em substituição ao cabo CAA LINNET*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.



S08-01 – CAVALCANTI, S. J. G.; DART, F. C.; UEDA, S. M.; NETO, A. P.; JÚNIOR, O. R.; SOBRINHO, J. S. *Condutores nus em feixes para LT EAT/ UAT: Adequação e otimização integrada ao sistema, do projeto à operação, utilizando-se novas técnicas no atendimento aos processos licitatórios*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (12)

2008 (1)

C01-08 – FUJIMOTO, K.; NISHIDA, K.; WAKABAYASHI, N.; CHIBA, H.; WATABE, M.; OZAKI, T. *Development of estimation and diagnostic method of ACSR inner corrosion based on the corrosion mechanism study*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2006 (1)

C01-06 – DEVE, H. E.; CLARK, R.; STOVALL, J.; BARRET, S.; WHAPHAM, R.; QUESNEL, W. *Field testing of ACCR conductor*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

2004 (6)

C01-04 – ALVIM, M. G.; NIEDU, D. B.; SILVA, A. O.; LOEWENTHAL, C. F.; MOREIRA, B. S. L.; FALQUEIRO, C. *Improved performance of OPGW under lightning discharges in Brazilian regions with a high keraunic level*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C02-04 – ISHIHARA, H.; OKADA, H.; SHINODA, A.; NAGANO, K.; KUBOKAWA, H.; TERADA, S. *Development of “pre-stretch” type up-rating conductor to realize cost reductions*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C03-04 – LILIEN, J. L.; CAPELLE, T.; LE DU, M. *Limiting windstorm effects on tower by a “low drag” conductor*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C04-04 – JANG, T. I.; KANG, J. W.; LEE, D. I. *Development of assessment technology on the life-time of burned ACSR conductor*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C05-04 – LAGO, J.; DURIS, P.; KUCIK, P.; KINCES, F.; SMIDA, T.; VESELIC, M. *Diagnostics and removal of optical cables and insulators failures on overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C06-04 – LESKINEN, T.; LOVRENCIC, V. *Finnish and Slovene experience of covered conductor overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

2002 (1)

C01-02 – SATO F.; EBIKO, H. *Development of a slow sag aluminum conductor carbon fiber reinforced for transmission lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

1998 (3)

C01-98 – REGIS, O.; CAVALCANTI, S. J. G.; NETO, A. P.; DOMINGUES, L. A. M. C.; DART, F. C.; MAIA, M. J. A. *Expanded bundle technique: The application of HSIL TL concept to increase the capacity of overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C02-98 – COUNESON, P.; LAMSOUL, J.; DELPLANQUE, D., CAPELLE, TH.; HAVAUX, M.; GUERY, D.; DELREE, X. *Improving the performance of existing high-voltage overhead lines by using compact phase and ground conductors*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C03-98 – OJALA, Y.; LESKINEN, T.; LAHTINEN, M.; HINKKURI, A. *110 kV overhead transmission line with covered conductors*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

INPI (2)

2008 (1)

I01-08 – BAVASTRI, C. A.; LOPES, E. M. O.; ESPÍNDOLA, J. J.; KRÜGER, O. L.; TEIXEIRA, P. H. *Neutralizador dinâmico viscoelástico de vibrações para cabos singelos de linhas aéreas*. Publicação 13 de outubro de 2009.

2004 (1)

I01-04 – GONÇALVES, R. *Aperfeiçoamento construtivo introduzido em suporte polimérico para sistema de transmissão de energia, aplicado a linhas compacta e alta tensão*. Publicação 25 de abril de 2006.

IEEE (8)

2009 (1)

E01-09 – YANG, Y.; HARLEY, R. G.; DIVAN, D.; HABETLER, G. T. *Overhead conductor thermal dynamics identification by using echo state networks*. IEEE: 2009.



2008 (2)

E01-08 – DANG, C.; PÉLISSOU, S.; ST-ANTOINE, S.; SAVAGE, R.; CÔTÉ, J. *Compression connector performance on oxidized aluminum cable conductors*. IEEE: 2008.

E02-08 – LEE, D.; SHIN, K.; LEE, S. *Technique to decrease the electric field intensity on conductor surface using the Asymmetrical-sized conductor bundle*. IEEE: 2008.

2006 (4)

E01-06 – AGUIAR, A. M.; PÉREZ, M. J. S. *Experience in OPGW cables selection for overhead transmission live lines*. IEEE: 2006.

E02-06 – LINARES, L.; TABORDA, N.; ZAMBRANO, L.; PÉREZ, O. *Failures analysis by corrosion in power conductors of aluminum alloys in coastal-lacustrian environments*. IEEE: 2006.

E03-06 – PARDIÑAS, J. A.; BALBÁS, J. A.; VILLAMIZAR, M. J.; BRICEÑO, M. R.; BOQUETE, R. *Methods for “live line” OPGW cables stringing at voltage levels of 400kV and 765kV*. IEEE: 2006.

E04-06 – NISHIMURA, F.; CICARELLI, L. D.; ARELLANO, R. R.; SOARES, M. R. *OPGW Installation in energized transmission line*. IEEE: 2006.

2000 (1)

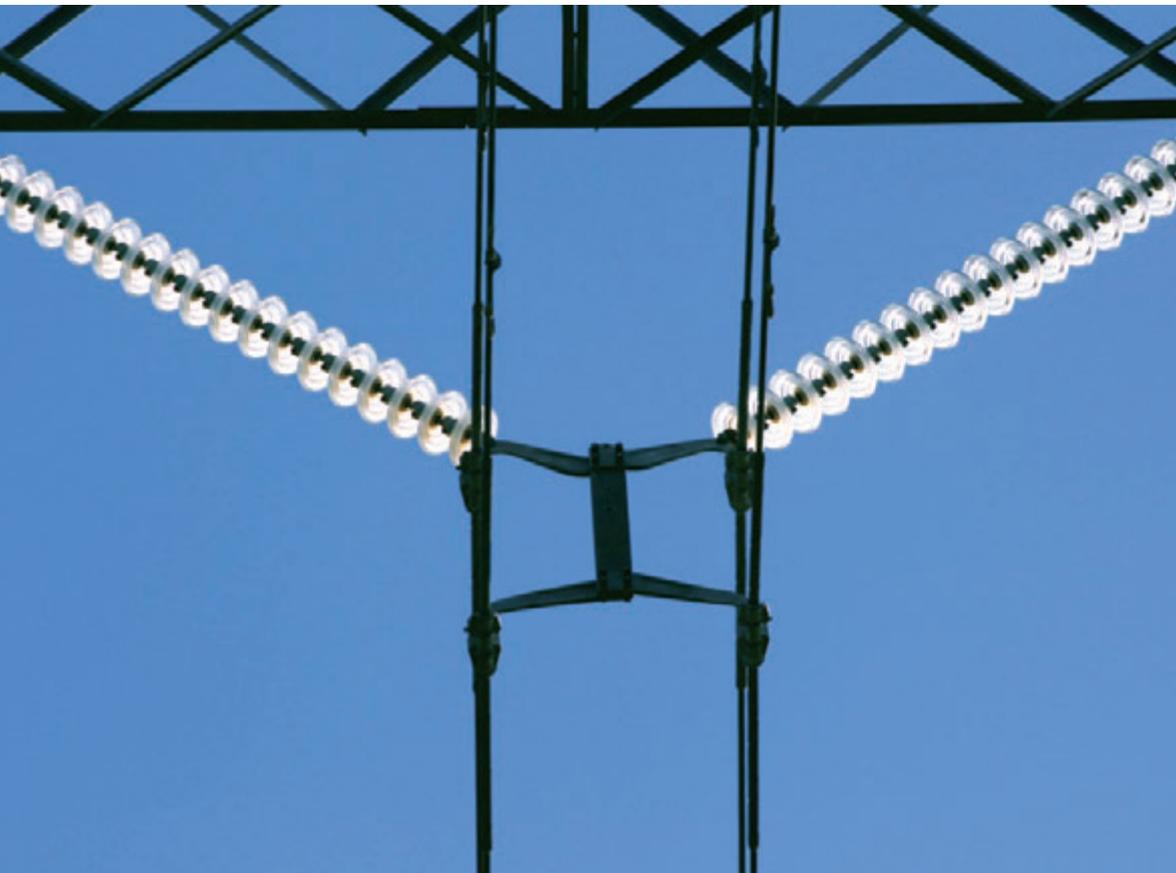
E01-00 – LEBLOND, A.; HARDY, C. *Assessment of safe design tension with regard to aeolian vibrations of single overhead conductors*. IEEE: 2000.



CAPÍTULO 9

Isoladores de Linhas de Transmissão

Leonardo Brant Murça



PREFÁCIO

Ricardo Wesley Salles Garcia

Embora o valor percentual que define a participação dos isoladores no custo total de implantação de uma linha de transmissão seja relativamente pequeno, quando se contabilizam os custos da operação e manutenção, em todas as suas vertentes, a participação destes componentes tem uma parcela mais significativa.

Muitas ações têm sido desenvolvidas por parte de fornecedores de matérias-primas, fabricantes, concessionárias, universidades e centros de pesquisa visando a uma maior confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica.

Desde os primeiros isoladores de madeira com corda, utilizados nos primórdios da distribuição de energia elétrica, até os atuais estudos de aplicação de nanotecnologia para implementação de diversas características dos materiais que são aplicados em isoladores poliméricos e que já isolam eletricamente linhas de transmissão de 1000 kV ou mais, a inovação tecnológica tem sido buscada com afinco e determinação, acompanhando o crescimento e o progresso da humanidade.

A aplicação de materiais reconhecidamente isolantes, como vidro e porcelana, aliada a projetos desenvolvidos para também garantir a rigidez mecânica do conjunto para sustentação dos cabos condutores, está amplamente dominada e seu uso passa pela adequação dos diferentes isoladores aos projetos das linhas, considerando especialmente as condições ambientais presentes.

O crescente interesse pelos isoladores ditos não cerâmicos, ou poliméricos, representa um significativo impulso tecnológico na aplicação de materiais com muitas outras características além das já citadas e igualmente



primordiais na sua função. Contudo, certos aspectos ainda não dominados como tempo de vida útil e aqueles relacionados ao descarte e à reciclagem indicam que a aplicabilidade no emprego destes dispositivos ainda carece de estudos e pesquisas.

Desta forma, este capítulo traz um foco importante para apresentar o que tem sido estudado no mundo e como o Brasil se encontra colocado neste cenário, permitindo que todos os setores envolvidos identifiquem perspectivas e expectativas na fundamentação adequada para o domínio de toda a técnica disponível e gerenciem a correta aplicação de recursos técnicos, humanos e financeiros para que a adequação de instalações de testes, a elaboração de normas técnicas e o desenvolvimento de produtos com alto valor tecnológico agregado sejam prioritários.

Isoladores de Linhas de Transmissão

Leonardo Brant Murça

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Isoladores de Linhas de Transmissão*.

Palavras-chave

Linhas de transmissão, vandalismo, robôs de inspeção, diagnóstico, monitoramento, cerâmica, vidro, argamassa estrutural, policarbonato, compósitos de silicone, polímeros, isolamento, isoladores, isoladores elétricos, isoladores poliméricos, isoladores cerâmicos, isoladores compósitos, isoladores de vidro, espectroscopia, radiografia digital, nanoindentação, nanotecnologia, temperatura térmica, temperatura química, trilhamento de núcleo, gizamento, transdutores de fibra óptica, *flashover*, fuga de corrente.

Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas 10 teses, sendo uma tese de doutorado, oito teses de mestrado e uma profissionalizante, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
2	3	1	2	-	1	-	-	-	1



UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal de Pernambuco (4).
- Universidade Federal de Campina Grande (2).
- Universidade Federal do Paraná (1).
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (1).
- Universidade Federal de Sergipe (1).
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1).

Total de 6 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia de Materiais (2).
- Engenharia Mecânica (2).
- Engenharia Nuclear (1).
- Física da Matéria Condensada (1).
- Física de Plasma e Descargas Elétricas (1).
- Materiais Dielétricos e Propriedades Dielétricas (1).
- Processos Industriais de Engenharia Química (1).
- Sistemas Elétricos de Potência (1).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados três programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
-	-	-	-	2	-	1	-	-	-

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)	Ano Início	Investimento (R\$)
2001	-	2005	-
2002	703.989,00	2006	-
2003	-	2007	-
2004	490.584,00	2008	-
TOTAL	1.194.573,00	TOTAL	-

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.

EMPRESAS PROPONENTES: ⁽²⁾

- Cachoeira Paulista Transmissora de Energia Ltda. – CPTE (1).
- Centrais Elétricas Santa Catarina S.A. - CELESC (1).
- FURNAS (1).

Total de 3 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽²⁾

- Fundação Fritz Müller – FFM (1).
- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (1).

Total de 2 entidades.

SNPTEE:

Foram analisados cinco informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO – ANOS ÍMPARES:

2003	2001
2	3

EMPRESAS REPRESENTADAS: ⁽³⁾

- CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2).
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais (1).
- COPEL Transmissão S.A. (1).
- COPEL/UFMG – Universidade Federal de Campina Grande (1).
- IMA/RJ (1).
- LACTEC (1).
- CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista S.A. (1).

Total de 7 empresas.

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.



CIGRÉ

Foram analisados nove trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	2000	1998
1	3	1	–	1	3

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Suíça (3).
- Alemanha (2).
- Itália (2).
- Arábia Saudita (1).
- Holanda (1).
- Japão (1).
- Jordânia (1).
- Polônia (1).
- Rússia (1).

Total de 9 países.

INPI

Foi identificado um registro de patente com o título de “Dispositivo Intitulado – Protetor Retangular de Isoladores – Em Torres de Transmissão” registrado no ano de 2006.

ANO DE REGISTRO DA PATENTE:

2006
1

IEEE

Foram analisados 27 informes técnicos apresentados em diversas conferências e encontros promovidos pelo IEEE ao longo dos últimos nove anos, de acordo com os seguintes indicadores:

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2009	2008	2007	2006	2003	2000
6	8	7	2	1	3

PAÍSES REPRESENTADOS: ⁽¹⁾

- Estados Unidos (4).
- China (4).
- Reino Unido (3).
- Coreia do Sul (2).
- Brasil (2).
- Japão (2).
- Canadá (1).
- Colômbia (1).
- Índia (1).
- Itália (1).
- México (1).
- Turquia (1).
- Venezuela (1).
- Vietnã (1).

Total de 14 países.

Temas para Futuros Desenvolvimentos

Observa-se nas pesquisas uma evolução do desenvolvimento de novos materiais no ramo de isoladores poliméricos/compósitos. Um novo termo que começa a ser recorrente é o da nanotecnologia. Existe uma grande procura por novas combinações de materiais que superem os atuais requisitos de projeto no ramo de isoladores, visto que há uma tendência de expansão e recapacitação de linhas de transmissão para tensões mais elevadas.

Outro ponto sensível é a análise benefício-custo quanto aos tipos de isoladores a serem escolhidos. Alguns trabalhos analisados preocupam-se com o custo inicial/manutenção de isoladores compósitos e poliméricos quando comparados aos de porcelana. Além disso, as pesquisas apontam uma atenção especial com relação ao envelhecimento/degradação dos novos isoladores, pois existe a necessidade de saber como materiais que estão sendo desenvolvidos atualmente vão se comportar no futuro. Tal preocupação mostrou-se embasada em linhas de transmissão mais antigas que começaram a apresentar falhas em seus componentes isoladores 20 a 30 anos depois de instalados, acarretando uma despesa de manutenção elevada para a substituição dos componentes danificados.

Um ponto consciencioso em relação a todas as pesquisas que tratam de identificação de falhas em isoladores é a necessidade de um método mais preciso de identificação de falhas no seu início. O barateamento dos custos de inspeção também é levado a uma discussão quanto ao melhor método a ser utilizado.



Um tema bastante abordado nos artigos pesquisados foi com relação à contaminação de isoladores tanto por poluição do ar, quanto por salinidade ou simplesmente devido ao efeito da umidade. Estudos das tensões disruptivas evidenciam isso. Pesquisas por melhores métodos de monitoramento do nível de poluição e contaminação dos isoladores estão em evidência.

As normas para determinação e previsão de *flashovers* causados devido à poluição/contaminação podem não ser tão eficientes na prevenção destes fenômenos. Com as constantes mudanças nas condições climáticas e de poluição ao redor do planeta, estudos que prevejam o grau de contaminação de isoladores precisam ser periodicamente revistos. Isto para garantir maior confiabilidade dos isoladores.

Pesquisas com relação a materiais de recobrimento de isoladores e análise de características hidrofóbicas foram alguns dos temas de pesquisa do CIGRÉ ao longo da última década. Os efeitos de *flashover* devido à contaminação, envelhecimento/degradação, sistemas de monitoramento de falhas baseados em fugas de corrente e medição de campo elétrico abrangem cerca de 95% dos trabalhos selecionados do IEEE nos últimos três anos sobre o tema isoladores. Destes últimos temas, o estudo e medição de campos elétricos têm recebido uma atenção especial do IEEE, sendo em 2008 designada uma força tarefa para investigação de campos elétricos em isoladores compósitos.

O vandalismo foi apontado em vários estudos como uma grande causa de falhas, sendo inclusive fruto de teses de mestrado e doutorado da CAPES no sentido da pesquisa de materiais poliméricos com blindagem balística para proteção contra vandalismo.

As pesquisas na área de materiais dominam os temas da CAPES de mestrado e doutorado. A maior parte dos recursos de P&D da ANEEL aponta para pesquisa de materiais isolantes e monitoração de contaminação. Isso mostra certa divergência no tocante às pesquisas internacionais que apontam na direção das investigações dos fenômenos de natureza elétrica.

Um tema pouco abordado foi em torno do impacto térmico de queimadas florestais em isoladores. Ressalta-se esta importância por causa da grande extensão territorial de matas e florestas brasileiras que estão próximas às linhas de transmissão e que são susceptíveis a queimadas.

Os assuntos identificados no tema isoladores de linhas de transmissão foram os seguintes:

- Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de isoladores submetidos a um determinado regime térmico.

- Pesquisas de novos materiais no ramo da nanotecnologia visando melhorar características isolantes e hidrofóbicas dos materiais.
- Desenvolvimento de novas metodologias para estimar a vida de isoladores submetidos a atmosferas mais poluídas.
- Novos sistemas de monitoramento de contaminação de isoladores.
- Inovações em geometrias dos isoladores.
- Pesquisas mais consistentes com criação de um banco de dados mais abrangente de padrões do comportamento de isoladores degradados. Ênfase para isoladores poliméricos e compósitos.
- Melhorias nos sistemas de diagnósticos de falhas em isoladores. Necessidade de sistemas que identifiquem falhas no início.
- Estudos da fadiga mecânica dos isoladores.
- Metodologias mais apuradas para designar relação benefício *versus* custo, entre isoladores poliméricos, compósitos e de porcelana, levando em conta variáveis como meio ambiente, manutenção, reposição, durabilidade e nível de tensão da linha.
- Pesquisas na área de blindagem de isoladores visando evitar danos causados por vandalismo.
- Identificação e prevenção de corrosão e *tracking* dos isoladores.

Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL (www.aneel.gov.br).

O valor total aplicado nos anos de 2001 a 2007 foi de R\$ 1.194.573,00, o que corresponde a 2,04 % do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão em geral.

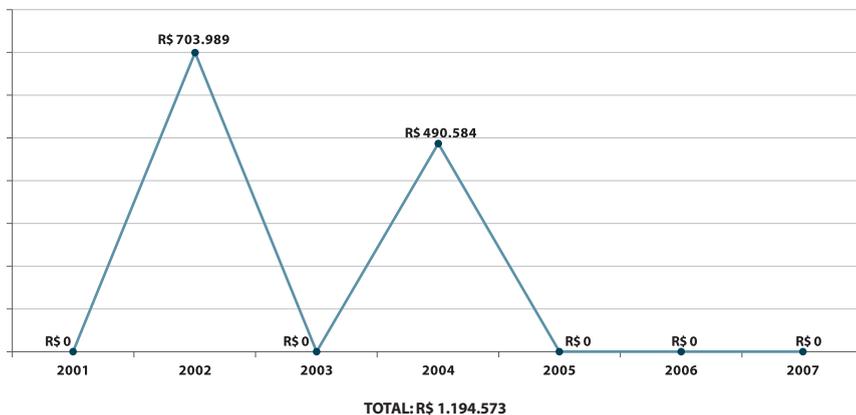
A aplicação de recursos em P&D na área de isoladores só se deu nos anos de 2002 e 2004. O ano de 2002 (ciclo 2002/2003) foi o de maior aplicação com R\$ 703.989,00. Esse recurso foi aplicado para apenas um projeto proposto por FURNAS com o título de “Materiais Isolantes para Aplicação em Dispositivos para Substituição de Isoladores em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão Energizadas”. O restante dos recursos (R\$ 490.584,00) foi aplicado em duas pesquisas relacionadas à contaminação de isoladores realizadas no ano de 2004 (ciclo 2004/2005).

O gráfico a seguir apresenta os investimentos por ano.



EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – ISOLADORES

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema em pauta, foram selecionados 55 informes técnicos. A fonte IEEE forneceu o maior número com 27 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2008 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de 12.

NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – ISOLADORES

Fonte	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPES	-	1	-	-	-	1	-	2	1	3	2	-	10
ANEEL	-	-	-	-	1	-	2	-	-	-	-	-	3
SNPTEE	-	-	-	3	-	2	-	-	-	-	-	-	5
CIGRÉ	3	-	1	-	-	-	1	-	3	-	1	-	9
INPI	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
IEEE	-	-	3	-	-	1	-	-	2	7	8	6	27
Total por ano	3	1	4	3	1	4	3	2	7	10	12	6	
TOTAL DE INFORMES: 55													

Referências

CAPES – Teses de Universidades (10)

2008 (2)

T01-08 - YANAGUIZAWA, J. A. *Blindagem Balística de Compósito Polimérico Contra o Vandalismo e Proteção UV para Cadeias de Isoladores de Vidro em Linhas de Transmissão*. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE: 2008.

T02-08 - DA SILVA, L. C. *Recuperação dos Isoladores de Vidro das Linhas de Transmissão Condenados por Corrosão e Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE: 2008.

2007 (3)

T01-07 - STANKIEVICZ, J. H. *Efeitos da Cristalização Superficial nas Propriedades Mecânicas do Vidro de Isoladores de Alta Tensão*. Tese (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Paraná, Paraná/PR: 2007.

T02-07 - GUEDES, S. *Efeitos da Têmpera Térmica e Química em um Dielétrico de Vidro*. Profissionalizante em Processos Industriais de Engenharia Química – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo/SP: 2007.

T03-07 - FERREIRA, T. V. *Estudo de Trilhamento do Núcleo em Isoladores Poliméricos*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB: 2007.

2006 (1)

T01-06 - LEITE, L. R. P. *Melhoramento da Tensão Disruptiva de Cadeias de Isoladores de Vidro para Linhas de Transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE: 2006.

2005 (2)

T01-05 - JANSSEN, F. *Influência dos Parâmetros de Envelhecimento nas Propriedades Elétricas dos Isoladores Cerâmicos para Sistemas de Potência*. Tese (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Sergipe, Sergipe/PE: 2005.

T02-05 - NERI, M. G. G. *Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB: 2005.



2003 (1)

T01-03 - YANAGUIZAWA, J. A. *Desenvolvimento de Um Escudo Polimérico de Alta Resistência ao Impacto para Minimizar Quebras dos Isoladores de Vidro em Linhas de Alta Tensão por Vandalismo*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE: 2003.

1999 (1)

T01-99 - GONZALEZ, E. G. C. *Desenvolvimento de Compósitos de Silicone para Uso em Isoladores de Linhas de Transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ: 1999.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (3)

2004 (2)

A01-04 - *Desenvolvimento de Um Sistema de Monitoramento de Contaminação em Isoladores de Linhas de Transmissão e Distribuição*. CENTRAIS ELÉTRICAS SANTA CATARINA S.A. – CELESC, FUNDAÇÃO FRITZ MULLER: 2004.

A02-04 - *Avaliação do Comprometimento Elétrico e Mecânica de Isoladores Sujeitos a Dejetos de Aves*. CACHOEIRA PAULISTA TRANSMISSORA DE ENERGIA LTDA – CPTE, CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPTEL.

2002 (1)

A01-02 - *Materiais Isolantes para Aplicação em Dispositivos para Substituição de Isoladores em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão Energizadas*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., FUNDAÇÃO COPPETEC, COPPE/UFRJ: 2003.

SNPTEE (5)

2003 (2)

S01-03 - FILHO, N. S.; GARCIA, R. W. S. *Isoladores de Linha de Transmissão do Sistema Elétrico Brasileiro – Parte II: Avaliação de Desempenho*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

S02-03 - BEZERRA, J. M. B.; LIMA, A. M. N.; DEEP, G. S.; COSTA, E.

G.; FREIRE, R.C.S. *Técnicas de Diagnóstico de Poluição em Isoladores Aéreos de Alta Tensão*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

2001 (3)

S01-01 - GONZALEZ, E. G. C.; SENS, M. A.; VISCONTE, L. Y.; NUNES, R. C. R. *Propriedades Dielétricas de Composições de Silicone Para Uso em Isoladores de Linhas*. XVI SNPTEE, Campinas/SP: 2001.

S02-01 - FUKUDA, S. V.; HOFFMANN, J. N.; DE OLIVEIRA, S. M.; MANNALA, M. J.; SILVA, J. M. M. *Investigação do Comportamento a Longo Termo de Isoladores Poliméricos Tipo “Line Post” Submetidos a Solicitações Eletromecânicas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S03-01 – MELONI, A. E. M.; BENTO, A. L. S.; MORAES, A. C. R.; JUSTO, L. F.; PEREIRA, M. V.; VALK, R. G.; REZENDE, R. F. *Análise Técnico-Econômica da Utilização de Isoladores Compostos de Porcelana ou de Vidro em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (9)

2008 (1)

C01-08 - ANSORGE, S.; CAMENZIND, A.; AMMAN, M.; SCHMUCK, F.; PRATSINIS, S. E.; PAPAILIOU, K. O. *Evaluation of Silicone Rubber Housing Interfaces After Service Exposure and Performance Improvements by Nanofillers Enriched Silicone Rubbers*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2006 (3)

C01-06 - SNOBAR, A. A.; JALGIF, A. A. *Silicon Rubber Insulators Performance Evaluation in Jordanian National Grid*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C02-06 - BIELECKI, J.; WANKOWICZ, J.; STRUZEWSKA, E. *Damage Limit Of Composite Long Rod Insulators Subjected to Cyclic Loads*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C03-06 - AL-HAMOUD, I. Y. *Factors Affecting the Performance of Silicone Rubber Insulators*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

2004 (1)

C01-04 - SCHMUCK, F.; PAPAILIOU, K. O.; KOLMEIJER, P. J.; VAN WOLVEN, J. F. *Further Developments of Compact Lines for 420 kV with Silicone Insulators and Their Advantages for Applications in Emergency Restoration Systems*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.



2000 (1)

C01-00 - DE NIGRIS, M.; TAVANO, F.; ZAGLIANI, F.; RENDINA, R. *Diagnostic Methods of Non-Ceramic Insulators for H. V. Lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

1998 (3)

C01-98 - DIKOI, V. P.; OVSYANNIKOV, A. G. *The Optronics Distance Flow Detection of High Voltage External Insulation*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C02-98 - KIKUCHI, T.; OBA, W.; KOJIMA, Y.; ASANO, Y.; MATSUI, S. *Compact Transmission Lines For Increasing Voltage While Keeping Existing Equipment Intact*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C03-98 - AMMNANN, M.; DALLEVÈS, P.; PAPAILIOU, K. O.; LEVA, M.; VILLA, S. A. *New 400 kV Line With Compact Towers and Composite Insulators Crossarms*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

INPI (1)

2006 (1)

I01-06 - JANOTTI, M. B. *Dispositivo Intitulado – Protetor Retangular de Isoladores – em Torres de Transmissão*. MU8601672-5U.

IEEE (27)

2009 (6)

E01-09 - OLIVEIRA, S.C.; FONTANA, E.; CAVALCANTI, F. J. M. M. *Leakage Current Activity on Glass-Type Insulators of Overhead Transmission Lines in the Northeast Region of Brazil*. IEEE: 2009.

E02-09 - XIE, T.; PENG, Z. *Study on the Voltage-Sharing Performance of Porcelain Insulators on 750 kV Compact Double Circuit Transmission Line*. IEEE: 2009.

E03-09 - ILHAN, S.; OZDEMIR, A. *Flashover Performance of 380 kV V-Strings With Composite Insulators Under Lightning and Switching Impulses*. IEEE: 2009.

E04-09 - OLIVEIRA, S. C.; FONTANA, E.; CAVALCANTI, F. J. M. M. *Real Time Monitoring of the Leakage Current of 230 kV Insulator Strings under Washing*. IEEE: 2009.

E05-09 - YANMING, L.; GANG, L.; XIYANG, C. *Study on Dynamic Prediction of Contamination Deposit of Insulators*. IEEE: 2009.

E06-09 - HAN, S.; HAO, R.; LEE, J. *Inspection of Insulators on High-Voltage Power Transmission Lines*. IEEE: 2009.

2008 (8)

E01-08 - RAMIREZ, J.; DA SILVA, E.; RODRIGUEZ, J. C.; MARTINEZ, M. *Evaluation of 400kV Silicone Insulators Aged Under Natural Tropical Conditions*. IEEE: 2008.

E02-08 - PHILIPS, J. A. *Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators*. IEEE TASKFORCE ON ELECTRIC FIELDS AND COMPOSITE INSULATORS. IEEE: 2008.

E03-08 - BASHIR, N.; AHMAD, H. *Ageing of Transmission Line Insulators: The past, Present and Future*. IEEE: 2008.

E04-08 - HONG, T. P.; VAN TOP, T. *Electrical Field Behavior of Transmission Line Insulators in Polluted Area*. IEEE: 2008.

E05-08 - KUFFEL, J.; LI, Z.; FREIMARK, B.; RAO, T. *Technical Development of the IEEE Guide for Visual Corona Testing of Insulator Assemblies and Line Hardware and its application in the Testing of 765 kV Transmission Line Insulator Assemblies*. IEEE: 2008.

E06-08 - CHANDRASEKAR, S.; KALAIVANAN, C.; KARTHIKEYAN, S. *Study on Pollution Severity of Porcelain Insulators Using LC and Phase Angle Measurement*. IEEE: 2008.

E07-08 - YAMADA, K.; HAYASHI, A.; SAKA, C.; SAKANISHI, K.; MATSUOKA, R. *Improvement of Contamination Flashover Voltage Performance of Cylindrical Porcelain Insulators*. IEEE: 2008.

E08-08 - YANG, Q.; LI, L.; SIMA, W.; XIAOLIN, L.; LI, J.; LUO, B. *Electric Field Calculation of 800 kV Composite Insulator With Domain-Decomposition and Iterative Method*. IEEE: 2008.

2007 (7)

E01-07 - FUJII, O.; MIZUNO, Y.; NAITO, K. *Temperature of Insulators as Heated By Conductor*. IEEE: 2007.

E02-07 - ROWLAND, S. M.; XIONG, Y.; ROBERTSON, J. *Surface Ageing of HV Composite Insulators on 400 kV Lines*. IEEE: 2007.

E03-07 - HAN, S-W.; CHOI, I-H.; LEE, D-I. *Thermal Impact Characteristics by Forest Fire on Porcelain Insulators for Transmission Lines*. IEEE: 2007.

E04-07 - CAVALLINI, A.; CHANDRASEKAR, S.; MONTANARI, G.C.



Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection. IEEE: 2007.

E05-07 - JIAN, X.; YUAN, J.; ZHANG, Z.; HU, J.; SHU, L. *Study on Pollution Flashover Performance of Short Samples of Composite Insulators Intended for ± 800 kV UHV DC.* IEEE: 2007.

E06-07 - PRATT, H. M. O. *High strength Insulator.* IEEE: 2007.

E07-07 - HERNANDÉZ, R.; MONTOYA, G. *In-Service Diagnostic of Polymeric Insulators Exposed to Severe Contamination.* IEEE: 2007.

2006 (2)

E01-06 - ROWLAND, S. M.; XIONG, Y.; ROBERTSON, J. *Ageing of Silicone Rubber Composite Insulators on 400 kV Transmission Lines.* IEEE: 2006.

E02-06 - CASTRO, J. C.; SÁNCHEZ, V.H.; APONTE, G.; CASTRO, M.; ESPINOSA, A.; ROSALES, N. *Colombian Experience on Insulation Pollution Level Measurement Applying the ESDD Methodology.* IEEE: 2006.

2003(1)

E01-03 - OSTENDORP, M. *Assessing the Integrity and Remaining Service Life of Vintage High Voltage Ceramic Insulators.* IEEE: 2003.

2000 (3)

E01-00 - GELA, G.; OSTENDORP, M. *Assessing the Integrity of Vintage Ceramic Insulators.* IEEE: 2000.

E02-00 - GELA, G.; MITCHELL, D. *Assessing the Electrical and Mechanical Integrity of Composite Insulators Prior to Live Working.* IEEE: 2000.

E03-00 - SHAFFNER, D. H.; RUFF, D.L.; VAILLANCOURT, G. H. *Experience With a Composite Insulators Testing Instrument Based On The Electric Field Method.* IEEE: 2000.



CAPÍTULO 10

Manutenção de Linhas de Transmissão

Vinicius Barros Rêgo



PREFÁCIO

Paulo Botelho

No atual contexto da prestação de serviços públicos de transmissão de energia elétrica instituído no Brasil, a importância da linha de transmissão destaca-se pela magnitude do investimento total da função linha de transmissão que aumenta proporcionalmente com o comprimento físico da linha e de suas características elétricas. Cabe ressaltar que essa função não é composta somente pela linha, mas também pelos equipamentos de pátio de subestação como disjuntores, reatores entre outros.

Face aos elevados investimentos em linhas de transmissão, tem-se que 80% de toda a Receita Anual Permitida (RAP) dos empreendimentos de transmissão licitados entre 2002 e 2009 pertencem à função linha de transmissão, na relação de R\$ 11,8 bilhões para R\$ 14,6 bilhões. Em contrapartida, os valores percentuais das multas por indisponibilidades (PV/RAP), relativos a esta função linha de transmissão no mesmo período de 2002 a 2009, são os mais reduzidos considerando todas as funções de uma interligação.

Ressalta-se que os desligamentos nas funções linha de transmissão foram predominantemente nos equipamentos das entradas de linha das subestações e nos reatores, e não na linha propriamente dita.

O principal causador de desligamentos intempestivos, com retorno, de linhas de transmissão são as descargas atmosféricas, mas estas raramente provocam desligamento permanente da função.

Há de se observar também que os principais causadores de desligamentos intempestivos permanentes, sem retorno, são as queimadas, a vegetação, vandalismo/sabotagem e quedas de torres. Com o objetivo de conter o vandalismo/sabotagem, são implementadas, constantemente, cam-



panhas de conscientização de forma a alertar a população sobre os malefícios causados ao sistema e, por consequência, à sociedade em geral no caso da degradação de equipamentos.

Mesmo sendo as linhas de transmissão importantes no contexto do SIN, os recursos atualmente disponibilizados nos P&D para aperfeiçoamento de técnicas de construção e manutenção de linhas não são direcionados na mesma proporção da magnitude dos investimentos empregados e das Receitas Anuais Permitidas. Mediante os resultados advindos dos programas de P&D, com esse enfoque, muitos benefícios poderão ser aplicados por meio de novas e mais eficientes técnicas, tornando os serviços em linha de transmissão detentores de mais qualidade e eficácia.

Manutenção de Linhas de Transmissão

Vinicius Barros Rêgo

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Manutenção de Linhas de Transmissão*.

Palavras-chave

Linha de transmissão, linha viva, manutenção preditiva, manutenção corretiva, risco, inspeção baseada em risco IBR, inspeção, qualidade, confiabilidade, planejamento, gerenciamento, campos magnéticos e elétricos, vandalismo, furto de cabos, esferas de sinalização, robô instalador, monitoração remota, para-raios, aterramentos, estratégia operacional, gestão da manutenção, otimização, logística, redes *bayesianas*, análise de confiabilidade humana (ACH), estudos ergonômicos, navegação, *Global Position System* (GPS), *Geographical Information System* (GIS), *Google Earth* (GE), georreferenciado, fotografia digital.

Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas duas teses de mestrado, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:



ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2001	2000	1999
-	-	-	1	1	-	-	-	-

UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal do Pernambuco (2).

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia de Produção (2).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados oito programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2001	2000	1999
-	-	2	2	2	1	1	-	-

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2001	70.000,00
2002	-
2003	360.000,00
2004	663.000,00
2005	2.751.000,00
2006	1.757.000,00
2007	-
2008	-
TOTAL	5.601.000,00

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.

EMPRESAS PROPONENTES: ⁽²⁾

- Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – ELETRONORTE (2).
- Companhia Energética de Pernambuco – CELPE (1).
- Companhia Estadual de Energia Elétrica – CEEE (1).
- Eletrosul Centrais Elétricas S.A. – ELETROSUL (1).
- Transmissora Sudeste Nordeste S.A. – TSN (1).
- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP (1).
- Goiana Transmissora de Energia S.A. – GTESA (1).

Total de 7 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽²⁾

- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (1).
- Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD (1).
- Fundação Aplicações de Tecnologias Críticas (1).
- *Guimmy* Industrial Ltda. (1).
- ICF Consultoria do Brasil Ltda. – ICF (1).
- JRMED Consultoria Ltda. – JRMED (1).
- LTS Consultoria e Serviços Ltda. – LTS (1).
- Pontifícia Universidade Católica – PUC (1).
- Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR (1).
- *Ritz* do Brasil (1).
- Universidade Federal de Pernambuco – LDSP-UFPE (1).
- Universidade Federal do Maranhão – UFMA (1).
- Universidade Federal do Pará – UFPA (1).
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (1).

Total de 14 entidades.

SNPTEE

Foram analisados nove informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO – ANOS ÍMPARES:

2009	2007	2005	2003	2001
3	2	1	1	2

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.



EMPRESAS REPRESENTADAS:⁽³⁾

- CHESF (3).
- CEMIG Distribuição S.A. (2).
- CEPEL (1).
- Companhia Paranaense de Energia (1).
- Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL (1).
- ELETRONORTE (1).
- *Hot Line* Construções Elétricas Ltda. (1).
- *Lightning Research Center*-LRC/UFMG (1).
- Nordeste Transmissora de Energia (1).
- Universidade Federal de Minas Gerais (1).

Total de 10 empresas.

CIGRÉ

Foram analisados 17 trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	2000	1998
3	6	2	2	3	1

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- EUA (3).
- Holanda (3).
- Portugal (2).
- Rússia (2).
- Bélgica (1).
- Egito (1).
- Eslovênia (1).
- Finlândia (1).
- Índia (1).
- Japão (1).
- Reino Unido (1).
- Romênia (1).
- Tailândia (1).
- Venezuela (1).

Total de 14 países.

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.

INPI

Para o tema em questão foram identificadas cinco patentes depositadas no INPI.

ANO DE REGISTRO DA PATENTE:

2003	2002	2001	2000
1	2	1	1

EMPRESAS APLICANTES DE RECURSOS FINANCEIROS:

- Companhia Energética de Minas – CEMIG.
- Furnas Centrais Elétricas S.A.
- *IMPLO Technologies.*
- *Ritz do Brasil S.A.*
- Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos

Total de 5 empresas

IEEE

Foram analisados nove trabalhos apresentados durante os vários eventos patrocinados pelo IEEE em âmbito mundial.

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2007	2006	2003
1	4	4

PAÍSES REPRESENTADOS: ⁽⁴⁾

- Canadá (3).
- EUA (2).
- Romênia (2).
- África do Sul (1).
- Alemanha (1).
- China (1).
- Coreia (1).

Total de 7 países.



Temas para Futuros Desenvolvimentos

Diante de um cenário atual em que os custos por indisponibilidades operacionais do sistema elétrico estão cada vez mais presentes, em cifras cada vez maiores, o interesse em evitar desligamentos para realização da manutenção é incontestável. Assim como manter uma comunicação direta do setor de monitoramento com a equipe de manutenção é, também, de grande interesse.

As pesquisas mais antigas, das fontes ANEEL e INPI, mostraram grande foco na criação de equipamentos que auxiliem na manutenção das linhas de transmissão, com a finalidade de reduzir o tempo da manutenção. No caso específico do INPI, apenas tivemos patentes voltadas para sistemas de instalação e remoção de sinalizadores de condutores, e sistemas de elevação dos funcionários de manutenção. A necessidade de desenvolvimento dessas inovações está relacionada diretamente à manutenção corretiva, pois, dependendo do problema, criava-se uma tecnologia para solucioná-lo. Porém, as pesquisas mais recentes indicam uma tendência ao desenvolvimento da área de manutenção preditiva, visando reduzir o tempo de serviço e aumentar a segurança dos funcionários. Dentro deste contexto, há diversas vertentes como: estratégia operacional, gestão do conhecimento, gestão de operacionalização, metodologias preditivas, sistemas de comunicação entre monitoramento e manutenção, banco de dados geográficos, entre outras de semelhante relevância.

Os informes técnicos recentes do SNPTEE focam seus objetivos específicos na sistematização de análise de risco e metodologias de melhoria do desempenho de manutenção.

As pesquisas recentes têm tornado viável uma comunicação informativa georreferenciada, ou seja, permite à equipe de manutenção saber o local certo onde deve prestar o serviço e como chegar nessas áreas isoladas mais rapidamente. Esta tecnologia também permite que o trabalho de manutenção possa ser supervisionado a distância.

Este é o foco principal nas pesquisas atuais, ou seja, o uso de redes de comunicação sem fio para disseminação da informação coletada por sensores instalados nas linhas, utilizando-se de tecnologias como *radio trucking*, fotos digitais em tempo real, *WiFi*, cobertura de celular, dentre outras. Esses meios de comunicação, por serem mais rápidos, possibilitam uma manutenção corretiva mais eficiente e mantêm uma comunicação com o sistema de monitoramento que possibilita, também, uma manutenção preditiva mais precisa.

As teses da CAPES seguiram uma linha de análise do trabalho do funcionário de manutenção, as quais verificam a confiabilidade do serviço prestado e analisam a segurança e higiene do trabalho do operador de manutenção de linha de transmissão.

Com base na bibliografia e no resumo acima apresentado, procurou-se identificar quais os itens que carecem de maior aprofundamento em termos de estudos e/ou pesquisas complementares, de forma que se possa obter um maior retorno em termos de aumento da confiabilidade das linhas de transmissão, aumento dos níveis de carregamento, redução dos custos de implantação e redução dos impactos ambientais.

Foram os seguintes os assuntos identificados no tema manutenção de linhas de transmissão:

- Estabelecimento de metodologias preditivas de falha, por intermédio de determinação correta de inspeções periódicas, com a finalidade de se ter maior controle do processo de manutenção e torná-lo mais rápido.
- Comunicação rápida entre o sistema de monitoramento e a equipe de manutenção, por meio de tecnologias atuais de transmissão rápida de informações aliadas a um banco de dados geográficos que viabilizem maior rapidez na prestação do serviço, definindo o local correto a ser verificado. Essas tecnologias são as ferramentas como SIG (Sistema de Informação Georreferenciado), GPS e *Google Earth*.
- Desenvolvimento de novos equipamentos operados a distância, por meio de tecnologia sem fio, para reparos simples na linha, agilizando o serviço e reduzindo o gasto com deslocamento de uma equipe.
- Desenvolvimento de equipamentos com peso mais reduzidos, para facilitar e agilizar a manutenção.
- Sistemas que impeçam falhas contra furto e vandalismo de equipamentos.
- Desenvolvimento de novos métodos de troca e reparo em condutores que não necessitem forçar o desligamento do fornecimento de energia.
- Sistemas operacionais de detecção e de restauração do fornecimento de energia mais rápidos para casos de emergência.



Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

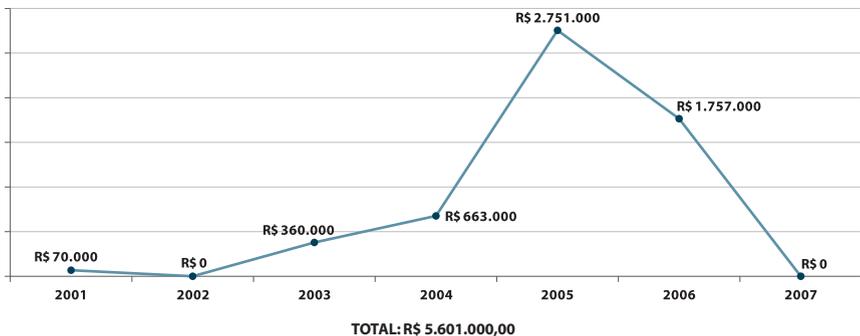
Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL (www.aneel.gov.br).

O valor total aplicado em manutenção geral, nos anos de 2001 a 2007, foi de R\$5.601.000,00, o que corresponde a 9,57% do investimento total aplicado, neste mesmo período, nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão.

O ano de 2005 foi o de maior aplicação com R\$ 2.751.000,00. O gráfico abaixo apresenta os investimentos em manutenção geral por ano.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – MANUTENÇÃO

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema em pauta, foram selecionados 50 informes técnicos. A fonte CIGRÉ forneceu o maior número com 17 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2006 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de 12.

NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – MANUTENÇÃO

Fonte	98/99	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPES	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	2
ANEEL	-	-	1	-	1	2	2	2	-	-	-	8
SNPTEE	-	-	2	-	1	-	1	-	2	-	3	9
CIGRÉ	1	3	-	2	-	2	-	6	-	3	-	17
INPI	-	1	1	2	1	-	-	-	-	-	-	5
IEEE	-	-	-	-	4	-	-	4	1	-	-	9
Total por ano	1	4	4	4	7	5	4	12	3	3	3	
TOTAL DE INFORMES: 50												

Referências

CAPES – Teses de Universidades (2)

2005 (1)

T01-05 – MENEZES, R. C. S. *Uma metodologia para avaliação da confiabilidade humana em atividades de substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão*. Tese (Mestrado em Engenharia Produção) – Universidade Federal de Pernambuco: 2005.

2004 (1)

T01-04 – MENDONÇA, S. S. *Análise Ergonômica do trabalho de linhas de transmissão*. Tese (Profissionalizante em Engenharia Produção) – Universidade Federal de Pernambuco: 2004.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (8)

2006 (2)

A01-06 – LIMA, E. P. *Desenvolvimento de uma metodologia para retenção e sistematização do conhecimento da função manutenção em linhas de transmissão*. ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR: 2006.

A02-06 – SILVA, J. A. *Cadastro georreferenciado de linhas de transmissão e monitoração com sensoriamento remoto*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO



NORTE DO BRASIL-ELETRONORTE, CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES-CPQD. Universidade Federal do Pará-UFPA: 2006.

2005 (2)

A01-05 – ARAÚJO, M. S.; PRADA, R. B.; FERREIRA, M. J. L. *Deteção e modelagem de radiações ultravioleta e infravermelho em linhas de transmissão EAT visando à minimização de riscos de falhas e desgastes de equipamentos eletromecânicos*. TRANSMISSORA SUDESTE NORDESTE-TSN, CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA-CEPEL, ICF CONSULTORIA DO BRASIL, IRMED CONSULTORIA, LTS CONSULTORIA E SERVIÇOS. Pontifícia Universidade Católica-PUC: 2005.

A02-05 – IOCHPE, C. *Sistema georreferenciado para gerenciamento da manutenção de subestações e linhas de transmissão*. COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA-CEEE. Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS: 2005.

2004 (2)

A01-04 – *Logística para atuação na manutenção das linhas de transmissão no trecho Imperatriz-Presidente Dutra-Sistema Maranhão*. ELETRO-NORTE. Universidade Federal do Maranhão-UFMA: 2004.

A02-04 – *Estudos para definição de indicadores de manutenção para um sistema de LT*. GOIANA TRANSMISSORA DE ENERGIA-GTESA, FUNDAÇÃO APLICAÇÕES DE TECNOLOGIAS CRÍTICAS: 2004.

2003 (1)

A01-03 – ALMEIDA, A. T. *Desenvolvimento de um modelo de gestão de manutenção para linhas de transmissão e redes de distribuição*. CENTRAIS COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO-CELPE. Universidade Federal de Pernambuco-LDSP-UFPE: 2003.

2001 (1)

A01-01 – *Desenvolvimento de ferramentas de acionamento hidráulico para troca de isoladores e ferragens em linhas de transmissão*. COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA-CTEEP, GUIMMY INDUSTRIAL, RITZ DO BRASIL: 2001.

SNPTEE (9)

2009 (3)

A01-09 – FONSECAL, B. Q. A.; JUNIOR, C.; ALBERTO, C. *Aplicação da inspeção baseada em risco em linhas aéreas de transmissão e subtransmissão de energia elétrica*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

A02-09 – NOGUEIRA, A. E. A.; ARAÚJO, P. I. S. *Aplicação de técnicas avançadas de fotografia digital em inspeção de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica a longa distância*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

A03-09 – DOMINGUES, L. A. M. C.; BARBOSA, C. R. N.; NETO, A. M.; SILVA, R. M. C.; CORDEIRO, B. N.; MEDEIROS, A. M.; FONSECA, U. J. A.; LINS, J. C. S. *Avaliação da exposição de trabalhadores de linha viva a campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão de 500 kV da CHESF - Modelagem computacional e medições de campo*. XX SNPTEE, Recife/PE: 2009.

2007 (2)

A01-07 – PIRES, A. A. J.; RIOS, E. T.; BORELI, S. C.; MARTELLO, L.; DIAS, E. B.; NAKAGAWA, F.; BEOLCHI, J. L. *Robô instalador de esferas de sinalização em linhas de transmissão*. XIX SNPTEE, Rio de Janeiro/RJ: 2007.

A02-07 – MIRANDA, D. C.; CUNHA, L. V.; VISACRO, S.; DIAS, R. N.; MESQUITA, C. R. *Resultado da aplicação de metodologia inovadora para melhoria de desempenho da LT Guilman Amorim-Ipatinga1, 230 kV, frente a descargas atmosféricas*. XIX SNPTEE, Rio de Janeiro/RJ: 2007.

2005 (1)

A01-05 – RÊDES, M. V.; LÓES, L. B. *O furto de cabos condutores de alumínio e medidas para sua repressão: a experiência da NTE*. XVIII SNPTEE, Curitiba/PR: 2005.

2003 (1)

A01-03 – CORDEIRO, B. N.; RODRIGUES, M. A. F.; EDUARDO, J. V.; RAMOS, P. R. R.; MONTEIRO, J. M. A.; NEVES, A. L. D. *Intervenção energizada para suspensão das bases de estrutura estaiadas em circuito único radial-Atendimento a estratégia de maximização da disponibilidade das linhas de transmissão da CHESF*. XVII SNPTEE, Uberlândia/MG: 2003.

2001 (2)

A01-01 – FREITAS, J. C. L. *Utilização de tecnologia de Corona System na manutenção da linha de transmissão Tucuruí/Vila do Conde, 500 kV*. XVI SNPTEE, Campinas/SP: 2001.



A02-01 – MOREIRA, I. S.; BRAGA, A. E. *Reisolamento e reforma de uma linha de transmissão energizada*. XVI SNPTEE, Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (17)

2008 (3)

C01-08 – REICHMEIDER, P.; JACOBSON, S.; TUTTLE, J.; O'CONNELL, D.; DEVINE, C.; BARTHOLD, L. *Experience with new methods for live-line conductor replacement*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C02-08 – MOTA, J. G.; RAMOS, M.; ANDRÉ, A. M. *Geographical information tools for overhead lines preventive maintenance*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C03-08 – PHILLIPS, A. J.; ENGELBRECHT, C. S. *The feasibility of using daytime corona inspection to identify contaminated insulators that needs to be washed*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2006 (6)

C01-06 – SILFVERBERG, A. A.; STENSTRAND, M.; RATILAINEN, M.; TURUNEN, P. *Experiences and possibilities of using mobile terminal in grid maintenance*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C02-06 – MOTA, J. G.; VALE, A.; ANDRÉ, A. M.; RIBEIRO, M. I. *Taking accurate measurements of high voltage installations with range scanners and GPS*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C03-06 – GAL, S.; OLTEAN, M.; DIACONU, I.; GAL, B. *Multispectral (V, UV, IR) aerial survey of EHV overhead lines in the Romanian power grid*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C04-06 – MARINSEK, M.; JAMSEK, S.; BARL, B.; MEKHANOSHIN, B.; MEKHANOSHIN, K.; BORODIN, A.; SHKAPTSOV, V. *Benefits of integrated informational, geographical and asset management system for power utility networks*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C05-06 – PARDIÑAS, J. A.; GARCÍA, C.; DAO, A.; DE LA VILLE, N. *Georeferential video for located access road and stringing tension equipment places in CVG EDELCA existing transmission lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C06-06 – PETCHSANTHAD, K. *Live working development for EGAT's 500kV compact lines in Thailand*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

2004 (2)

C01-04 – HAMED, M. N. G.; EL-GENDY, O.; DIAB, A.; AWAD, M.M.; NOSSIER, A. *Mechanism of AC flashpower during live line washing of polluted insulators*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C02-04 – VAN DER WAL, A.; ROSS, A. A. H. J.; KEMA, T. D. C. *Condition assessment of overhead lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

2002 (2)

C01-02 – SCHWEINER, R. J.; TWOMEY, K. E.; LINDSEY, K. E. *Transmission line emergency restoration philosophy at Los Angeles Department of Water and Power*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C02-02 – KUMAR, P.; BAHL, R. B.; VYAS, H. *Use of new maintenance techniques for increasing availability of overhead transmission lines-experiments conducted in India*. CIGRÉ, Paris, França: 2002.

2000 (3)

C01-00 – CARTER, C. N.; DEAS, J. N.; GILBERT, G. R. *Working in a market-driven Electricity Supply Industry: Modifications to UK overhead transmission line working practice*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C02-00 – DIKOY, V. P.; DJAKOV, A. F.; LAVRENTIEV, V. M.; KRYLOV, S. V.; NIKIFOROV, E. P.; TIMASHOVA, L. V.; FEDOSENKO, R. YA. *Methodology and results of 330-500kV overhead line ageing assessment for their maintenance planning and reliability assurance*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

C03-00 – NAKAMURA, K.; HASE, Y.; YOKOTA, Y.; NISHIDA, E. *Reduction of maintenance cost for overheated compression type clamps through newly developed countermeasure and improved control method*. CIGRÉ, Paris, França: 2000.

1998 (1)

C01-98 – RHEBERGEN, B.; BOONE, M. J. M.; WALTER, R. N.; ROGIER, J. *Experience with 400 kV and 150 kV emergency restorations in Belgium and the Netherlands*: 1998.

INPI (5)

2003 (1)

I01-03 – PASINI, C. *Torre com estrutura modular para reparos de linhas de transmissão elétricas*. IMPLO TECHNOLOGIES. BR20030005581 20031016, 31 de maio de 2005.



2002 (2)

I01-02 – NOGUEIRA, L. C. S.; DO CARMO, L. S. *Sistema autônomo ou semi-autônomo para instalação e remoção de dispositivos de sinalização de cabos de linhas de transmissão aérea ou similar*. Companhia Energética de Minas. BR20020005916 20021113. 28 de setembro de 2004.

I02-02 – *Sistema para instalação de esfera de sinalização aérea em redes de distribuição e linhas de transmissão de alta tensão e extra alta tensão, a partir do solo, através de corda*. RITZ DO BRASIL S.A., RITZ EMIL. BR20020006080 20020927. 03 de agosto de 2004.

2001 (1)

I01-01 – JUNIOR, P. M.; DE OLIVEIRA, J. R. B.; RODRIGUES, R. C. *Dispositivo para instalação de esferas de sinalização em cabos pára-raios de linhas de transmissão e método para instalação de esferas de sinalização em cabos pára-raios de linhas de transmissão utilizando referido dispositivo*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. BR20010003416 20010423. 14 de janeiro de 2003.

2000 (1)

I01-00 – RIGONI, R. T. *Processo de Substituição de um cabo pára-raios em linhas de transmissão de energia elétrica em operação energizada*. FURUKAWA IND S.A. PRODUTOS ELÉTRICOS. BR20000004317 20000913. 16 de abril de 2002.

IEEE (9)

2007 (1)

E01-07 – FAN, Y.; GANG, L.; XIYANG, C.; RUNPING, L.; CHANG, X. *Power Transmission Lines Maintenance System Base on Google Earth (GE) Platform*. IEEE: 2007.

2006 (4)

E01-06 – FLOREA, G. A.; GAL, S. I. A.; LIPAN, L.; MATEESCU, E.; ARDELEAN, I.; SURIANU, F. D. *Safety of the personnel working on multicircuit power overhead lines implies the precise knowledge of the magnetic induced voltages. Algorithm, software and comparison with measurements at real scale*. IEEE: 2006.

E02-06 – PARK, J-Y.; CHO, B-H.; BYUN, S-H. *Development of automatic cleaning robot for live-line insulators*. IEEE: 2006.

E03-06 – SHANTZ, E.; HUSSELS, D.; LINDSEY, K. *Guidelines for Emergency Resource Planning for Overhead Transmission Line Asset Owners*. IEEE: 2006.

E04-06 – DINCA, A.; FLOREA, G. A.; GAL, S. I. A. *Personal filters for live-line workers to mitigate the biologic impact of the low frequency magnetic field*. IEEE: 2006.

2003 (4)

E01-03 – KILROE, N. *Line inspections-eyes and ears of RCM*. IEEE: 2003.

E02-03 – DANSEREAU, R.; BEAUREGARD, C. *Innovative tools for better live-line maintenance*. IEEE: 2003.

E03-03 – MONTAMBULT, S.; POULIOT, N. *The HQ Linerover: contributing to innovation in transmission line maintenance*. IEEE: 2003.

E04-03 – OSTENDORP, M. *Ground line corrosion damage activity and damage assessment for direct embedded steel structures and guy anchors*. IEEE: 2003.



CAPÍTULO 11

Monitoramento de Linhas de Transmissão

Leonardo Brant Murça



PREFÁCIO

José Jardimi

V isando a um uso mais efetivo das linhas de transmissão, têm sido criados os sistemas de monitoramento. Estes sistemas são compostos por sensores especificamente projetados para a função, computadores e meio de comunicação de dados e mostram os resultados nos centros de operação ou manutenção.

Quanto a sua aplicação, os sistemas de monitoramento podem ser agrupados em: operação; manutenção e engenharia.

Operação

Dentro dos vários sistemas voltados à operação, pode-se dedicar especial atenção ao de medição de flechas dos condutores. Por meio do uso de sensores apropriados, pode-se medir num vão a tensão, a temperatura ou mesmo a distância do condutor ao solo. Desta forma, o carregamento da linha pode ser usado no seu máximo sem a preocupação de violação das flechas dos condutores e da distância de segurança ao solo.

Vários destes sistemas estão sendo comercializados no mundo, e os ganhos obtidos de uso de um carregamento da linha maior que o imaginado na fase de projeto têm sido mostrado em artigos.

Outros sistemas de auxílio à operação podem ser citados, como a monitoração das condições ambientais (temperatura, ventos etc.); os localizadores de defeito; e os sistemas de detecção do local de queda de raios; dentre outros. Os localizadores de defeito e de detecção de raios têm melhorado o tempo de retorno em operação das linhas, resultando num aumento da



confiabilidade do sistema elétrico e redução dos custos de interrupção.

No Brasil, existe uma rede de sensores para localização de quedas de raios no sudeste do país dando cobertura total da área.

Manutenção

No âmbito da manutenção, aparecem os equipamentos voltados à inspeção e aqueles para suporte à manutenção centrada na confiabilidade.

Estão incluídos neste grupo os robôs (aéreos não tripulados e aqueles que se deslocam sobre os cabos para-raios e de fase), as câmaras de infravermelho, ultravioleta e de vídeo.

Quanto à manutenção centrada na confiabilidade, podem ser citados também os monitoramentos de corrente de fuga pelos isoladores que indicam a oportunidade de eventual lavagem de isoladores, e também os monitoramentos de equipamentos da subestação que, de certa forma, compõem-se com a linha. Vários sistemas com esta finalidade têm sido objeto de projetos de P&D do sistema ANEEL.

Sistemas dedicados podem identificar corrosão interna nos para-raios, nos condutores, nas ferragens e nas torres. O uso de técnicas de análise de imagens e cores em muito ajudam este processo. Este tema tem sido objeto de desenvolvimento no exterior como mostram as publicações do IEEE e CIGRÉ.

Os sistemas de sensoriamento de flechas podem dar indicações de severidade de depósito de gelos que levam à aplicação de técnicas para redução destes (aquecimento forçado, robôs móveis para ação mecânica).

Engenharia

O uso de imagens de satélite permite a observação de invasão de faixas de passagens e crescimento de vegetação nas proximidades da linha. As imagens de satélite e geoprocessamento permitem criar um cadastro dos componentes que compõem a linha e auxilia numa gestão mais eficiente dos ativos. São os denominados SIGs (Sistemas de Informações Geográficas).

Como conclusão, pode-se afirmar que sistema de monitoramento é um campo em ampla evolução incluído na tendência atual de atingir maior controlabilidade e gestão das linhas de transmissão, de seus componentes e equipamentos correlatos.

Monitoramento de Linhas de Transmissão

Leonardo Brant Murça

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com o foco no tema *Monitoramento de Linhas de Transmissão*.

Palavras-chave

Linhas de transmissão, sistemas de monitoramento, monitoramento em tempo real, sensores, transmissão remota de dados, sensores de fibra ótica, instrumentação, fibra óptica, carregamento dinâmico, detecção de descargas atmosféricas, visualização de corona, carregamento, dados climáticos, ampacidade, medição de flecha, corrente de fuga, vibração eólica, Bobina de *Rogowski*, grade de *Bragg*, radiografia digital robô de inspeção aéreo, termovisão, segurança patrimonial, vandalismo em torres, cadastro georreferenciado, recapacitação de linhas de transmissão, feixe-expandido (FEX), manutenção em linha viva.



Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas sete teses, sendo seis de mestrado e uma de doutorado, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
2	1	3	-	-	-	-	1	-	-

UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal de Itajubá (2).
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (1).
- Universidade Federal de Juiz de Fora (1).
- Universidade Federal de Uberlândia (1).
- Universidade Federal de Minas Gerais (1).
- Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1).

Total de 6 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia Elétrica (6).
- Engenharia Mecânica (1).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados 35 programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
-	-	5	10	8	1	4	6	1	-

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2000	180.160,00
2001	2.696.305,00
2002	2.929.190,00
2003	322.048,00
2004	3.911.707,00
2005	10.128.954,00
2006	3.146.775,00
2007	-
2008	-
2009	-
TOTAL	23.315.139,00

EMPRESAS PROPONENTES:⁽²⁾

- ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (10).
- ETIM – Expansion Transmissão Itumbiara Marimbondo S.A. (4).
- CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica S.A. (3).
- CEMAT – Centrais Elétricas Matogrossenses S.A. (2).
- COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (2).
- CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica (1).
- CELPE – Companhia Energética de Pernambuco (1).
- Centrais de Transmissão Nordeste S.A. (1).
- CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco (1).
- COPEL Transmissão S.A. (1).
- ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A. (1).
- ENTE – Empresa Norte de Transmissão de Energia (1).
- ETEP – Empresa Paraense de Transmissão de Energia (1).
- Expansion – Expansion Transmissão de Energia S.A. (1).
- FURNAS Centrais Elétricas S.A. (1).
- LIGHT Serviços de Eletricidade S.A. (1).
- NOVATRANS Energia S.A. (1).
- Rio Grande Energia S.A. (1).
- TSN – Transmissora Sudeste Nordeste S.A. (1).

Total de 19 empresas.

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.



ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽²⁾

- CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (5).
- UFPA – Universidade Federal do Pará (5).
- CONTREL Engenharia S/S Ltda. (3).
- COPPE/RJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação (3).
- EPUSP – Escola Politécnica da USP (3).
- Fundação Padre Leonel Franca (3).
- FUSP – Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo (3).
- PUC – Pontifícia Universidade Católica (3).
- UFPE – Universidade Federal de Pernambuco (3).
- ICF Consultoria do Brasil Ltda. (2).
- UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2).
- UnB – Universidade de Brasília (2).
- BB&E Engenharia e Consultoria Ltda. (1).
- CEFET/CE – Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará (1).
- CEPTEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (1).
- CPQT – Centro de Pesquisa e Qualificação Tecnológica (1).
- EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural (1).
- FDTE – Fundação para Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (1).
- IT Solutions (1).
- JRMED Consultoria e Serviços Ltda. (1).
- Kadumo Comércio e Projetos Ltda. (1).
- LTS Consultoria e Serviços Ltda. (1).
- LACTEC (1).
- SIMEPAR (1).
- UFAM – Universidade Federal do Amazonas (1).
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais (1).
- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1).
- FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria (1).

Total de 28 entidades.

SNPTEE

Foram analisados 14 informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO - ANOS ÍMPARES:

2009	2007	2005	2003	2001
6	4	1	1	2

EMPRESAS REPRESENTADAS: ⁽³⁾

- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (3).
- CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (3).
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais (2).
- CHESF – Companhia Hidrelétrica do São Francisco (2).
- COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (2).
- CTEEP (2).
- COPEL Transmissão S.A. (2).
- LACTEC (2).
- LIGHT Serviços de Eletricidade S.A. (1).
- FCI (1).
- NORTON (1).
- ELECTROVIDRO (1).
- UFCG – Universidade Federal de Campina Grande (1).
- BB&E Consultores Associados Ltda. (1).
- UFPE – Universidade Federal de Pernambuco (1).
- Enersul – Rede de Energia (1).
- Escelsa – Energias do Brasil (1).
- Bluestar Silicones (1).
- EPUSP – Escola Politécnica da USP (1).
- FDTE (1).
- ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (1).

Total de 21 empresas.

CIGRÉ

Foram analisados 27 trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.



ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2008	2006	2004	2002	2000	1998
7	6	2	4	2	6

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Alemanha (5).
- Japão (3).
- Noruega (3).
- Bélgica (2).
- Canadá (2).
- Dinamarca (2).
- Eslováquia (2).
- Estados Unidos (2).
- França (2).
- Holanda (2).
- Nova Zelândia (2).
- Reino Unido (2).
- Suíça (2).
- Áustria (1).
- Espanha (1).
- Finlândia (1).
- Itália (1).
- República Tcheca (1).
- Rússia (1).
- Suécia (1).

Total de 20 países.

INPI

Foram identificados cinco registros de patentes, de acordo com os seguintes anos:

ANO DE REGISTRO DA PATENTE:

2006	2005	2004	2003
1	1	2	1

IEEE

Foram analisados 10 trabalhos apresentados nos diversos eventos patrocinados pelo IEEE, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2009	2008	2007	2006
4	2	3	1

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- China (3).
- Brasil (3).
- Coreia do Sul (2).
- Estados Unidos (1).
- Canadá (1).

Total de 5 países.

Temas para Futuros Desenvolvimentos

As pesquisas realizadas buscaram estabelecer uma sequência cronológica do desenvolvimento de ações cujo foco é a maximização das condições de operação das linhas de transmissão, baseado no aumento de confiabilidade dos sistemas de monitoramento.

Ao tomar como referência os temas de pesquisa apresentados no início desta década, observa-se uma grande preocupação com as condições de carregamento das linhas de transmissão. Muitos estudos foram feitos no sentido de modelar matematicamente e numericamente os efeitos e ocorrências em linhas aéreas, estabelecendo parâmetros de projeto como medição de flecha, temperatura de operação, corrosão, limites de potência.

Evidenciou-se, porém, a necessidade de alcançar avanços no campo do sensoriamento e da transmissão de dados, de modo a viabilizar a aplicação dos resultados obtidos nas pesquisas. Nesse sentido, pesquisas de P&D selecionadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ao longo da última década apontam uma preocupação do desenvolvimento de técnicas e aplicação de novos sensores para medição dos parâmetros das linhas de transmissão. Sensores utilizando fibra óptica, tecnologia SAW (*sensor acoustic waves*), termovisão e *lasers* são os mais estudados. O aprimoramento no campo de processamento de imagens também possibilitou a melhoria de equipamentos de inspeção baseados nesta tecnologia. Avanços no sistema de telecomunicações do país e sua consequente redução de custos tornaram os sistemas de transmissão mais confiáveis e muito mais baratos.

Os investimentos em monitoramento comprovaram a suspeita de que as linhas vinham operando muito aquém de sua capacidade máxima. O monitoramento *on-line* permitiu a otimização da taxa de transmissão, resultando num aumento médio de 10 a 15 % na capacidade de transmissão dos sistemas.

O barateamento e a maior acessibilidade à tecnologia de fibras ópticas apontam uma tendência num futuro muito próximo a seu maior uso no mo-



nitoramento em linhas de transmissão. Um forte indicativo deste processo é o crescente número de pesquisas na área de aquisição de dados, utilizando Redes do tipo *Bragg* para fibras ópticas, tema que tem gerado novos P&D na ANEEL e crescentes publicações no IEEE e SNPTE. Num movimento sinérgico, sistemas mais baratos de transmissão de dados sem-fio têm contribuído com o processo de monitoramento *on-line*, vencendo barreiras de acessibilidade aos pontos de monitoramento. Para além da evolução no campo de sensoria-mento e transmissão de dados, surge a necessidade de desenvolver sistemas de identificação do ponto ótimo de operação das linhas de transmissão com base em metodologias como “redes neurais” e “algoritmos genéticos”. A onda atual de adesão aos *softwares* livres tem contribuído também para uma redução nos custos de P&D, apontando uma tendência para uso destas plataformas.

Com relação ao monitoramento de possíveis falhas mecânicas, estruturais ou ainda do desgaste de componentes, ferramentas baseadas em tecnologia robótica vêm sendo exploradas. Empresas de transmissão também têm investido nesta área. Observa-se nas pesquisas uma busca pela maior autonomia dos sistemas robotizados, seja pela não exigência de operadores (ou sistemas operados a distância), quanto pela autonomia de tempo de operação. Outra tendência é a integração desses robôs de inspeção com as redes georreferenciadas e transmissão de dados por tecnologias sem fio. A demanda por pesquisa é embarcar o máximo possível de funções em um só robô, o que leva a uma tendência de mais investimento em pesquisa e desenvolvimento de novos tipos de sensoria-mento mais compactos, leves e confiáveis. Veículos não tripulados, apesar de já serem pesquisas consolidadas e não apresentarem muitas novidades em aspectos mecânicos, têm sido alvo de investimento no sentido de aumentar a tecnologia embarcada, diminuindo o custo de pessoal e operação das empresas transmissoras.

Outro exemplo é o projeto de P&D do ano de 2003 (publicado na revista de P&D da ANEEL) patrocinado pela Light Serviços de Eletricidade e executado pelo CPqD que consiste em um sistema robotizado para detecção de corrosão – SDC em cabos de alumínio. Naquele ano, o projeto colocou o Brasil entre os três países utilizadores deste tipo de equipamento (Japão, Coreia do Sul e Brasil) e com uma vantagem segundo a publicação “O equipamento brasileiro é mais leve e opera mais tempo sem necessidade de recarga da bateria”, caracterizando-se então numa tendência de pesquisa na área ao longo da última década.

Roubos e depredação de equipamentos de linhas de transmissão têm gerado pesquisas patrocinadas pelas empresas transmissoras, com relação aos sistemas de monitoramento contra vandalismos ou sistemas de proteção patrimonial.

O monitoramento dos fenômenos climáticos também tem demonstrado uma grande demanda em P&D com a conseqüente criação de grandes bancos

de dados e técnicas de gerenciamento destes. Medição de parâmetros como vento, radiação, temperatura, servem de base para auxiliar no controle de operação das linhas de transmissão. Dos parâmetros de controle apresentados, a temperatura de operação da linha mostrou-se um dos mais recorrentes por influenciar na medição de diversos outros parâmetros, tais como flecha, amplitude, entre outros. A preocupação mais evidente das empresas transmissoras, nos dias de hoje, é a alta confiabilidade do monitoramento em tempo real dos parâmetros de linha e consequente gerenciamento dos dados para operação no ponto ótimo de carregamento.

Com relação aos problemas estruturais, o maior esforço das pesquisas tem sido em desenvolver técnicas que identifiquem as falhas e desgastes dos acessórios e equipamentos em seu começo. Para materiais isolantes, as técnicas de identificação de efeito corona e emissão de radiação (técnicas de detecção infravermelho) têm sido as mais pesquisadas. Mais uma vez, essas técnicas aliam-se à criação de um banco de dados para a identificação de padrões de comportamento estabelecidos como aceitáveis. A detecção e tratamento do problema de corona em linhas de transmissão têm sido classificados em quatro tipos de linhas de pesquisas:

- Modelagem matemática de campos e atividades elétricas em isoladores e ferragens de linhas de transmissão.
- Corrosão de componentes em cadeias de isoladores.
- Inspeções em linha-viva utilizando-se de equipamentos de espectrometria.
- Aplicação dos modelos de previsão de séries temporais e técnicas de redes neurais em problemas de detecção de falhas em linhas de transmissão.

Nas poucas pesquisas que se apresentaram com relação ao monitoramento de torres, a preocupação é com a corrosão da estrutura, condições de tensionamento dos estais (quando presentes) e inclinação destas. Novamente, a preocupação com sensoriamento mais confiável e barato e consequente transmissão de dados via tecnologia sem fio foram algumas das preocupações manifestadas. Nas pesquisas apresentadas, o método mais investigado de medição de inclinação de torres foi a utilização de *lasers*.

No que se refere ao monitoramento de vibrações em cabos, as pesquisas apontam dois projetos de P&D na área, sendo que o mais recente utiliza sensoriamento por meio de redes de *Bragg*. Fora as pesquisas que cuidam do sensoriamento propriamente dito, a maioria das pesquisas limita-se à criação de simulações e modelos computacionais mais didáticos do que comerciais e caracterização matemática das tensões mecânicas ocasionadas pelo efeito de vibração, o que caracteriza um ramo pouco explorado, talvez porque demande a criação de laboratórios muito específicos e de alto investimento.



Dentre os temas mais pesquisados, podem-se destacar os seguintes:

- Sistemas de medição de flecha.
- Sistemas de monitoramento de rompimento de cabos.
- Sistemas de monitoramento contra o vandalismo.
- Simulação do comportamento dinâmico das estruturas.
- Localização de falhas em cadeias de isoladores.
- Monitoramento dos fenômenos elétricos baseados na criação de um cadastro de ocorrências para comparação com padrões pré-estabelecidos de sinais (amplitude de sinal, frequência, tempo de duração, amplitude).
- Monitoramento de efeito Corona.
- Sistemas de Monitoramento que previnem danos causados pela degradação de componentes.
- Melhoria de estudo de sensores à fibra óptica.
- Integração e uso de sistemas georreferenciados.
- Aumento da autonomia de robôs, tanto com relação ao tempo de operação quanto ao controle.
- Sensores de tração e medida cabo-solo.
- Foram identificados alguns assuntos a serem temas de pesquisa no tema monitoramento:
- Aprimoramento das metodologias para predição do grau de poluição do ambiente.
- Melhorias das técnicas e sensores de medição de temperatura do cabo, com destaque especial para sensoriamento utilizando fibra óptica e sensores do tipo SAW.
- Melhoria dos critérios e metodologias para se estimar temperatura do cabo utilizando o método de monitoramento climático.
- Melhoria na tecnologia de transmissão de dados para sensores posicionados nas torres.
- Aprimoramento das técnicas de gerenciamento e armazenamento de dados utilizados nos sistemas de monitoramento em tempo real. Destaque para a criação de bancos de dados de eventos em linhas de transmissão.
- Melhoria dos sistemas de medição que visam aferir tração dos cabos ou de equipamentos que medem a altura cabo-solo.
- Sistemas de segurança patrimonial (“*anti-vandalismo*”).
- Desenvolvimento na área de identificação de descargas elétricas.
- Sistemas de medição de vibração e autoamortecimento de cabos.

Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

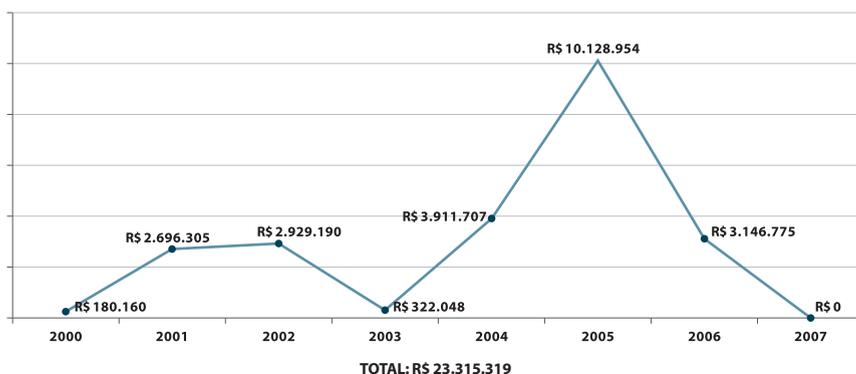
Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados, em pesquisa realizada no site da ANEEL www.aneel.gov.br.

O valor total aplicado nos anos de 2000 a 2009 foi de R\$ 23.315.139,00, o que corresponde a 39,85% do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão em geral.

O gráfico abaixo apresenta os investimentos por ano.

EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – MONITORAMENTO

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema em pauta, foram selecionados 98 informes técnicos. Observa-se que os temas de P&D da ANEEL forneceram o maior número com 35 trabalhos.

A tabela a seguir apresenta a composição por ano e por fonte de pesquisa. O ano de 2006 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de 16.



NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – MONITORAMENTO

Fonte	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPES	-	-	-	1	-	-	-	-	3	1	2	-	7
ANEEL	-	-	1	6	4	1	8	10	5	-	-	-	35
SNPTEE	-	-	-	2	-	1	-	1	-	4	-	6	14
CIGRÉ	6	-	2	-	4	-	2	-	6	-	7	-	27
INPI	-	-	-	-	-	1	2	1	1	-	-	-	5
IEEE	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	2	4	10
Total por ano	6	0	3	9	8	3	12	12	16	8	11	10	
TOTAL DE INFORMES:98													

Referências

CAPES – Teses de Universidades (7)

2008 (2)

T01-08 MOREIRA, R. L. P. *Sistema Robótico para inspeção de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ: 2008.

T02-02 ADAMI, J. F. *Detecção de Arcos de Contorno em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Processamento de Sinais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá/MG – UNIFEI: 2008.

2007 (1)

T01-07 MAGINA, F. G. *Aquisição Automática e Tratamento de Dados Meteorológicos Aplicáveis ao Projeto e Operação de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica*. TESE (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá/MG: 2007.

2006 (3)

T01-06 SEVERINO, J. F. B. *Sistema Digital de Medição Direta de Flecha em Linhas de Transmissão com Uso de Sensores Ópticos e Comunicação Via Tecnologia GPRS*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora/MG: 2006.

T02-06 GONÇALVES, R. S. *Robô Móvel Suspenso por Fio Com Pernas de Comprimentos Variáveis*. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia/MG: 2006.

T03-06 DIAS, R. N. *Nova Metodologia para Identificação de Pontos Crítico de Desempenho em Linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais/MG: 2006.

2001 (1)

T01-01 DA SILVA, J. C. C. *Estudos de Deformação em Cabos Condutores de Alumínio com Alma de Aço Utilizando Redes de Bragg em Fibras Óticas*. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Federal do Paraná/PR: 2001.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (35)

2006 (5)

A01-06 *Desenvolvimento de Um Sistema de Segurança Patrimonial Aplicado às Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*. CENTRAIS COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP, Universidade de São Paulo/SP: 2006.

A02-06 *Análise de Técnica de Tecnologias de Inspeção Preditiva de Isoladores de Linhas de Transmissão Através de Emissão de Efeito Corona por Análise de Espectro de Frequência*. CENTRAIS COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP, Universidade de São Paulo – EPUSP – USP: 2006.

A03-05 *Monitoração da Ocorrência de Incêndios em Proximidades de Linhas de Transmissão*. CENTRAIS NOVATRANS S.A. – NOVATRANS, Universidade do Estado do Rio De Janeiro – UERJ, ICF CONSULTORIA DO BRASIL LTDA. – ICF, Pontifícia Universidade Católica – PUC: 2006.

A04-06 *Sistema de Monitoramento de Descargas Atmosféricas e Incidência em Linhas de Distribuição e Seus Ativos*. RIO GRANDE ENERGIA S.A. – RGE, EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E DE EXTENSÃO RURAL: 2006.

A05-05 *Inspeção Preditiva de Isoladores Através da Emissão do Efeito Corona nas Linhas de Transmissão da ELEKTRO*. CENTRAIS ELEKTRO ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A., CONTREL ENGENHARIA S/S LTDA-CONTREL, FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA – FDTE: 2006.



2005 (10)

A01-05 *Sensoriamento Remoto de Linhas de Transmissão: Detecção, Processamento e Análise Multiespectral*. CENTRAIS HIDRO ELÉTRICAS DO SÃO FRANCISCO – CHESF, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE: 2005.

A02-05 *Sensor a Fibra Óptica para Medição de Correntes Elevadas em Linhas de Transmissão*. EXPANSION TRANSMISSÃO ITUMBIARA MARIMBONDO S.A. – ETIM, FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA: 2005.

A03-05 *Sistema Robotizado para Detecção de Falhas em Linhas de Transmissão Através de Radiografia Digital*. CENTRAIS COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA – COELBA, CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES – CPqD, BB&E CONSULTORIA LTDA: 2005.

A04-05 *Detecção e Modelagem de Radiações Ultravioleta e Infravermelho em Linhas de Transmissão EAT Visando a Minimização de Riscos de Falhas e Desgastes de Equipamentos Eletromecânicos*. TRANSMISSORA SUDESTE NORDESTE S.A. – TSN, CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, ICF CONSULTORIA DO BRASIL LTDA., JRMED CONSULTORIA LTDA., LTS CONSULTORIA E SERVIÇOS LTDA., Pontifícia Universidade Católica: 2005.

A05-05 *Estudo para Aplicação de Sensor Ultra-som como Técnica Preditiva na Manutenção de Subestações e Linhas de Transmissão e Distribuição*. COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO – CELPE, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE: 2005.

A06-05 *Sistema de Inspeção de Linhas de Transmissão com Veículo Aeroestático*. FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. – FURNAS, Universidade de Minas Gerais – UFMG: 2005.

A07-05 *Sistema de Monitoramento de Linhas de Transmissão* – SIMOLT. SISTEMA DE TRANSMISSÃO NORDESTE – STN, CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO CEARÁ – CEFET/CE, CENTRO DE PESQUISAS E QUALIFICAÇÃO TECNOLÓGICA – CPQT: 2005.

A08-05 *Sistema de monitoramento em tempo real para controle de tensionamento em estais de Linhas de Transmissão*. EMPRESA PARANAENSE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA S.A. – ETEP, FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, CONTREL ENGENHARIA S/S LTDA: 2005.

A09-05 *Cadastro georreferenciado de linhas de transmissão e monitoração com sensoriamento remoto*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, CPQD: 2005.

A10-05 *Definição de parâmetros climatológicos para otimização de projetos de Linhas de transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS MATOGROSSENSSES S.A. - CEMAT e FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO A INDÚSTRIA: 2005.

2004 (8)

A01-04 *Monitoração On-line de Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, Universidade Federal do Pará/PA: 2004.

A02-04 *Sistema para Cálculo de Ampacidade em Tempo Real de Linhas de Transmissão*. COPEL TRANSMISSÃO S.A. – COPEL – TRANS, INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO SIMEPAR: 2004.

A03-04 *Desenvolvimento de Robô Autônomo para Inspeção de Linhas de Transmissão*. EMPRESA NORTE DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA S.A. – ENTE, CONTREL ENGENHARIA S/S LTDA – CONTREL, FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – FUSP: 2004.

A04-04 *Protótipo de Sistema Robótico Aéreo para Auxílio à Inspeção de Linhas de Transmissão*. EXPANSION TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA S.A., Universidade de Brasília – UnB: 2004.

A05-04 *Sensor à Fibra Óptica para Medição de Correntes Elevadas em Linhas de Transmissão*. EXPANSION TRANSMISSÃO ITUMBIARA MARIMBONDO S/S – ETIM, FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA: 2004.

A06-04 *Medidor de Amplitude de Vibração a Redes de Bragg para Cabos em Linhas de Transmissão*. EXPANSION TRANSMISSÃO ITUMBIARA MARIMBONDO S/S – ETIM, FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA, Pontifícia Universidade Católica – PUC: 2004.

A07-04 *Veículo Robótico para Inspeção e Execução de Tarefas sobre Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, Universidade de Brasília – UnB, Universidade Federal do Amazonas – UFAM: 2004.

A08-04 *Desenvolvimento de um Robô para inspeção de Linhas de Transmissão*. COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA – CEEE, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul - UFRGS: 2004.

2003 (1)

A01-03 *Sistema de detecção de corrosão (SDC) em cabos de alumínio em Linhas de Transmissão*. LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE, CPQD E IT SOLUTIONS: 2003.



2002 (4)

A01-02 *Desenvolvimento de um Sistema para Análise de Segurança e Monitoração On-line para Previsão de Falhas Estruturais de Torres de Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, Universidade Federal do Pará/PA: 2002.

A02-02 *Sistemas de Monitoramento de Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES – CPQD: 2002.

A03-02 *Sistema de Supervisão de Defeitos em Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Telecomunicação e Processamento de Sinais*. CENTRAIS ELÉTRICAS MATOGROSSENSSES S.A. – CEMAT, Universidade Federal de Itajubá/MG – UNIFEI: 2002.

A04-02 *Sensoriamento de Vibrações de Cabos de Linhas de Transmissão Usando Fibra Óptica e Redes de Bragg*. EXPANSION TRANSMISSÃO ITUMBIARA MARIMBONDO S/S – ETIM, FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA: 2002.

2001 (6)

A01-01 *Desenvolvimento de Tecnologia para Medição de Corrente de Fuga em Tempo Real em Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO: 2001.

A02-01 *Desenvolvimento de um Programa para Prognóstico, Monitoração e Controle de Vibração em Condutores de Linhas de Transmissão da Região Norte*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, Universidade Federal do Pará/PA: 2001.

A03-01 *Desenvolvimento de Sistema de Supervisão de Vandalismo em Isoladores de Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE, INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO: 2001.

A04-01 *Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Corrente e Temperatura em Linhas de Transmissão*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – FUSP: 2001.

A05-01 *Sistema de Serviços em Linhas de Transmissão (SSL) / Manutenção Robotizada de Cabos Guarda*. COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP, ESCOLA POLITÉCNICA DA USP – EPUSP: 2001.

A06-01 *Sensor para verificação da degradação em isoladores poliméricos de Linhas de Transmissão.* COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA-COELBA, FUNDAÇÃO CPqD: 2001.

2000 (1)

A01-00 *Predição de falha em cadeia de isoladores de Linhas de Transmissão.* CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRO-NORTE, Universidade Federal do Pará/PA: 2000.

SNPTEE (14)

2009 (6)

S01-09 FUKUDA, V. S.; MANNALA, M. J.; DE SOUZA, A. M. *Bancada de Ensaio de Deflexão em Isoladores Line-Post – Sua Concepção, Montagem e Realização de Ensaio em Amostras Envelhecidas.* XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S02-09 CARDOSO, P. A. M.; MELLO, D. R.; MURAD, L. T.; SILVEIRA, A. J. M.; AGUIAR, G.; VIVIANI, L. *Isoladores Poliméricos: Experiências da Enersul – Rede de Energia e da Escelsa – Grupo Energias do Brasil no Uso destes Isoladores em suas Linhas de 138 kV.* XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S03-09 BOSZCZOWSKI, R. B.; DE LACERDA, L. A.; DA ROCHA JR., A. V.; DE OLIVEIRA JR., L. M. *Monitoramento de Torres de Transmissão para Avaliação dos Esforços Aplicados à Fundação.* XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S04-09 NOVO, L. R. G. S. L. *Desenvolvimento de Sensor para Identificação de Pontos de Descarga Atmosférica sobre as Estruturas em Todos os Vãos de LT de 230 kV e Construção de Sistema de Análise de Transmissão Remota dos Dados Obtidos através de Enlace de Rádio.* XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S05-09 CLARO, R. T.; PINTO, J. K. C.; CORRERA, F. S.; BARBOSA, L. C.; SOUZA, A.; KIKUSHI, D. Y.; MASUDA, M. *Sistema de Segurança Patrimonial Aplicado às Linhas de Transmissão de Energia Elétrica.* XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

S06-09 DE FREITAS, M. E.; ROSOLEN, J. B.; FLORIDIA, C.; PENZE, R. S.; LI, L. T.; ROMANO, R. B.; BARBOSA, C. F.; NALIN, F. E.; ROSSI, J. A. D.; ALMEIDA, D. *Sistema de Cadastro Georeferenciado com Sensoriamento Remoto de Linhas de Transmissão.* XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

2007 (4)

S01-07 PINHEIRO, M. J. C.; LINS, E. A. *Sistema Robotizado para Detecção de Falhas em Cabos de Linhas de Transmissão através de Radiografia*



Digital com Instalação Energizada. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

S02-07 CLARO, R. T.; RIOS, T. *Monitoramento On-line de Fugas em Ca-deias de Isoladores*. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

S03-07 HORTÊNCIO, C. A.; NETO, J. B. M. A.; AGUIAR, J. G. D.; LEITE, R. L.; COSTA, E. F.; DONI, D. C.; BORIN, E. C.; LONGUI, E. C.; CURADO, P. J. P. *SOMLT – Sistema Óptico para Monitoramento em Tempo Real de Linhas Aéreas de Transmissão*. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

S04-07 GÓIS, N. C.; ROSSI, J. A. D.; NALIN, F. E.; PETRACHIM, J. A.; ANGELINI, J. M. G. *Aplicação de sensor para monitoramento da degradação de isoladores poliméricos de EPDM*: 2007.

2005 (1)

S01-05 GARCIA, R. W. S.; PAIVA, P. O. S.; FERREIRA, L. F. P.; COSTA, E. G.; MELLO, E. G. D. R.; MACIEL, D. *Desenvolvimento de Metodologia para Monitoração de Isoladores Poliméricos*. XVIII SNPTEE. Curitiba/PR: 2005.

2003 (1)

S01-03 CAMPOS, A. T.; PESSOA, A. N.; SARMENTO, J. S.; RÉGIS, JR.; O.; DART, F. C.; DINIZ, M. E.; CAVALCANTI, S. J. G. *Monitoramentos Elé-tricos Dinâmicos de Condutores em Linhas de Feixe Expandido – Experiência, Dificuldades e Resultados – Validação Tecnológica e Confiabilidade Operacional*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

2001 (2)

S01-01 NASCIMENTO, C. A. M.; GIUDICE, E. B.; GUIMARÃES, G.; SOUZA, A. F.; CARVALHO, R. M.; FILHO, O. C. *Aplicação de Tecnologias de Monitoramento em Tempo Real para Aumentar a Capacidade de Trans-missão em LT's Aéreas*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

S02-01 NOGUEIRA, M. M.; AZZAM, G.; SOUZA, F. L. A. *Carregamento de Linhas de Transmissão Aéreas: Dos Critérios Determinísticos à Monitoração em Tempo Real*. XVI SNPTEE. Campinas/SP: 2001.

CIGRÉ (27)

2008 (7)

C01-08 GUERY, D.; WAREING, B.; LILIEN, J. L.; DESTINÉ, J.; GILLS, J. M. *Aeolian Vibrations on High Voltage Lines Comparative Self-Damping as Evaluated on The Field*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C02-08 VAN DER WAL, A.; VONCKEN, R. M. A. M. *Extending the Service of Aged Overhead Line Towers*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C03-08 PIROVANO, G.; CHIARELLO, S.; MEZZANI, D. *Increasing Capacity of Two Italian Lines By The Adoption of Devices For Monitoring Environmental Conditions and Conductors Temperature or By Using High-Temperature Conductors*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C04-08 DRAGER, H. J.; HUSSELS, D.; PUFFER, R. *Development and Implementations of a Monitoring-System to Increase the Capacity of Overhead Lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C05-08 MUHR, M.; PACK, S.; JAUFER, S.; HAIMBL, W.; MESSNER, A. *Experiences with the Weather Parameter Method for the Use in Overhead Line Monitoring Systems*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C06-08 LACROIX, M.; BROUILLETTE, L.; BLAIS, A. *Hydro Quebec's De-icing System: Automated Overhead Line Monitoring and De-icing System*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

C07-08 HELLESO, S.M.; RUNDE, M.; HALSAN, K.; PESTOURIE, J.; SPELLEMAN, C.; COLOMB, B. *Pulse Current Measurements for Condition Assessment of Conductor Joints of Overhead Lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2008.

2006 (6)

C01-06 WEIBEL, M.; IMHOF, K.; SATTINGER, W.; STEINEGGER, U.; ZIMA, M.; BIEDENBACH, G. *Overhead Line Temperature Monitoring Pilot Project*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C02-06 FERNADEZ, R. G.; PELLICER, M. G. *Systems of Monitoring Of Hoisted Growth under Overhead Transmission Lines*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C03-06 MINOURA, F.; ADACHI, K. *Technique for Detecting Corrosion Part of OPGW*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C04-06 TEMINOVA, R.; HINRICHSEN, V.; FREESE, J.; NEUMANN, C.; BEBENSEE, R.; HUDASCH, M.; WEIBEL, M.; HARTKOPE, T. *New Approach To Overhead Line Conductor Temperature Measurement By Passive Remote Surface Acoustic Wave Sensors*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C05-06 LILIE, J. L.; GUÉRARD, S.; DESTINÉ, J.; CLOET, E. *Microsystems Array for Live High Voltage Monitoring*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C06-06 SHIMO, Y. *Development of Power Transmission Line Inspection System by Unmanned Helicopter*. CIGRÉ, Paris, França: 2006.

2004 (2)

C01-04 BJERKAN, L.; LILLEVIK, O.; HELLESO, S. M.; ENGE, S. H.



Measurements on Aeolian Vibrations on a 3 Km Jord Crossing with Fiber-Optic Bragg Grating Sensors. CIGRÉ, Paris, França: 2004.

C02-04 PAKONEN, P.; LATVA-PUKKILA, V.; HAKOLA, T.; BJORKQVIST, M.; BRUNNSBERG, J. *On-Line Partial Discharge Monitoring of 110 kV and 20 kV Covered Conductor Lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2004.

2002 (4)

C01-02 KAWAHARA, A.; OOURA, K.; MASAOKA, N. *Zinc Galvanizing Deterioration Diagnosis Of Steel Towers Using VTR Image Analysis Technology.* CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C02-02 BOOT, H. L. M.; DE WILD, F. H.; VAN DER WEY, A. H.; BIEDENBACH, G. *Overhead Line Local And Distributed Conductor Temperature Measurement Techniques, Models an Experience at TZH.* CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C03-02 LAGO, J.; BÁRTA, B.; SAMAS, J. *Characterization of Climate Changes In The Environment By Monitoring Parameters Of Overhead Optical Cables On Overhead Lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C04-02 VISLER, T.; NOLDEN, W.; BOLKE, D.; FINK, N. *Service Monitoring System for Intrinsic Temperature Measurement on Overhead Phase Conductors.* CIGRÉ, Paris, França: 2002.

2000 (2)

C01-00 MEKHANDOSHIN, B. I.; MEDVEDEV, YE. M.; RIVKIN, L. YU.; SHKAPTSOV, V. A.; YAVORSKY, YE. A.; DEMENTYEV, YU. A.; URWIN, R. *Use Of an Airborn Laser Locator To Improve Availability and Quality Of Maintenance Of Overhead Lines.* CIGRÉ, Paris, França: 2002.

C02-00 SEPPA, T. O.; DAMSGAARD-MIKKELSEN, S.; CLEMENTS, M.; PAYNE, R.; COAD, N. *Application of Real Time Thermal Rating for Optimizing Transmission Line Investment and Operating Decisions.* CIGRÉ, Paris, França: 2000.

1998 (6)

C01-98 POPPOLANSKY, F.; KRUIK, J.; LEHKY, P.; LEHKY, P.; SPACEK, Z.; HRABANEK, J.; LAGO, J. *Ice Monitoring At Stand Studnice. Tuned Vibration Control of Overhead Line Conductors.* CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C02-98 ROGIER, J.; GOOSSENS, L.; WOLF, M.; VAN OVERMEERE, A.; LILLEN, J. L.; LUGENTZ, L. *Experience With Occasional And Permanent Measurements On Belgian Overhead Lines.* CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C03-98 FIKKE, S. M.; HUSE, J.; ROLFSENG, L.; SCHEI, A.; LARSEN,

V. *Remote Monitoring Of Environmental Impacts On Transmission Lines On Norway*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C04-98 SEPPA, T. O.; ADAMS JR., H. W.; DOUGLASS, D. A.; COAD, N.; EDRIS, A.; OLIVIER, P.; THRASH JR., F. R. *Use Of On-Line Tension Monitoring For Real-Time Thermal Ratings, Ice Loads, And Other Environmental Effects*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C05-98 HARDY, C.; BRUNELLE, J.; BEAUSÉJOUR, Y.; LANOIE, R.; LAFLAMME, J. N.; BELLERIVE, J. P. *Monitoring The Effects Of Environmental Factors On Hydro-Quebec's Overhead Lines*. CIGRÉ, Paris, França: 1998.

C06-98 ORMIN, J.; BARTSCH, J. *Hotline Inspection and Control of Joints*. Paris, França: 1998.

INPI (5)

2006 (1)

I01-06 NASCIMENTO, C. A. M. *Sistema Medidor de Variação de Flechas em Condutores de Linhas Aéreas de Transmissão*. MU8602914-2U: 2006.

2005 (1)

I01-05 HORBATIUK, B. V. D.; FILIPPIN, C. G.; STENZEL, J. N.; BRITTES, J. L.; SCARASSATI, P. C.; NETO, R. A. P.; LEVISKI, T. F. *Sistema de Detecção de Rompimento de Condutor Elétrico em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*. PI0503502-3ª: 2005.

2004 (2)

I01-04 PEIXOTO, M. S. *Sistema de Monitoramento de Linhas de Distribuição e Linhas de Transmissão de Alta Tensão*. BMU8400540 (U): 2004.

I02-04 DO CARMO, L. S.; MARQUES, C. T.; MAGALHÃES, F. J. *Sistema de Monitoramento de Rompimento de Cabos Condutores de Linhas de Transmissão*. BRPI0404388 (A): 2004.

2003 (1)

I01-03 SCIAMMRELLA, S. L.; VIVEKANADA, R.; LUIZ, A. M. *Dispositivo Para Tele-Monitoração de Pontos Críticos de Altura Cabo-Solo de Linhas de Transmissão*: 2003.



IEEE (10)

2009 (4)

E01-09 PAN, L.; XIAO, X. *Image Recognition for On-line Vibration Monitoring System of Transmission Line*. IEEE: 2009.

E02-09 OLIVEIRA, S. C.; FONTANA, E. *Optical Detection of Partial Discharges On Insulators Strings Of High-Voltage Transmission Lines*. IEEE: 2009.

E03-09 ZUO, Q.; XIE, Z.; GUO, Z.; SUN, D. *The Obstacle Recognition Approach for a Power Line Inspection Robot*. IEEE: 2009.

E04-09 ADAMI, J. F.; SILVEIRA, P. M.; MARTINEZ, M. L. B.; PEREZ, R. C.; DALLBELLO, A. C. *New Approach to Improve High Voltage Transmission Line Reliability*. IEEE: 2009.

2008 (2)

E01-08 OLIVEIRA, S. C.; FONTANA, E.; CAVALCANTI, F. J. M. M. *Real Time Monitoring Of the Leakage Current of 230 kV Insulator Strings under Washing*. IEEE: 2008.

E02-08 PARK, J-Y.; LEE, J-K.; CHO, B-H. *Development of Robot Mechanism for Live-line Suspension Insulator Strings in 345 kV Power Transmission Lines*.

2007 (3)

E01-07 JI, Y.; TAO, X.; JIANJUN, T.; LAN, X.; ZHAN-LONG, Z. *Online Detection System for Contaminated Insulators Based on Ultra-Violet Pulse Method*. IEEE: 2007.

E02-07 PARK, J-Y.; LEE, J-K.; CHO, B-H.; OH, K-Y. *Development of Inspection Robot System for Live-line Suspension Insulator Strings in 345 kV Power Transmission Lines*.

E03-07 WILSON, S. M.; HURLEBAUS, S. *Power Line Monitoring*. IEEE: 2007.

2006 (1)

E01-06 MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. *LineScout Technology: Development of an Inspections Robot Capable of Clearing Obstacles While Operating on a Live Line*. IEEE: 2006.



CAPÍTULO 12

Aspectos de Meio Ambiente Relacionados à Implantação de Linhas de Transmissão

Alexandre Maduro-Abreu



PREFÁCIO

Evanise Neves de Mesquita

Foi com muita satisfação que recebi o convite para elaborar o prefácio do capítulo de meio ambiente do projeto INOVALT. Dentre os principais motivos para minha satisfação, estão a qualidade do projeto apresentado e o fato de eu ter podido participar, na época como colaboradora do Grupo TAESA, ex-Grupo TERNA, de sua gênese deste projeto na área de Pesquisa e Desenvolvimento do Grupo, e, portanto, ser sua entusiasta.

Escolher ou definir bons projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na área de meio ambiente tem sido uma tarefa difícil, pois a oferta de propostas com qualidade e pertinência é pequena. A interdisciplinaridade da área ambiental é um fator diferencial para os projetos de P&D nesta área. Os especialistas dos diversos aspectos socioambientais, em sua grande maioria, parecem ainda não estar totalmente familiarizados com a estrutura do setor e o potencial de disponibilidade de recursos para P&D. Por isso, este projeto é tão importante e oportuno. Além de estabelecer uma hierarquização dos tópicos de maior interesse, segundo a visão de especialistas do próprio setor elétrico brasileiro, divulga para as diversas áreas de conhecimento envolvidas desde as fases de estudos, planejamento, projeto e operação de sistemas de transmissão, o enorme potencial de desenvolvimento de ferramentas e metodologias que a Lei 9.991, lei de P&D ANEEL, representa para o setor elétrico.

As questões ambientais envolvidas em projetos lineares, tais como linhas de transmissão, rodovias, gasodutos etc, são bastante diversas daquelas envolvidas em projetos de usinas hidrelétricas, por exemplo. Há que se cuidar de afetar o mínimo o meio ambiente, porém sabendo de antemão que é uma tarefa muito complexa e que envolve, além de competência técnica, um enorme conhecimento geral sobre as tecnologias de transmissão e as possíveis



alternativas tecnológicas e metodológicas. Em geral, em projetos de sistemas de transmissão, existe um razoável conjunto de alternativas para o projeto de linhas de transmissão que vão desde as alternativas de traçado, evitando cortar áreas de preservação ambiental e terras indígenas, mesmo que em áreas de influência indireta, até soluções tecnológicas, como utilização de torres mais altas para cruzar matas virgens sem desmatamento.

No setor elétrico, a preocupação com o meio ambiente, como elemento a ser considerado no projeto de linha de transmissão e subestação, sempre foi muito presente. Talvez, mais do que em outros setores produtivos, o setor elétrico depende diretamente do meio ambiente na sua cadeia de produção, no caso deste estudo, especificamente a transmissão e distribuição. No início, a atenção era principalmente para o impacto que o meio ambiente causava às instalações do sistema de transmissão e, posteriormente, também ao impacto que as instalações causavam ao meio ambiente. De fato, há uma interação muito forte entre as instalações de transmissão e o meio ambiente, como de resto, em toda obra de engenharia, mas neste caso impactando a segurança, disponibilidade e a operação do sistema de transmissão.

Ao longo dos anos, foram feitos investimentos significativos, em especial pelas empresas concessionárias de serviços de transmissão, no desenvolvimento de metodologias de coleta e monitoramento de dados ambientais (climatológicos, características físicoquímicas do solo etc) visando aumentar a segurança, qualidade dos projetos e a durabilidade dos componentes de sistemas de transmissão. Entretanto, analisando a evolução nos últimos 10 anos da questão do impacto ambiental e sua inserção como fator decisório no setor elétrico, é possível perceber o quanto foi importante o investimento em estudos e pesquisas feito ao longo destes anos.

Neste contexto, o *CIGRÉ – International Council on Large Electric Systems* – vem também evoluindo e se adaptando às demandas do setor de elétrico mundial e tem sido um ator de enorme importância para o desenvolvimento da engenharia do setor elétrico. Na área de meio ambiente, a atuação do CIGRÉ é relativamente nova (2004), principalmente se considerarmos o tempo de existência do CIGRÉ (1960) e as suas áreas tradicionais de atuação. A criação do comitê de estudo com foco na área de meio ambiente (Desempenho Ambiental de Sistemas – CE-C3) foi fruto de uma ampla revisão e de um planejamento estratégico muito abrangente. O CIGRÉ-Brasil adota, sempre que for de interesse também do setor elétrico brasileiro, a mesma estrutura do CIGRÉ, isto é, Comitês de Estudo e grupos de trabalho espelho da estrutura do CIGRÉ.

A maior dificuldade no desenvolvimento dos trabalhos e objetivos deste Comitê de Estudo, no âmbito do CIGRÉ-Brasil, tem sido conquistar partici-

pantes de áreas de formação diferentes da engenharia que, em geral, desconhecem o CIGRÉ e sua atuação. Mesmo nas empresas do setor, nas áreas específicas de meio ambientais, os especialistas desconhecem o CIGRÉ e seu potencial como fonte de informação, conhecimento e fórum de discussão. Neste sentido, o CE-C3 do CIGRÉ-Brasil tem buscado, por meio de seminários e *workshops* sobre o ambiente e responsabilidade social, e de indicadores ambientais, ter contato com este público multidisciplinar. O Seminário de Meio Ambiente e Responsabilidade do Setor Elétrico (SMARS), que em 2010 realizou sua quarta edição, tem tido bastante sucesso neste aspecto.

O CIGRÉ não desenvolve pesquisa e sim estudos baseados na experiência e estudos de casos das empresas do setor elétrico mundial, representadas ou não em seus comitês. Para desenvolver estes estudos, os Comitês de Estudos (CEs) organizam-se em grupos de trabalhos, tanto nos comitês de estudos internacionais como brasileiros, para elaborar os relatórios e produtos propostos. O grupo de trabalhos tem um prazo pré-definido para realizar o estudo ou produzir os produtos especificados em termos de referência formalmente aprovados, os resultados são publicados como brochura e recebem ampla divulgação no CIGRÉ. Os assuntos a serem estudados nos grupos de trabalho são propostos pelos membros do comitê e discutidos no Comitê Técnico, composto pelos coordenadores de todos os comitês, e que considera os interesses das empresas, entidades e órgãos do setor elétrico dos diversos países membros no CIGRÉ. Pode-se dizer que, apesar de não ser adotada uma metodologia científica, como é o caso do projeto INOVALT, os temas propostos passam pelo crivo de diversos especialistas do setor elétrico internacional e que objetivam atender à demanda de conhecimento, técnicas e metodologias destes países.

Hoje existem oito grupos de trabalho no comitê de estudo CE-3 do CIGRÉ-Brasil. Os coordenadores destes grupos de trabalho são membros do CE C3 e representantes brasileiros no respectivo Grupo de Trabalho do CIGRÉ Internacional. Os temas dos grupos de trabalho ativos são, atualmente, Campos eletromagnéticos e a saúde, Indicadores de desempenho de desenvolvimento sustentável, Prática das concessionárias em desenvolvimento sustentável, Estratégias de comunicação, Impacto ambiental da geração distribuída, Avaliação ambiental estratégica, Custos externos para linhas de transmissão e Gerenciamento sustentável de corredores. Alguns destes grupos de trabalho já encerraram seus trabalhos que, inclusive, foram publicados recentemente. Para a comunidade internacional participante do CIGRÉ, estes são os tópicos de interesse no momento. Alguns destes grupos contam com a participação de membros de outro Comitê de Estudo, como



é o caso do Grupo de trabalho sobre Impacto ambiental da geração distribuída, do qual participa um membro do CE sobre Geração distribuída.

Entendo que este projeto INOVALT intenciona executar mais algumas fases para aplicação da metodologia desenvolvida. Do ponto de vista do CE C3, o projeto é altamente relevante e define uma direção para a elaboração de propostas de P&D na área de meio ambiente. Parabenizo a todos que participaram do projeto que, ressaltado, foi uma grande contribuição para o cenário de P&D ambiental no Brasil.

Aspectos de Meio Ambiente Relacionados à Implantação de Linhas de Transmissão

Alexandre Maduro-Abreu

Objetivo

Este capítulo apresenta o resultado da prospecção tecnológica realizada com foco no tema *Meio Ambiente*.

Palavras-chave

Linhas de transmissão, corredores e traçados de linhas de transmissão, revestimentos de torres, impactos socioambientais, valoração econômica, campos magnéticos, aspectos climáticos, biodiversidade, erosões, corrosões, alteamento de torres, perfilamento a *laser*, sensoriamento remoto, licenciamento ambiental, meteorologia, mapeamentos, gestão ambiental, ciclo de vida, ISO 14001, georreferenciamento.

Pesquisas Realizadas

CAPES

Foram analisadas 11 teses no total, sendo sete dissertações de mestrado acadêmico, três de mestrado profissionalizante e uma tese de doutorado, distribuídas de acordo com os seguintes indicadores:



ANO DE PUBLICAÇÃO:

2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999
1	4	-	1	2	1	1	-	1

UNIVERSIDADES: ⁽¹⁾

- Universidade Federal do Amazonas (2).
- Universidade de Brasília (2).
- Universidade de São Paulo (2).
- Universidade Federal de Pernambuco (1).
- Universidade de Mogi das Cruzes (1).
- Universidade Federal Fluminense (1).
- Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (1).
- Universidade Federal de Santa Catarina (1).

Total de 8 universidades.

ÁREAS DO CONHECIMENTO: ⁽¹⁾

- Engenharia Elétrica (1).
- Ciências Biológicas (1).
- Economia (1).
- Geografia (1).
- Química (1).
- Geologia (1).
- Engenharia Florestal (1).

Programa de P&D da ANEEL

Foram analisados 16 projetos de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002
-	-	2	4	4	-	5	1

1) Entre parênteses – número de teses relacionadas.

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2000	–
2001	–
2002	818.679,00
2003	1.936.406,00
2004	–
2005	1.294.293,00
2006	2.527.712,00
2007	2.238.750,00
2008	–
2009	–
TOTAL	8.815.840,00

EMPRESAS PROPONENTES:⁽²⁾

- Centrais Elétricas do Norte – ELETRONORTE (6).
- Eletrosul Elétricas S.A. – ELETROSUL (2).
- Companhia Energética do Ceará – COELCE (2).
- Copel Transmissão S.A. – COPEL (1).
- Empresa Regional de Transmissão de Energia S.A. – ERTE (1).
- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP (1).
- Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF (1).
- Furnas Elétricas S.A. – FURNAS (1).
- Elétricas Santa Catarina S.A. – CELESC (1).
- Elétricas Matogrossense S.A. – CEMAT (1).
- CEMIG de Distribuição S.A. – CEMIG (1).
- Empresa Amazonense de Transmissão de Energia S.A. – EATE (1).
- Expansion Transmissão Itumbiara Marimbiondo S.A. – ETIM (1).

Total de 13 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS:⁽²⁾

- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (5).
- Sociedade Educacional Ideal - FACI (1).
- Universidade de Brasília (1).
- Fundação Sousândrade (1).
- Universidade Federal do Pará/Centro de Ensino Universitário do Pará/

2) Entre parênteses – número de programas relacionados.



- Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa – FAPESP (1).
- Universidade Federal do Maranhão (1).
 - Universidade Federal de Tocantins (1).
 - Universidade Federal da Amazônia/UFPA/Fundação de Apoio à Pesquisa FUNPEA (1).
 - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL (1).
 - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (1).
 - Instituto Hidroambiental/Universidade Federal do Ceará/Instituto de Desenvolvimento de Fruticultura (1).
 - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (1).
 - Fundação de Pesquisa e Assessoramento a Indústria – FUPAI (1).
 - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Minas Gerais – IPT (1).
 - Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo – FUSP (1).
- Total de 21 entidades.**

SNPTEE

Foram analisados oito informes técnicos apresentados no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DO SEMINÁRIO – ANOS ÍMPARES:

2009	2007	2005	2003	2001
1	1	1	4	1

EMPRESAS REPRESENTADAS:⁽³⁾

- Furnas Centrais Elétricas S.A. (3).
- COPEL Transmissão S.A. (3).
- Light Serviços de Eletricidades S.A. (1).
- AyaCon Consultores Ltda. (1).
- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1).
- ELETRONORTE (1).
- ENGETRAN (1).
- Atol Topografia (1).

Total de 8 empresas.

3) Entre parênteses – número de informes relacionados.

CIGRÉ

Foram analisados quatro trabalhos apresentados durante as sessões plenárias do CIGRÉ, realizadas na cidade de Paris – França, de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE REALIZAÇÃO DA BIENAL – ANOS PARES:

2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998
3	-	-	-	-	-	-	-	1

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Áustria (1).
- Brasil (1).
- França (1).
- Itália (1).
- México (1).

Total de 5 países.

INPI – Nenhuma patente selecionada.

IEEE

Foram analisados três trabalhos apresentados durante os eventos patrocinados pelo IEEE, em âmbito mundial.

ANO DE PUBLICAÇÃO:

2006	2003
2	1

PAÍSES REPRESENTADOS:⁽⁴⁾

- Brasil (1).
- Estados Unidos (1).
- República das Ilhas Seychelles (1).

Total de 3 países.

4) Entre parênteses – número de trabalhos relacionados.



Temas para Futuros Desenvolvimentos

Com base na bibliografia apresentada, procuraram-se identificar quais os itens que carecem de maior aprofundamento em termos de estudos e/ou pesquisas complementares, de forma que se possa obter um maior retorno em termos de aumento da confiabilidade das linhas de transmissão, aumento dos níveis de carregamento, redução dos custos de implantação e redução dos impactos ambientais.

Em relação às análises das condições socioambientais e propostas de soluções dos respectivos impactos nas linhas de transmissão de energia, os principais eixos de pesquisa foram:

- Desenvolvimento de revestimento para torres das linhas de transmissão resistente a microorganismos.
- Definição de parâmetros climatológicos para otimização de projetos de linhas de transmissão.
- Definição de parâmetros geotécnicos para otimização de projetos de linhas de transmissão.
- Metodologia de avaliação espacial para mapeamento de variáveis climáticas.
- Elaboração de sistemas de produção para aproveitamento das áreas sob as linhas de transmissão para evitar queimadas provocadas por agricultores.
- Elaboração de sistema georreferenciado para estabelecer relações entre aspectos ambientais e danos nos postes.
- Elaboração de sistema antipouso de pássaros nas linhas de transmissão, a partir de ondas mecânicas de áudio e ultrassom.
- Estudo da concentração de aerossóis sobre a estrutura elétrica de nuvens de tempestade e as características das descargas elétricas para especificação dos equipamentos componentes das linhas de transmissão.
- Elaboração de metodologia de combate às erosões da base de torres de linhas de transmissão.
- Elaboração de modelo matemático para classificação de corrosividade atmosférica.
- Desenvolvimento de métodos eletroquímicos para avaliação de estruturas enterradas.

Com relação à identificação, análise e propostas de soluções dos impactos socioambientais provocados pelas linhas de transmissão de energia, os principais eixos de pesquisa foram:

- Elaboração de metodologias de gestão ambiental - baseadas na Norma NBR ISO 14001 - para que seja incorporada no processo de gestão das linhas de transmissão, desde o projeto à operação.
- Utilização da metodologia de Análise de Ciclo de Vida para tomada de decisões ambientais com vistas à implementação de linhas de transmissão.
- Elaboração de metodologias multicritérios para definição de corredores e traçados de linhas de transmissão.
- Utilização do *Google Earth* para estudo de traçados de linhas de transmissão.
- Utilização de sensoriamento remoto orbital e fotografias a *laser* para gestão das linhas de transmissão sob aspectos ambientais.
- Utilização de Perfilamento a *Laser* associado a *software PLS-CADD* para definição de traçados de Linhas de transmissão.
- Elaboração de normatizações técnicas e institucionais para elaboração de projetos e traçados de linhas de transmissão.
- Alteamento de torres das linhas de transmissão para diminuição de impactos ambientais.
- Estudo sobre os impactos dos campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão na saúde de populações e biodiversidade expostas.
- Quantificação econômica da supressão de vegetação para construção de linhas de transmissão.

Comentários Gerais

Com Relação aos Investimentos dos Projetos de P&D

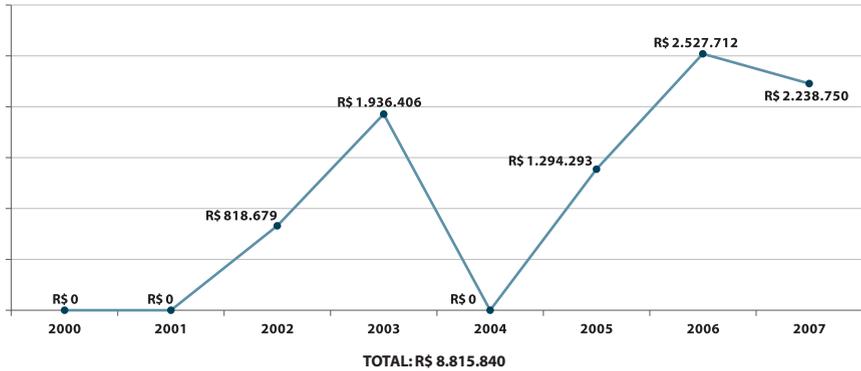
Os investimentos dos projetos de P&D relacionados ao tema em pauta foram levantados em pesquisa realizada no *site* da ANEEL www.aneel.gov.br. O valor total aplicado, entre os anos de 2002 e 2007, foi de R\$ 8.815.840,00, o que corresponde a 15,07% do investimento total aplicado neste mesmo período nos projetos de P&D relacionados a linhas de transmissão.

O ano de 2006 foi o de maior aplicação, com R\$ 2.527.712,00. A evolução dos investimentos deu-se como apresentado no gráfico abaixo.



EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM P&D – MEIO AMBIENTE

Fonte: Programa de P&D da ANEEL



Com Relação aos Informes Técnicos

Nas diferentes fontes de pesquisas relacionadas ao tema em pauta, foram selecionados 42 informes técnicos. A fonte ANEEL forneceu o maior número, com 16 trabalhos. O gráfico abaixo apresenta a distribuição destes informes, por fonte de pesquisa.

O gráfico a seguir apresenta a composição, por ano, e por fonte de pesquisa. O ano de 2006 foi aquele que apresentou o maior número de informes no total de 13.

NÚMERO DE INFORMES POR ANO/FONTE – MEIO AMBIENTE

Fonte	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Total por fonte
CAPEL	-	1	-	1	1	2	1	-	4	1	-	-	11
ANEEL	-	-	-	-	1	5	-	4	4	2	-	-	16
SNPTEE	-	-	-	1	-	4	-	1	-	1	-	1	8
CIGRÉ	1	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	4
INPI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
IEEE	-	-	-	-	-	1	-	-	2	-	-	-	3
Total por ano	1	1	0	2	2	12	1	5	13	4	0	1	
TOTAL DE INFORMES: 42													

Referências

CAPES – Teses de Universidades (11)

2007 (1)

T01-07 – MARTINS, A. *O emprego de produtos cartográficos no estudo de impacto ambiental em linhas de transmissão de energia elétrica*. Tese (Mestrado em Economia) – Universidade de Federal de Santa Catarina, Blumenau/SC: 2007.

2006 (4)

T01-06 – AUXILIADORA, M. *Valoração econômica dos impactos ambientais causados pelas linhas de transmissão: o caso da linha de transmissão Norte/Sul*. Tese (Mestrado em Economia) – Universidade de Brasília, Brasília/DF: 2006.

T02-06 – GARCIA, M. F. *Ocupação do território e impactos ambientais: o papel dos grandes projetos de eletrificação na Amazônia*. Tese (Mestrado em Economia) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro/RJ: 2006.

T03-06 – OLIVEIRA, W. R. C. *Desenvolvimento de um biocida para linhas de torres de alta tensão*. Tese (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes/SP: 2006.

T04-06 – SILVA, I. M. P. F. *Impactos sócio-ambientais da implantação de linhas de transmissão de energia elétrica sobre as comunidades extrativistas do babaçu no Maranhão*. Tese (Mestrado em Gestão Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE: 2006.

2004 (1)

T01-04 – VICTORINO, W. F. *Inventário de ciclo de vida do sistema de transmissão de energia elétrica*. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo/SP: 2004.

2003 (2)

T01-03 – ARMOND, J. P. *Análise das alternativas para minimizar a supressão da vegetação, comparadas ao modelo tradicional de construção de linhas de transmissão de energia elétrica*. Tese (Mestrado em Ciências do ambiente) – Universidade do Amazonas, Manaus/AM: 2003.

T02-03 – SILVA, F. S. *Proposta de metodologia de sistema de gestão ambiental para linhas de transmissão na região amazônica*. Tese (Mestrado em Ciências do ambiente) – Universidade do Amazonas, Manaus/AM: 2003.



2002 (1)

T01-02 – SILVA, V. C. *Planejamento do sistema de gestão ambiental de linhas de transmissão aéreas localizadas em área serrana com unidade de conservação*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo/SP: 2002.

2001 (1)

T01-01 – ABREU, A. R. *Economia da supressão da vegetação em linhas de transmissão no estado de Roraima*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília/DF: 2001.

1999 (1)

T01-01 - BOAS VILAS, W. C. *Campos magnéticos de frequência industrial: evidências de possíveis efeitos biológicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG: 1999.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (16)

2007 (2)

A01-07 *Novos critérios para inspeção e análise de risco de falhas de postes de madeira em Linhas de transmissão*. CEMIG e IPT: 2007.

A02-07 *Proposta para utilização de culturas agrícolas no controle de vegetação invasora sob as Linhas de transmissão*. EMPRESA REGIONAL DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA S.A. E UNIVERSIDADE FEDERAL DA AMAZÔNIA/UFPA/FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA – FUNPEA: 2007.

2006 (4)

A01-06 *Avaliação da exposição a campos eletromagnéticos de baixa frequência gerados em linhas de transmissão sobre a biodiversidade da Amazônia*. ELETRONORTE E UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ/CENTRO DE ENSINO UNIVERSITÁRIO DO PARÁ/FUNDAÇÃO DE AMPARO E DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA – FADESP: 2006.

A02-06 *Unidades experimentais e demonstrativas de manejo de caatinga sob Linhas de transmissão*. COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO - CHESF E INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2006.

A03-06 *As potencialidades socioeconômicas ambientais de atividades sus-*

tentáveis para as áreas de servidão das Linhas de transmissão. ELETRO-NORTE E UFT: 2006.

A04-06 *Estudos e desenvolvimento de obras de contenção de baixo custo para combate à erosão do solo de base de torres de Linhas de transmissão.* ELETRONORTE E SOCIEDADE EDUCACIONAL IDEAL - FACI: 2006.

2005 (4)

A01-05 – *Desenvolvimento de dispositivo repelente automático de pássaros para Linhas de transmissão.* COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA E LACTEC: 2005.

A02-05 – *Impacto de aerossóis provenientes de queimadas sobre descargas atmosféricas e as Linhas de transmissão no estado do Mato Grosso.* ELETRO-SUL: 2005.

A03-05 – *Biologia reprodutiva e monitoramento de aves Curicacas (*Theristicus caudatus*) em Linhas de transmissão.* ETIM e Universidade de Brasília – UnB: 2005.

A04-05 – *Desenvolvimento de modelo multicritérios na seleção de traçados para rotas de Linhas de transmissão com base em aspectos técnicos, ambientais, sócio-econômicos e de geoprocessamento.* CELESC e Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC: 2005.

2003 (5)

A01-03 – *Efeitos de implantação de linhas de transmissão em regiões densamente povoadas.* COELCE, INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO – LACTEC: 2003.

A02-03 – *Desenvolvimento de sistema de informação para controle ambiental nas faixas de servidão de linhas de transmissão.* EATE, FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO: 2003.

A03-03 – *Modelo de tomada de decisão para escolha de corredor de linhas de transmissão envolvendo aspectos ambientais.* FURNAS: 2003.

A04-03 – *Desenvolvimento de metodologia para minimizar o impacto da corrosividade sobre Linhas de transmissão.* LACTEC: 2003.

A05-03 – *Estudo antropológico sobre a presença de comunidades em faixas e servidão de linhas de transmissão da Eletronorte.* ELETRONORTE E FUNDAÇÃO SOUSÂNDRADE: 2003.

2002 (1)

A01-02 – *Manejo sustentável de vegetação de mata Atlântida sob linhas de transmissão.* COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ – COELCE,



INSTITUTO HIDROAMBIENTAL/UNIVERSIDADE FEDERAL DO
CEARÁ/INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO DE FRUTICULTURA:
2002.

SNPTEE (8)

2009 (1)

S01-07 – SCHAFHAUSER, M.; MIRANDA, T.; PRESTES, E.; BRAS-
SAC, N.; MULLER, I.; PEREIRA, P.; SANTOS, J. *Relatório ambiental simpli-
ficado (RAS) como ferramenta para o licenciamento de linhas de transmissão*.
XX SNPTEE. Recife/PE: 2009.

2007 (1)

S01-07 – ARAUJO, L. *Novas tecnologias para estudo de corredores e tra-
çados de Linhas de transmissão*. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro/RJ: 2007.

2005 (1)

S01-05 – SANTOS F.; BUBNIAK, M.; HOFFMAN, J. N. *Uso conjugado
de perfilamento a laser e software de projetos de Linhas de transmissão visando
à minimização dos impactos ambientais*. XVIII SNPTEE. Curitiba. PR: 2005.

2003 (4)

S01-03 – SEGOND, C.; CASTRO, M.; RISSIN, D. *Os novos empreende-
dores precisam conhecer a influência da recente regulamentação do setor elé-
trico na viabilidade econômica e ambiental dos projetos*. XVII SNPTEE.
Uberlândia/MG: 2003.

S02-03 – ARAUJO, L. *Redução dos impactos sócio ambientais nos em-
preendimentos de Linhas de transmissão da fase do projeto à construção e ope-
ração*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

S03-03 – SALIBA, A.; FERNANDES, J.; RAYOL, C. *Linhas de transmis-
são e os requisitos ambientais: a experiência da Eletronorte*. XVII SNPTEE.
Uberlândia/MG: 2003.

S04-03 – MATZENBACHER, S.; BALDO, D.; LUNES, G.; MARTINS,
V. *Análise dos custos de medidas de redução de impacto de linhas aéreas de
transmissão sobre vegetação nativa*. XVII SNPTEE. Uberlândia/MG: 2003.

2001 (1)

S01-01 – SOUZA, F. W.; AZZAM, G.; NOGUEIRA, M.; SAMICO, R.;

FRANÇA, A.; MENEZES, A.; YAMAGUTI, K. *Técnicas de transferência espacial de variáveis climáticas como ferramenta objetiva na otimização dos sistemas elétricos de potência – um cotejamento técnico-econômico no sistema ligh.* XVI SNPTEE. São Paulo/SP: 2007.

CIGRÉ (4)

2006 (3)

C01-06 – KERSTING, A.; MULLER, M.; HOFFMANN, J. *Transmission line up-rating design using survey data from airborne lidar.* CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C02-06 – BUFFIERE, G.; DEVELEY, M. *The geographical information system used at RTE for asset management mapping case of vegetation management software.* CIGRÉ, Paris, França: 2006.

C03-06 – VILLA, S.; ZANINI, N.; LEVA, M. *A 400 kV OHTL in México facing particular reliability environmental and design problems.* CIGRÉ, Paris, França: 2006.

1998 (1)

C01-98 – EGGER, H.; LUGSCHITZ, H. *Experience with a 380 kV, camouflage line.* CIGRÉ, Paris, França: 1998.

INPI – Nenhuma patente selecionada.

IEEE (3)

2006 (2)

E01-06 – OLIVEIRA, M.; SANTOS, S.; BERNARDO, A. *Social responsibility of transmission and distribution business.* IEEE: 2006.

E02-06 – GILL, R.; JEWELL, W. *Landscape features in transmission line routing.* IEEE: 2006.

2003 (1)

E01-03 – BARNERJEE, S.; VISHWAKARMA, S. *Equilibrium between environmental protection and T&D of electric utility.* IEEE: 2003.



CAPÍTULO 13

Hierarquização dos Temas Mais Promissores

Alexandre Maduro-Abreu
Leonardo Brant Murça
Sergio de Oliveira Frontin
Vinícius Barros Rêgo



PREFÁCIO

Maria Elenita M. Nascimento

O aumento dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento não garante os resultados de produtividade e desenvolvimento econômico. Isto é uma tese em consolidação. Investimentos em ciência e tecnologia voltados para produtos e processos inovadores precisam ser planejados, ter visões estratégicas que incorporem as condições para a promoção da inovação, de modo a transformar seus resultados em processos, produtos e serviços.

Nas últimas décadas, os estudos prospectivos, métodos e técnicas de previsão e outras formas de pensar o futuro não estavam presentes na agenda do planejamento, razão por que o termo “estudos do futuro” era pouco conhecido e utilizado ou mesmo evitado.

Considerando esses aspectos, é que estudiosos do assunto e formuladores de políticas reposicionaram a área de planejamento estratégico como um campo que está se deslocando da abordagem tradicional para enfoques mais dinâmicos, que incorporam as possibilidades trazidas pelos estudos de futuro ou de prospecção.

Este livro é um importante produto de prospecção tecnológica e inovações relevantes para o futuro da transmissão de eletricidade no país e que reforça a importância de políticas públicas destinadas à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico do setor.

O objetivo deste capítulo foi utilizar o método DELPHI para hierarquizar os temas mais promissores em desenvolvimento de projetos de pesquisa e desenvolvimento em linhas de transmissão. O método DELPHI procura a efetiva utilização do julgamento intuitivo, com base nas opiniões de especialistas, que é refinado em um processo interativo e repetido até se alcançar o consenso.



Para desenvolvimento do estudo, foram inicialmente selecionados 98 temas, identificados por meio de prospecções bibliográficas realizadas em fontes de informação relacionadas a linhas de transmissão. Visando facilitar esta hierarquização e após a identificação desses temas, eles foram classificados em 11 áreas.

Foram utilizadas duas rodadas de consulta aos especialistas. A primeira rodada foi aplicada presencialmente com especialistas que participaram do Seminário sobre “Inovações Tecnológicas em Linhas de Transmissão”, ocorrido em Brasília e teve como objetivo estabelecer a hierarquização dos temas mais promissores para a realização de projetos de P&D. A segunda rodada foi realizada via *internet*, após a análise e consolidação das respostas junto aos especialistas inscritos no Seminário, tendo sido selecionados 15 temas. Para cada tema, foram apresentadas cinco perguntas específicas, em que os especialistas consultados deveriam indicar a pontuação entre o impacto muito alto (5) e nenhum impacto (0).

Ao final, os autores apresentam a relação dos cenários criados para simular a robustez dos temas e como resultado da análise apresentam os cinco itens que se mostraram mais robustos. O capítulo exhibe, de forma objetiva e sistemática, os aspectos relevantes na utilização do método e contribui, de maneira efetiva, para uma visão de futuro da transmissão de eletricidade no país.

Vale ressaltar que a liderança global em qualquer campo depende, cada vez mais, de uma mudança em direção ao uso efetivo e inovador da gestão tecnológica. A chave para a liderança reside no gerenciamento de processos de alimentação de ideias criativas e na geração de novas tecnologias.

Hierarquização dos Temas Mais Promissores

Alexandre Maduro-Abreu
Leonardo Brant Murça
Sergio de Oliveira Frontin
Vinicius Barros Rêgo

Objetivo

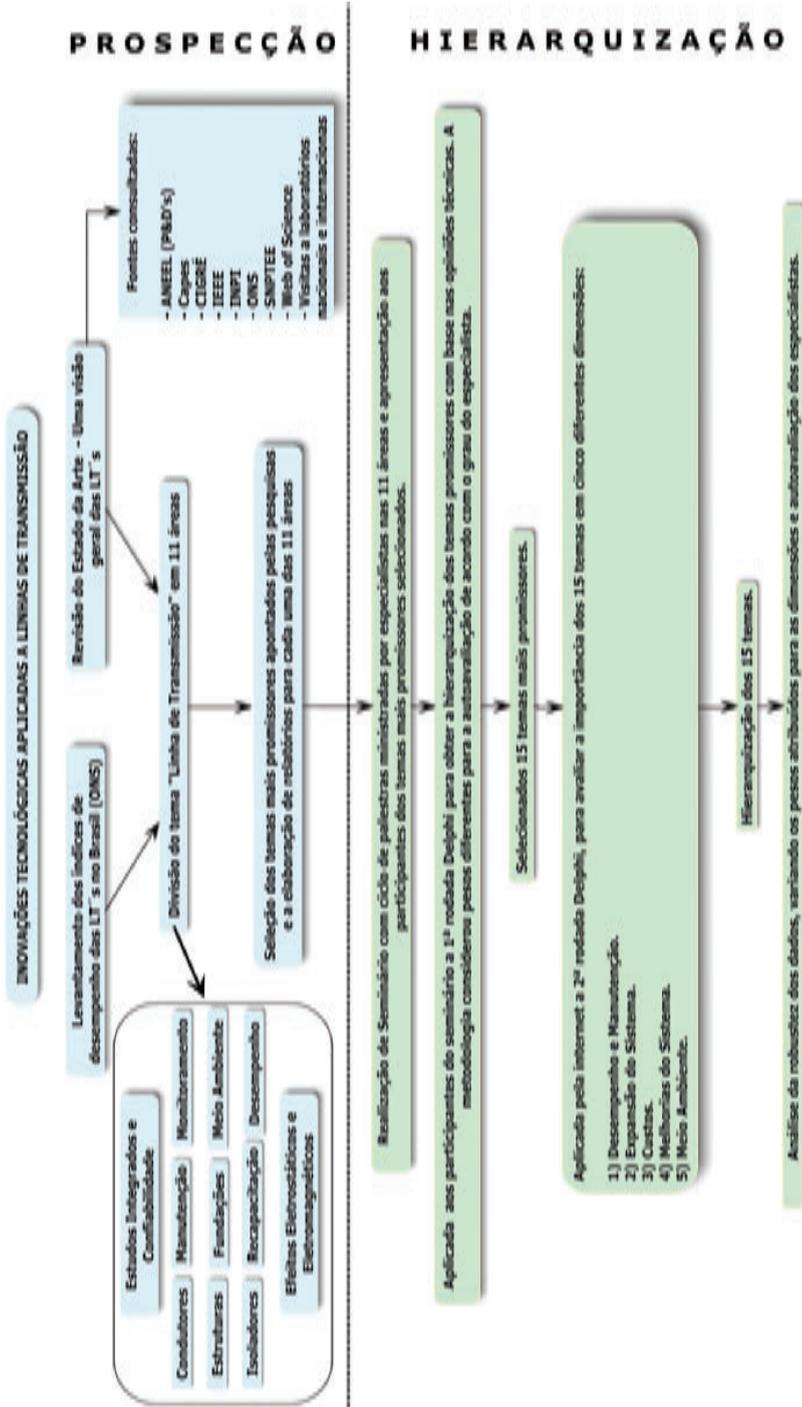
Aplicar a metodologia Delphi, objetivando hierarquizar os temas mais promissores identificados por meio de prospecções realizadas em diversas fontes de informação e apresentados nos capítulos anteriores.

Resumo do Processo de Prospecção e Hierarquização

A figura ao lado apresenta o fluxograma do processo de prospecção e hierarquização dos temas mais promissores.

Seleção dos Temas Mais Promissores

Foram selecionados 98 temas mais promissores em termos de desenvolvimento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Espera-se que os investimentos em P&D nos temas apontados possam trazer benefícios para redução dos custos decorrentes das diversas atividades visando à implantação de uma linha de transmissão, melhoria do desempenho com consequente redução das saídas das linhas, redução dos impactos ambientais e indicação de novos processos e tecnologias que possam ser utilizados para aumentar a capacidade das linhas existentes e aplicados na expansão do Sistema Elétrico.



Para facilitar a hierarquização, os temas foram classificados em 11 áreas indicadas abaixo. Devendo-se, entretanto, enfatizar que muitos dos temas podem ser classificados em mais de uma área, considerando a sua abrangência. Entre parêntesis o número de temas selecionados por área.

- Estudos Integrados – Confiabilidade (8).
- Efeitos Eletrostáticos – Eletromagnéticos (6).
- Desempenho (8).
- Recapacitação (9).
- Fundações (6).
- Estruturas (7).
- Condutores e Cabos OPGW (12).
- Isoladores (11).
- Manutenção (7).
- Monitoramento (10).
- Meio Ambiente (14).

Os temas selecionados são apresentados a seguir:

Estudos Integrados – Confiabilidade (8)

- Estudos para a otimização integrada de estruturas e condutores de linhas de transmissão compacta.
- Desenvolvimento de metodologia e ferramentas estatísticas para determinação da vida útil de linhas de transmissão e seus componentes, considerando fatores como efeitos atmosféricos, carregamento, poluição, vandalismo etc.
- Utilização de sistemas e ferramentas de geoprocessamento para a gestão, projeto, construção, operação e otimização de linhas de transmissão.
- Desenvolvimento de bases de dados integrados relativos às diferentes etapas de implantação das linhas de transmissão (estudos, projetos, construção, operação, manutenção), com a aplicação de modernas ferramentas de gestão empresarial.
- Análises econômicas relacionadas aos custos decorrentes das estratégias de operação e manutenção e melhoria dos componentes de linhas de transmissão, e os custos de penalidades decorrentes do não atendimento das metas de confiabilidade e disponibilidade.



- Análise preditiva da probabilidade de risco de falha de linha de transmissão a partir da coleta, tratamento e análise dos dados externos, internos e operacionais.
- Metodologias relacionadas à gestão de risco de falhas de linhas de transmissão, objetivando o aumento dos indicadores de confiabilidade.
- Incorporação às bases de dados de desempenho de linhas de transmissão dos diversos parâmetros das condições atmosféricas relativas às regiões de passagem.

Efeitos Eletrostáticos – Eletromagnéticos (6)

- Identificação e medição de correntes contínuas de baixa intensidade em pés de torres de linhas de transmissão, devido à presença de dutos enterrados contendo proteção catódica.
- Análise de acoplamentos indutivos e resistivos entre linhas de transmissão nos cruzamentos e/ou aproximação com dutos.
- Medições e estabelecimento de modelo tridimensional para cálculo, referente aos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão.
- Mapeamento de campos elétricos e magnéticos mediante ferramentas computacionais, considerando modelagem de alta precisão e sua comparação com medições no campo.
- Influência da configuração dos feixes dos subcondutores das linhas de transmissão sobre os valores dos campos elétricos e magnéticos.
- Redução do impacto ambiental e efeitos sobre a saúde decorrentes dos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão, considerando principalmente os aspectos de percepção do público relacionado a possíveis riscos para saúde.

Desempenho (8)

- Medição da impedância de aterramento de estruturas de linhas de transmissão, objetivando uma maior exatidão de sua representação nos estudos de desempenho contra descargas atmosféricas.
- Modelagem de aterramentos de estruturas de linhas de transmissão, considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência para estudos de desempenho contra descargas atmosféricas.

- Integração dos modelos matemáticos representativos dos diferentes fenômenos envolvidos na análise de desempenho de linhas de transmissão.
- Estudos para a especificação e dimensionamento de cabos para-raios OPGW.
- Análise da instalação de cabos adicionais, abaixo dos cabos energizados e cabos estais conectados a cabos contrapesos, objetivando a melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- Análise da utilização de para-raios de ZnO em paralelo com as cadeias de isoladores para melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- Avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas utilizando redes neurais.
- Metodologia de cálculo para a determinação de fatores de correção atmosférico aplicados ao dimensionamento de isolamentos em ar.

Recapitação (9)

- Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de linhas de transmissão existente, considerando a análise integrada de todos os componentes que compõem a linha.
- Conversão de linha de Corrente Alternada existente em linha de Corrente Contínua, como uma alternativa para aumento da capacidade de transmissão no mesmo corredor.
- Novos conceitos, estratégias e critérios de planejamento da expansão do sistema, de modo que a alternativa de recapitação das linhas de transmissão existentes possa ser efetivamente considerada como uma alternativa técnica e economicamente viável.
- Identificação, análise e consolidação de informações, metodologias e critérios como elemento de integração entre os projetistas de linhas de transmissão e os planejadores da expansão do sistema, como forma de tornar a recapitação de linhas existentes uma alternativa que seja sistematicamente considerada no planejamento a longo prazo.
- Caracterização e identificação dos mecanismos de deteriorização e obsolescência dos componentes de uma linha de transmissão, objetivando a determinação de sua vida útil remanescente.
- Processo de auditoria para fornecer subsídios na determinação dos fatores principais que influenciam as empresas na decisão de recapa-



citação ou melhoria de sua confiabilidade em lugar de construir uma nova linha de transmissão.

- Métodos de predição climática ao longo da rota de uma linha de transmissão com integração aos modelos de capacidade térmica dos condutores e componentes de uma linha de transmissão existente e equipamentos das subestações terminais, de modo a determinar com maior precisão os valores possíveis de sobrecarga dinâmica.
- Metodologias para gerenciamento de riscos, determinação de índices de segurança, disponibilidade e confiabilidade de linhas de transmissão recapacitadas.
- Aplicação da tecnologia de *laser scanning* para levantamento do perfil do terreno visando à plotagem de torres e ao mapeamento das torres existentes, considerando a localização, as alturas das torres e condutores e tipos de vegetação no corredor da linha, com vistas a fornecer subsídios para projetos de recapacitação e manutenção.

Estruturas (7)

- Estabelecimento de novos critérios e metodologias para projeto de torres de transmissão de energia elétrica. Uma revisão da metodologia de projeto de estruturas de transmissão, por serem antigas e não considerarem novos parâmetros hoje existentes.
- Revisão de normas de projeto quanto à forma do cálculo das intensidades das forças do vento nas estruturas e quanto à existência de fenômenos de rajadas de vento e tornados.
- Desenvolvimento e avaliação de projetos de novas geometrias de torres que possibilitem reduzir os custos, a agressão ao meio ambiente, a facilidade de implantação, o aumento de confiabilidade e, dentro desse contexto, a avaliação de desempenho das estruturas estaiadas.
- Desenvolvimento de estudos que permitam a máxima compactação das linhas, podendo ser estudos com relação a novos arranjos das fases, ou novas geometrias que possibilitem essa aproximação das fases, ou da mínima distância entre as fases para que não ocorram interferências entre elas.
- Desenvolvimento de métodos de predição de eventos climáticos prejudiciais às estruturas das linhas, para garantir a continuidade do serviço e restabelecimento rápido da prestação do serviço.
- Desenvolvimento de sistemas de aquisição, transmissão, tratamento

e gestão dos dados de vento coletados para posterior realização de testes de consistência, análises estatísticas e simulações a partir da modelagem da velocidade dos ventos para projeto das estruturas das linhas de transmissão.

- Análise dinâmica de estruturas para avaliação das forças geradas nos eventos de ruptura de cabos ou quedas de torres.

Fundações (6)

- Desenvolvimento de metodologia para análise dos processos erosivos em solos.
- Desenvolvimento de ferramentas para identificação do potencial de eclosão e nível de evolução de erosões para uso pelas equipes de manutenção.
- Dimensionamento de acordo com as causas dos processos erosivos, soluções de baixo custo para a estabilidade das torres.
- Análise técnica e econômica de alternativas para fundação de torres de linhas de transmissão.
- Novos métodos de proteção catódica contra corrosão de fundações de torres de transmissão.
- Desenvolvimento de métodos mais avançados para especificação de fundação de torres para transmissão de energia, considerando a tendência dos estudos não lineares e projetos com conceito integrado dinâmico-mecânico.

Condutores e Cabos OPGW (12)

- Desempenho de cabos OPGW frente a descargas atmosféricas.
- Análise dos efeitos elétricos decorrentes da substituição dos cabos para-raios convencionais, considerando as diversas alternativas de aterramento por cabos OPGW.
- Estabelecimento de métodos e modelos para a determinação da vida útil remanescente de cabos condutores, submetidos a diferentes efeitos elétricos, mecânicos e ambientais.
- Estudo e ensaios de fadiga de condutores.
- Estabelecimento de vida útil de cabos condutores queimados por ocorrência de queimadas ao longo da faixa de passagem.



- Estabelecimento de critérios e metodologias para análise técnica econômica com vistas à aplicação de condutores especiais.
- Obtenção, medição de parâmetros e desenvolvimento de modelos computacionais precisos e eficientes que representem as linhas de transmissão em estudos de sistema tais como distorção harmônica, transitórios eletromagnéticos, fluxo de carga e estabilidade transitória e dinâmica.
- Desenvolvimento de metodologias e modelos computacionais para determinação da capacidade de transporte de linhas de transmissão, considerando as restrições elétricas, mecânicas e ambientais, objetivando determinar com maior exatidão os carregamentos em tempo real, temporário e de curta duração.
- Variação estatística da temperatura do condutor, considerando a variação do vento ao longo do dia e o seu efeito sobre os limites de carregamento.
- Simulação de dados meteorológicos ao longo da rota de linhas de transmissão, considerando as diferentes estações climáticas, os diferentes períodos do dia, visando à realização da análise estatística da ampacidade sazonal das linhas de transmissão.
- Desenvolvimento de ferramenta integrada de monitoramento e análise de carregamento de linha de transmissão para utilização no despacho de carga em tempo real, considerando a previsão de carregamento e cálculo de fluxo de potência.
- Estabelecimento de modelo térmico para determinação de condições de carregamento de condutores, considerando a distribuição irregular de corrente e tensão mecânica aplicada aos condutores.

Isoladores (11)

- Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de Isoladores submetidos a um determinado regime térmico.
- Pesquisas de novos materiais no ramo da nanotecnologia visando melhorar características isolantes e hidrofóbicas dos materiais.
- Desenvolvimento de novas metodologias para estimar a vida de isoladores submetidos a atmosferas mais poluídas.
- Novos sistemas de monitoramento de contaminação de isoladores.
- Inovações em geometrias dos isoladores.

- Pesquisas mais consistentes com criação de um banco de dados mais abrangente de padrões do comportamento de isoladores degradados. Ênfase para isoladores poliméricos e compósitos.
- Melhorias nos sistemas de diagnósticos de falhas em isoladores.
- Estudos da fadiga mecânica dos isoladores.
- Metodologias mais apuradas para designar relação benefício *versus* custo entre isoladores poliméricos, compósitos e de porcelana, levando em conta variáveis como meio ambiente, manutenção, reposição, durabilidade e nível de tensão da linha, por exemplo.
- Pesquisas na área de blindagem de isoladores visando evitar danos causados por vandalismo.
- Identificação e prevenção de corrosão e *tracking* dos isoladores.

Manutenção (7)

- Estabelecimento de metodologias preditivas de falha, por meio de determinação correta de inspeções periódicas, com a finalidade de se ter maior controle do processo de manutenção e torná-lo mais rápido.
- Comunicação rápida entre sistemas de monitoramento e a equipe de manutenção, por intermédio de tecnologias atuais de transmissão rápida de informações aliadas a um banco de dados geográficos que viabilizem maior rapidez na prestação do serviço, definindo o local correto a ser verificado.
- Desenvolvimento de novos equipamentos operados a distância, por meio de tecnologia sem fio, para reparos simples na linha, agilizando o serviço e reduzindo o gasto com deslocamento de uma equipe.
- Desenvolvimento de equipamentos de linha com peso mais reduzido, para facilitar e agilizar a manutenção.
- Sistemas que impeçam falhas contra furto e vandalismo de equipamentos.
- Desenvolvimento de novos métodos de troca e reparo em condutores que não necessitem do desligamento do fornecimento de energia.
- Sistemas operacionais de detecção e de restauração do fornecimento de energia mais rápidos para casos de emergência.



Monitoramento (10)

- Aprimoramento das metodologias para predição do grau de poluição do ambiente.
- Melhorias das técnicas e sensores de medição de temperatura do cabo, com destaque especial para sensoriamento utilizando fibra óptica.
- Melhoria dos critérios e metodologias para se estimar temperatura do cabo, utilizando o método de monitoramento climático.
- Melhoria na tecnologia de transmissão de dados para sensores posicionados nas torres.
- Aprimoramento das técnicas de gerenciamento e armazenamento de dados utilizados nos sistemas de monitoramento em tempo real.
- Melhoria dos sistemas de medição que visam aferir tração dos cabos ou de equipamentos que medem a altura cabo-solo.
- Sistemas de segurança patrimonial (“*antivandalismo*”).
- Desenvolvimento na área de identificação de descargas elétricas.
- Sistemas de medição de vibração e autoamortecimento de cabos.
- Ampliação da capacidade de transmissão de uma linha de transmissão existente, considerando o monitoramento em tempo real das variáveis elétricas e ambientais.

Meio Ambiente (14)

- Desenvolvimento de revestimento para torres das linhas de transmissão resistente a microorganismos.
- Definição de parâmetros climatológicos para otimização de projetos de linhas de transmissão.
- Metodologia de avaliação espacial para mapeamento de variáveis climáticas.
- Elaboração de sistemas de produção para aproveitamento das áreas sob as linhas de transmissão visando evitar queimadas provocadas por agricultores.
- Elaboração de sistema georreferenciado para estabelecer relações entre aspectos ambientais e danos nas estruturas.
- Elaboração de sistema antipouso de pássaros nas linhas de transmissão a partir de ondas mecânicas de áudio e ultrassom.
- Estudo da concentração de aerossóis sobre a estrutura elétrica de

nuvens de tempestade e as características das descargas elétricas para especificação dos equipamentos componentes das linhas de transmissão.

- Elaboração de metodologia de combate a erosões da base de torres de linhas de transmissão.
- Elaboração de modelo matemático para classificação de corrosividade atmosférica.
- Elaboração de metodologias de gestão ambiental - baseadas na Norma NBR ISO 14001 - para que sejam incorporadas no processo de gestão das linhas de transmissão.
- Elaboração de metodologias multicritérios para definição de corredores e traçados de linhas de transmissão.
- Utilização de sensoriamento remoto orbital e fotografias a *laser* para gestão das linhas de transmissão sob aspectos ambientais.
- Alteamento de torres das linhas de transmissão para diminuição de impactos ambientais.
- Quantificação econômica da supressão de vegetação para construção de linhas de transmissão.

Metodologias de Hierarquização

Identificados os temas mais promissores a partir de prospecções bibliográficas realizadas nas fontes de informação referentes a linhas de transmissão, torna-se necessário analisar as metodologias que permitam a sua hierarquização.

Neste sentido, foi realizada uma pesquisa sobre as principais metodologias de hierarquização disponíveis na literatura. Dentre as alternativas identificadas, destacaram-se Análise Custo Benefício, Análise de Regressão, Análise Multicritério, Levantamento Documental, Metodologia Delphi, SWOT, Construção de Cenário, Grupo Focal, Survey, Modelos Computacionais de Equilíbrio, Benchmarking, Roadmap, entre outros.

Após a análise destas opções, foi escolhida a metodologia Delphi que, de acordo com Vergara (2006), é utilizada para se obter consenso de opiniões sobre o objeto que se está investigando. Baseia-se na aplicação de questionários, durante sucessivas rodadas, a um grupo de especialistas. A cada rodada, os participantes recebem *feedback* sobre os resultados da rodada anterior, os quais são submetidos a tratamento estatístico, ou seja, uma abordagem quantitativa dos dados.



O Método pode variar em decorrência de sua execução. O convencional é quando o especialista recebe o questionário impresso e, depois de respondido, devolve-o para o pesquisador. O Delphi Conference é realizado com computadores interligados em rede e os especialistas se reúnem ao mesmo tempo para responderem às perguntas e, por último, pode-se utilizar o Delphi eletrônico onde os questionários são enviados via *internet*.

No caso presente, foram utilizadas duas rodadas de consulta aos especialistas. Uma primeira rodada foi realizada durante seminário, apresentando para os participantes o questionário com os temas selecionados previamente. Após a análise e consolidação das respostas, foi realizada via *internet* uma segunda rodada de consulta aos especialistas inscritos no Seminário. A seguir, serão apresentados os resultados destas duas rodadas do Método Delphi.

Primeira Rodada Delphi

A primeira rodada da metodologia Delphi foi aplicada por meio de consulta presencial aos especialistas presentes em Seminário realizado no dia 28 de abril de 2010 na cidade de Brasília, no auditório da FINATEC - Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos no Campus da Universidade de Brasília (UnB). A abertura do evento e a apresentação do projeto foram realizadas pelos seguintes técnicos:

Abertura

- Gliender Mendonça – Gerente dos Programas de P&D da Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A – TAESA.
- Antonio Cesar Pinho Brasil Junior – Chefe do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.
- José Alexandre Araújo – Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.
- Ivan Marques de Toledo Camargo – Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB.

Apresentação do Projeto.

- Sergio de Oliveira Frontin – Coordenador do Projeto pela UnB.
- Leonardo Brant Murça – Pesquisador da UnB.
- Vinícius Barros Rêgo – Pesquisador da UnB.
- Alexandre Maduro-Abreu – Pesquisador da UnB.
- Ricardo Ramos Fragelli – Pesquisador da UnB.

Em seguida, cada uma das áreas de conhecimento relacionadas às linhas de transmissão foi contextualizada pelos especialistas indicados a seguir:

- **Estudos e Projetos:** José Henrique Machado Fernandes - Gerente de Coordenação de Empreendimentos de Geração e Transmissão da ELETRONORTE.
- **Recapitação:** João Felix Nolasco – Diretor Presidente da JFNOLASCO CONSULTORIA.
- **Estruturas:** João Batista Guimarães Fereira da Silva – Diretor Vice-Presidente da DAMP Electric Engenharia, Torres e Ferragens S.A.
- **Condutores:** Sidney Ueda – Gerente Engenharia Aplicações & Centro Competência Linhas de Transmissão Aéreas da NEXANS BRASIL - FICAP.
- **Isoladores:** Ricardo Wesley Salles Garcia – Pesquisador do Departamento de Instalações e Equipamentos do CEPTEL.
- **Manutenção:** Paulo Botelho – Gerente de Operação e Manutenção da TAESA.
- **Monitoramento:** José Jardini – Professor da Universidade de São Paulo – USP.
- **Meio Ambiente:** Ricardo Cavalcanti Furtado – Superintendente de Meio Ambiente da EPE.

Após cada uma das apresentações, questionários contendo os temas mais promissores correspondentes a área foram entregues aos participantes solicitando o seu preenchimento de acordo com as seguintes réguas:

A primeira régua se refere à avaliação do grau do conhecimento do participante em cada um dos blocos de assunto. Este grau de conhecimento será aplicado como peso para as respostas sobre a importância de cada tema.

- **Perito** – Atualmente se dedica a este assunto com profundidade.
- **Conhecedor** – Está se tornando um perito, falta alguma experiência, ou já foi um perito há alguns anos, mas se considera pouco atualizado.
- **Familiarizado** – Conhece o assunto, já leu sobre o assunto e tem opiniões.
- **Não familiarizado** – Não se enquadra em nenhuma das categorias acima.

A segunda régua deve ser aplicada a cada um dos temas, onde os participantes deverão indicar a sua importância com vistas à necessidade de maiores investimentos em termos de pesquisa e desenvolvimento, considerando a seguinte definição:



Grau de importância do tema (0 – não sabe a 5 – muito importante) visando à realização de projetos de P&D. Avalia, entre os outros aspectos, aprimoramento das ferramentas de estudos e projeto, aumento do desempenho e confiabilidade, aumento da capacidade de transporte, redução do impacto ambiental, redução de custos dos componentes etc.

Os participantes devem considerar que a divisão utilizada em blocos de assuntos visou facilitar a coleta das informações. Em muitos dos aspectos abordados, certamente será necessária uma análise mais detalhada, tendo em vista a integração dos diversos fatores que afetam a implantação e operação de uma linha de transmissão.

Resultados da Primeira Rodada Delphi

Este item tem como objetivo apresentar os resultados decorrentes dos questionários que foram aplicados aos especialistas participantes do Seminário sobre Inovações Tecnológicas em linhas de transmissão.

Esta é a primeira fase para estabelecer a hierarquização dos temas mais promissores para a realização de projetos de P&D de linhas de transmissão.

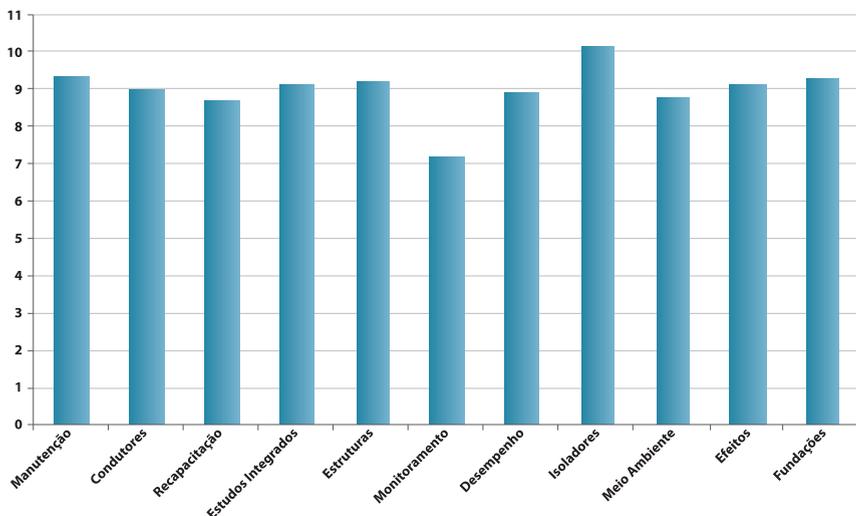
Para a tabulação, foram utilizadas técnicas estatísticas de descrição de dados, a partir do *software Statistical Package Social Scienses – SPSS*.

Foram recebidos 108 formulários respondidos pelos participantes que compuseram a base de dados para a geração das análises, conforme apresentado a seguir:

AUTOAVALIAÇÃO DOS ESPECIALISTAS POR TEMA

Item	Frequência Respondentes	Não Respondeu	Média	Desvio Padrão
Condutores	99	9	9,30	4,95
Desempenho	106	2	8,96	4,96
Efeitos	106	2	8,66	5,24
Estruturas	102	6	9,13	4,69
Estudos Integrados	106	2	9,17	4,84
Fundações	97	11	7,16	4,85
Isoladores	102	6	8,93	5,33
Manutenção	99	9	10,11	5,67
Meio Ambiente	90	18	8,72	4,56
Monitoramento	95	13	9,09	5,33
Recapitação	106	2	9,24	5,12

AUTOAVALIAÇÃO POR TEMA



Pode-se notar que o grau de autoavaliação dos especialistas se mostrou muito bem equilibrado, ressaltando-se o tema de Manutenção com o maior grau e Fundações com menor grau.

Notou-se igualmente um grande número de abstenções nas autoavaliações relativas aos temas Meio Ambiente e Monitoramento e, em menor número, nos temas Recapacitação, Estudos Integrados, Desempenho e Efeitos.

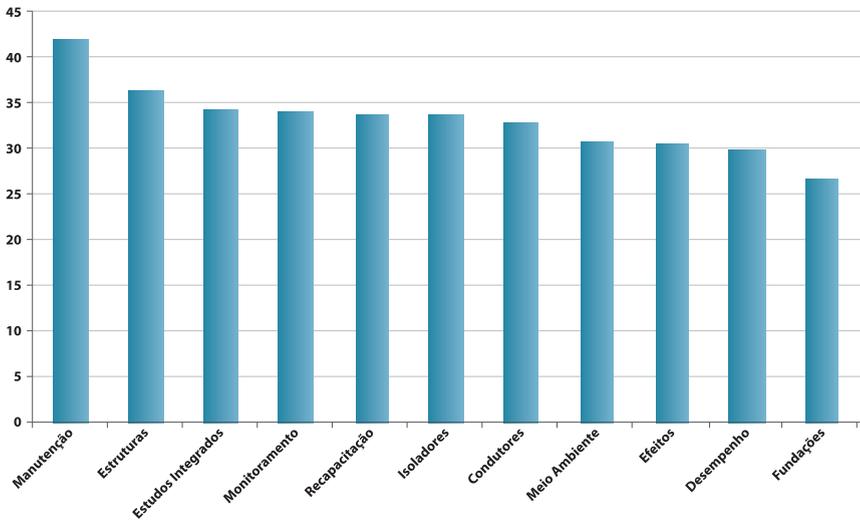
Nos gráficos que se seguem, sobre a *Avaliação do Tema*, pode-se notar que o grau de importância dos temas na visão dos especialistas se mostrou muito bem equilibrado, retirando-se os extremos superiores Manutenção e Estruturas e o extremo inferior Fundações.

AVALIAÇÃO DO TEMA

Item	Frequência Respondentes	Não Respondeu	Média	Desvio Padrão
Manutenção	96	12	41,91	25,94
Estruturas	102	6	36,37	21,72
Estudos Integrados	106	2	34,41	20,78
Monitoramento	95	13	34,18	22,28
Recapacitação	106	2	33,83	21,14
Isoladores	103	5	33,57	23,40
Condutores	100	8	33,05	20,81
Meio Ambiente	89	19	30,70	18,51
Efeitos	106	2	30,54	21,26
Desempenho	107	1	29,94	19,91
Fundações	96	12	26,67	21,00



AValiação por Tema



Notou-se igualmente que um grande número de especialistas não responderam às questões dos temas Meio Ambiente, Monitoramento e Manutenção e, em menor número, nos temas Recapacitação, Estudos Integrados, Desempenho e Efeitos.

A partir do tratamento e análise das informações relativas aos graus de autoavaliação e grau de importância do tema, foram identificados 15 temas mais promissores na visão dos especialistas, conforme relação apresentada abaixo em sequência aleatória, sem nenhuma ordem de prioridade.

- A. Ampliação da capacidade de transmissão de uma linha de transmissão existente, considerando o monitoramento em tempo real das variáveis elétricas e ambientais.
- B. Desenvolvimento de novos métodos de troca e reparo em condutores, isoladores e outros componentes das linhas de transmissão, que não necessitem da interrupção do fornecimento de energia.
- C. Sistemas de monitoramento e segurança que possam atuar na redução de falhas em linhas de transmissão provocadas por furto e vandalismo.
- D. Aprimoramento da tecnologia de comunicação entre sistemas de monitoramento e as equipes de manutenção com integração a um banco de dados geográficos, com o objetivo de prover maior rapidez nos serviços de manutenção das linhas de transmissão.
- E. Metodologias mais apuradas para estabelecer a relação custo *versus* benefício entre isoladores poliméricos, compósitos e de porcelana,

- levando em conta variáveis como meio ambiente, manutenção, reposição, durabilidade, nível de tensão da linha etc.
- F. Melhorias nos sistemas de diagnósticos de falhas em isoladores, incluindo o desenvolvimento de novas metodologias para estimar a vida de isoladores submetidos a atmosferas poluídas.
 - G. Pesquisas de novos materiais no ramo da nanotecnologia, visando aprimorar as características isolantes e hidrofóbicas dos materiais utilizados para isoladores de linhas de transmissão.
 - H. Estabelecimento de critérios e metodologias para análise técnica econômica com vistas à aplicação de condutores especiais.
 - I. Desenvolvimento de estudos que permitam a máxima compactação das linhas de transmissão, podendo ser estudos com relação a novos arranjos das fases ou novas geometrias de torres.
 - J. Desenvolvimento e avaliação de projetos de novas geometrias de torres que possibilitem reduzir os custos, a agressão ao meio ambiente, facilitar a instalação e aumentar a confiabilidade.
 - K. Estabelecimento de novos critérios e metodologias para projeto de torres de transmissão de energia elétrica, considerando inclusive revisão de normas de projeto quanto à forma do cálculo das intensidades das forças do vento nas estruturas e quanto à existência de fenômenos de rajadas de vento e tornados.
 - L. Novos conceitos, estratégias e critérios de planejamento da expansão do sistema, de modo que a alternativa de recapitação das linhas de transmissão existentes possa ser efetivamente considerada como uma alternativa técnica e economicamente viável.
 - M. Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de linhas de transmissão existentes, considerando a análise integrada de todos os seus componentes submetidos aos diferentes efeitos elétricos, mecânicos e ambientais.
 - N. Redução do impacto sobre o meio ambiente provocado pelos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão, considerando principalmente os aspectos de percepção do público relacionado a possíveis riscos para saúde.
 - O. Utilização de sistemas e ferramentas de geoprocessamento para a gestão, projeto, construção, operação e otimização de linhas de transmissão.



Segunda Rodada Delphi

Os 15 temas selecionados foram submetidos novamente aos especialistas numa segunda rodada de consulta. Esta segunda Rodada Delphi foi realizada mediante questionário enviado via *internet* para os especialistas inscritos no Seminário realizado no dia 28 de abril de 2010 em Brasília.

Para cada tema foram apresentadas cinco perguntas específicas, conforme indicadas a seguir, onde se deveria indicar a pontuação entre o impacto muito alto (5) a nenhum impacto (0).

1) DIMENSÃO – DESEMPENHO

Os relatórios de desempenho de linhas de transmissão periodicamente publicados pelo Operador Nacional do Sistema – ONS apontam que os desligamentos forçados são causados em ordem de relevância por descargas atmosféricas, queimadas, falhas humanas e quedas de árvores sobre a linha. Como você avaliaria o tema proposto em relação ao seu impacto sobre a melhoria do desempenho da linha e redução dos custos decorrentes da Parcela Variável (PV).

2) DIMENSÃO – EXPANSÃO DO SISTEMA

A Agência Nacional de Energia Elétrica colocou em leilão até o ano de 2009 cerca de 37.000 km de linhas de transmissão nas tensões de 230, 345, 440 e 500 kV. Outros leilões serão realizados em decorrência da necessidade de expansão do sistema, conforme indicado no Plano Decenal publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Como você avaliaria o tema proposto em relação ao surgimento de novas ideias e tecnologias que atuem no sentido de aprimoramento da expansão do sistema de transmissão com ênfase nos desafios decorrentes da transmissão de longas distâncias.

3) DIMENSÃO – CUSTOS

São diversos os itens a serem considerados na elaboração do orçamento para investimento de implantação de uma linha de transmissão como, por exemplo, terrenos e servidões, materiais (estruturas, condutores, isoladores, ferragens, cabos para-raios), construção, serviços técnicos (topografia, geologia), engenharia, mitigações ambientais etc. Como você avaliaria o impacto do desenvolvimento dos temas propostos com a possibilidade de surgimento de novas ideias e tecnologias visando à redução dos custos dos componentes indicados. Se, na análise de um tema, você concluir que ele tem impacto muito alto, mesmo que somente sobre um item específico, como por exemplo condutores, neste caso você deve indicar a pontuação máxima 5.

4) DIMENSÃO – MELHORIA DO SISTEMA EXISTENTE

A ANEEL indica no contexto do seu programa de P&D que a rede básica brasileira, com vida média na faixa de 20 a 30 anos de serviço, em pouco tempo apresentará inevitável degradação, devendo ser enfatizadas tecnologias que possam atuar de forma efetiva nesta situação. Como você avaliaria o impacto dos temas propostos sobre o desenvolvimento de processos e tecnologias que possam permitir aumentar a capacidade das linhas existentes e aumentar a sua confiabilidade.

5) DIMENSÃO – MEIO AMBIENTE

São diversos os eixos de pesquisas voltadas para minimizar o efeito da linha de transmissão sobre o Meio Ambiente como, por exemplo, ampliação do conhecimento sobre dados atmosféricos, efeitos dos campos eletromagnéticos, interferência de linhas sobre dutos, integração com os sistemas de informações geográficas, incorporação de informações em três dimensões. Como você avaliaria o impacto dos temas propostos para o desenvolvimento de processos e tecnologias que possam reduzir os efeitos da linha de transmissão sobre o meio ambiente e, de maneira inversa, analisar igualmente os efeitos do meio ambiente sobre as linhas de transmissão.

A autoavaliação para a devida ponderação das respostas foi igualmente solicitada, mas, neste caso, o especialista considerou a Função Linha de Transmissão como área de conhecimento global, que integra a totalidade ou parte dos conhecimentos específicos que foram analisados no projeto: estudos integrados, efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos, desempenho, estruturas, fundações, condutores, isoladores, manutenção, monitoramento e meio ambiente. Neste contexto, deveria ser indicado:

- **Perito**⁽¹⁾ – Atualmente se dedica ao assunto linhas de transmissão com profundidade e dedicação integral.
- **Conhecedor**⁽¹⁾ – Está se tornando um perito no assunto linhas de transmissão, mas falta alguma experiência.
- **Familiarizado**⁽¹⁾ – Conhece o assunto linhas de transmissão, mas atualmente está desatualizado ou trabalha no assunto sem dedicação exclusiva.

Para a tabulação dos dados, foram utilizadas técnicas estatísticas de descrição de dados, a partir do *software Statistical Package Social Scienses – SPSS*.

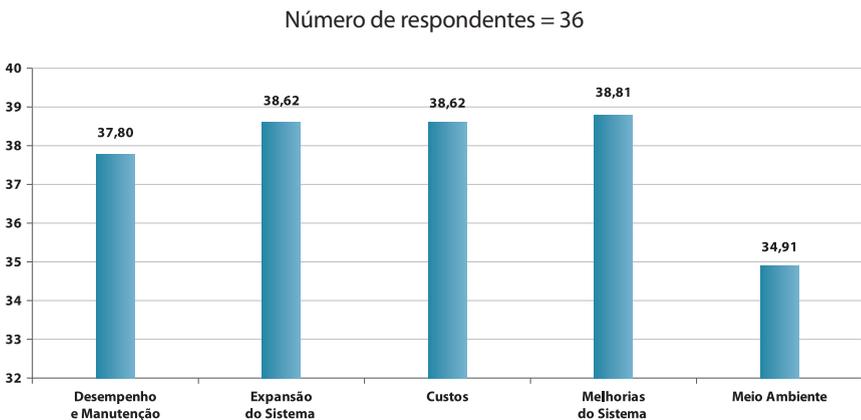
1) Ressalta-se que, para efeito de ponderação, os valores utilizados foram: Perito = 20, Conhecedor = 10, Familiarizado = 5.



Resultados da Segunda Rodada Delphi

A segunda rodada teve 36 respondentes dos quais 10 eram peritos, 13 conhecedores e 13 familiarizados. Considerando a ponderação conforme estabelecida acima para a autoavaliação dos especialistas, as médias por dimensão foram calculadas e os resultados apresentados abaixo. Nota-se que a dimensão Meio Ambiente foi a que apresentou menor média com relação às demais, as quais apresentaram valores praticamente iguais.

AValiação por Dimensão

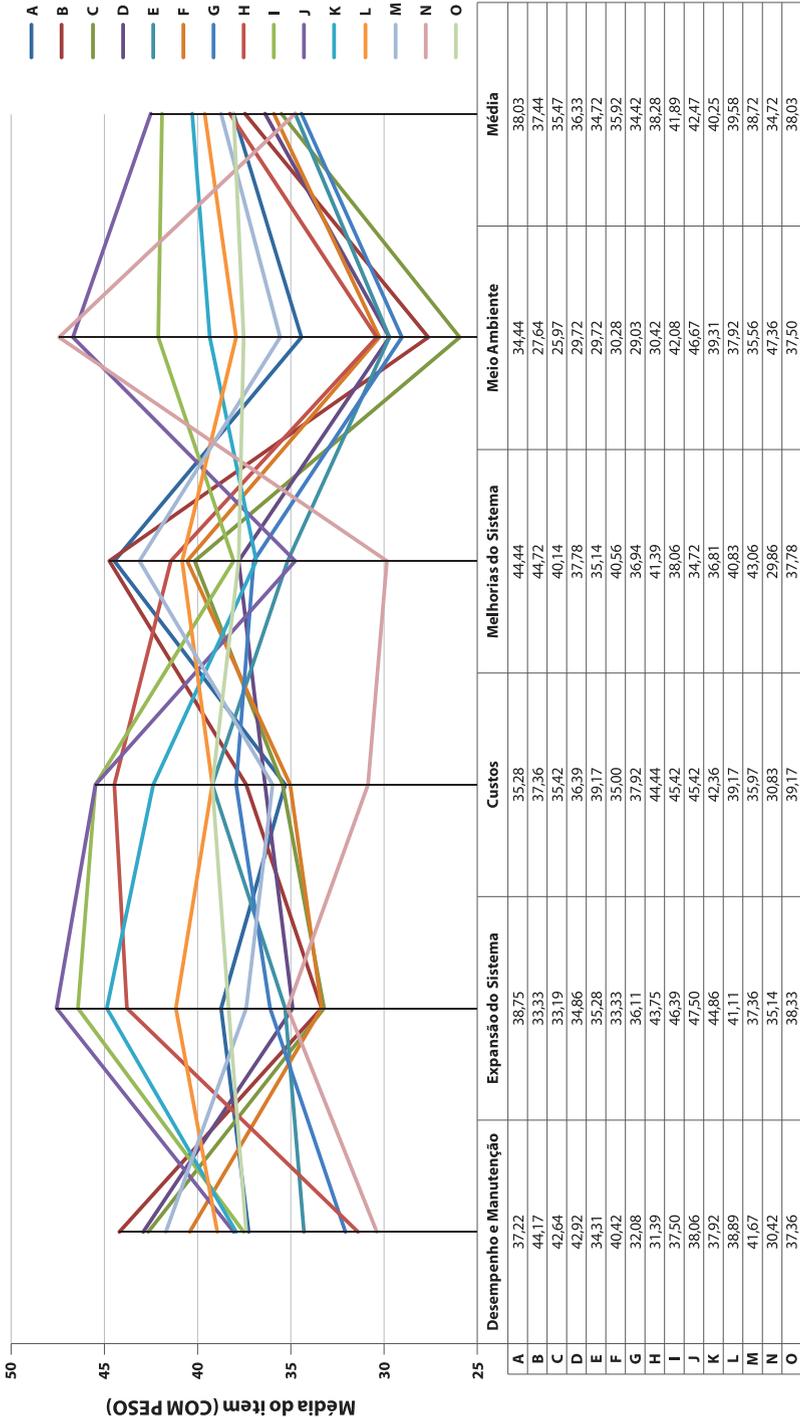


O gráfico abaixo apresenta variação da média de cada um dos itens para as cinco dimensões. Com base nos resultados obtidos, observa-se que os itens J, I, K, L e M aparecem com a maior pontuação média apontada pelos especialistas.

Acompanhando as curvas, pode-se analisar o impacto de cada um dos itens nas dimensões estudadas. Por exemplo, o item J de maior média geral se apresenta com a segunda maior média na dimensão meio ambiente e, na dimensão melhoria do sistema, é ultrapassado por praticamente todos os outros temas, na dimensão custo empata com o item I, é a média mais alta na dimensão expansão, e na dimensão desempenho é ultrapassado por alguns itens.

Tendo em vista estas variações, foi necessário fazer uma análise de sensibilidade para verificar a robustez dos itens. Esta análise é apresentada a seguir.

Importância do item dentro de cada dimensão





Análise de Sensibilidade

Para verificar a robustez dos dados encontrados na hierarquização dos temas prioritários para investimento em Pesquisa e Desenvolvimento no setor de linhas de transmissão, foi desenvolvida uma metodologia de análise da sensibilidade dos dados obtidos. Até este ponto, os temas selecionados foram hierarquizados de acordo com a opinião dos especialistas.

Contudo, é necessário entender melhor se a ordem de hierarquização dos temas se altera na medida em que haja uma priorização de uma determinada dimensão em detrimento de outra. Em outras palavras, o que aconteceria com a ordem dos temas selecionados se, por exemplo, fosse atribuído um peso maior à dimensão que avalia o impacto das inovações em relação ao custo e um peso menor à dimensão que prioriza o meio ambiente? Ou vice-versa? E, ainda, se a opinião dos peritos for considerada de maior importância do que a opinião dos conhecedores ou familiarizados no assunto? Visando responder a essas dúvidas, foi realizada a análise de sensibilidade com relação aos pesos da autoavaliação e das dimensões.

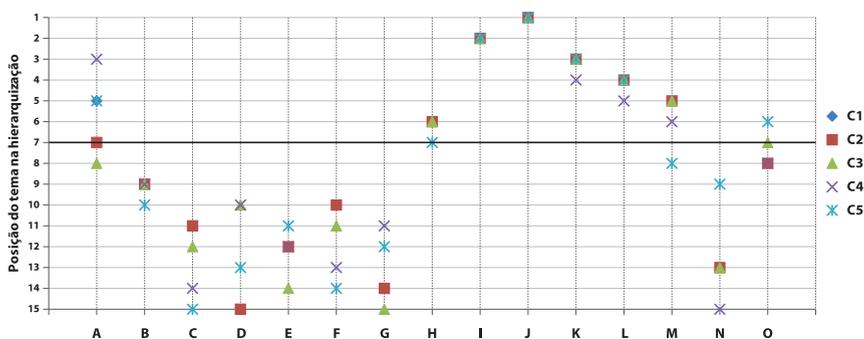
Esse comportamento justifica uma análise mais criteriosa com relação às dimensões, pois estas têm uma forte influência sobre a visão de prioridade de investimento para os especialistas.

A seguir, tem-se a relação dos diferentes cenários criados para simular a robustez dos temas:

- **Cenário C1** – Assume peso 1 para todas as autoavaliações dos especialistas e para todas as dimensões.
- **Cenário C2** – Assume peso 5 para a opinião dos familiarizados, 10 para os conhecedores e 20 para os peritos e, para todas as dimensões, foi considerado peso 1.
- **Cenário C3** – Assume peso 1 para a opinião dos familiarizados, 10 para os conhecedores e 20 para os peritos e, para todas as dimensões, foi considerado peso 1.
- **Cenário C4** – Assume peso 1 para todas as autoavaliações dos especialistas e peso 2 para a dimensão Custos e para a dimensão Melhorias no Sistema, mantendo peso 1 para as demais dimensões.
- **Cenário C5** – Assume peso 1 para todas as autoavaliações dos especialistas e peso 2 para a dimensão Custos, Expansão do Sistema e Meio Ambiente, mantendo peso 1 para as demais dimensões.

Os resultados para as dispersões geradas pelos diferentes cenários podem ser visualizados no gráfico a seguir. No gráfico de sensibilidade, foi estabelecida uma linha divisória dos itens que sempre permaneceram acima da sétima colocação nos cenários.

SENSIBILIDADE DOS TEMAS PARA CADA UM DOS CENÁRIOS



A aplicação da análise de sensibilidade permitiu a constatação de alguns grupos de temas para inovação tecnológica que aparecem como prioritários e variam pouco nos cenários propostos, enquanto outros apresentam grandes variações.

De acordo com o resultado da análise, os cinco itens que se mostraram menos sensíveis aos diferentes cenários foram os itens J, I, K, L e H, descritos a seguir:

- J. Desenvolvimento e avaliação de projetos de novas geometrias de torres que possibilitem reduzir os custos, a agressão ao meio ambiente, facilitar a instalação e aumentar a confiabilidade.
- I. Desenvolvimento de estudos que permitam a máxima compactação das linhas de transmissão, podendo ser estudos com relação a novos arranjos das fases ou novas geometrias de torres.
- K. Estabelecimento de novos critérios e metodologias para projeto de torres de transmissão de energia elétrica, considerando inclusive revisão de normas de projeto quanto à forma do cálculo das intensidades das forças do vento nas estruturas e quanto à existência de fenômenos de rajadas de vento e tornados.
- L. Novos conceitos, estratégias e critérios de planejamento da expansão do sistema, de modo que a alternativa de recapacitação das linhas de transmissão existentes possa ser efetivamente considerada como uma alternativa técnica e economicamente viável.
- H. Estabelecimento de critérios e metodologias para análise técnica econômica com vistas à aplicação de condutores especiais.



Os itens A, M e O que em determinados cenários se apresentaram acima da linha, porém em outros se posicionaram abaixo desta, mostrando inconsistência quanto ao valor pré-estabelecido.

- A. Ampliação da capacidade de transmissão de uma linha de transmissão existente, considerando o monitoramento em tempo real das variáveis elétricas e ambientais.
- M. Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de linhas de transmissão existentes, considerando a análise integrada de todos os seus componentes submetidos aos diferentes efeitos elétricos, mecânicos e ambientais.
- O. Utilização de sistemas e ferramentas de geoprocessamento para a gestão, projeto, construção, operação e otimização de linhas de transmissão.

As hierarquias produzidas, uma vez sobrepostas e comparadas, evidenciaram claramente os temas mais robustos e os mais sensíveis, quando submetidos às simulações dos cenários propostos.

Comentários Gerais

Com base nas médias totais, considerando todas as dimensões com pesos iguais e, ainda, considerando os resultados decorrentes da análise de sensibilidade realizada, pode-se agrupar os temas promissores por ordem de preferência dos especialistas consultados nas duas rodadas da Metodologia Delphi, onde os primeiros números se referem à hierarquização dos 15 temas.

Primeiro bloco – Projetos de Torres – Compactação

- 1J. Desenvolvimento e avaliação de projetos de novas geometrias de torres que possibilitem reduzir os custos, a agressão ao meio ambiente, a facilidade de instalação e o aumento de confiabilidade.
- 2I. Desenvolvimento de estudos que permitam a máxima compactação das linhas de transmissão, podendo ser estudos com relação a novos arranjos das fases ou novas geometrias de torres.
- 3K. Estabelecimento de novos critérios e metodologias para projeto de torres de transmissão de energia elétrica, considerando inclusive revisão de normas de projeto quanto à forma do cálculo das intensidades das forças do vento nas estruturas e quanto à existência de fenômenos de rajadas de vento e tornados.

Segundo bloco – Recapacitação

- 4L.** Novos conceitos, estratégias e critérios de planejamento da expansão do sistema, de modo que a alternativa de recapacitação das linhas de transmissão existentes possa ser efetivamente considerada como uma alternativa técnica e economicamente viável.
- 5M.** Estabelecimento de critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de linhas de transmissão existentes, considerando a análise integrada de todos os seus componentes submetidos aos diferentes efeitos elétricos, mecânicos e ambientais.

Terceiro bloco – Monitoramento e Geoprocessamento

- 6A.** Ampliação da capacidade de transmissão de uma linha de transmissão existente, considerando o monitoramento em tempo real das variáveis elétricas e ambientais.
- 7O.** Utilização de sistemas e ferramentas de geoprocessamento para a gestão, projeto, construção, operação e otimização de linhas de transmissão.
- 12C.** Sistemas de monitoramento e segurança que possam atuar na redução de falhas em linhas de transmissão provocadas por furto e vandalismo.

Quarto bloco – Condutores

- 8H.** Estabelecimento de critérios e metodologias para análise técnica econômica com vistas à aplicação de condutores especiais.

Quinto Bloco – Manutenção

- 9B.** Desenvolvimento de novos métodos de troca e reparo em condutores, isoladores e outros componentes das linhas de transmissão, que não necessitem da interrupção do fornecimento de energia.



- 10D. Aprimoramento da tecnologia de comunicação entre sistemas de monitoramento e as equipes de manutenção com integração a um banco de dados geográficos com o objetivo de prover maior rapidez nos serviços de manutenção das linhas de transmissão.

Sexto bloco – Isoladores

- 11F. Melhorias nos sistemas de diagnósticos de falhas em isoladores, incluindo o desenvolvimento de novas metodologias para estimar a vida de isoladores submetidos a atmosferas poluídas.
- 13E. Metodologias mais apuradas para estabelecer a relação custo *versus* benefício entre isoladores poliméricos, compósitos e de porcelana, levando em conta variáveis como meio ambiente, manutenção, reposição, durabilidade, nível de tensão da linha etc.
- 15G. Pesquisas de novos materiais no ramo da nanotecnologia, visando aprimorar as características isolantes e hidrofóbicas dos materiais utilizados para isoladores de linhas de transmissão.

Sétimo bloco – Efeitos Eletrostáticos e Eletromagnéticos

- 14N. Redução do impacto sobre o meio ambiente provocado pelos campos elétricos e magnéticos de linhas de transmissão, considerando principalmente os aspectos de percepção do público relacionado a possíveis riscos para saúde.

A hierarquização, juntamente com análise de sensibilidade, possibilitou ter uma visão de quais temas são prioritários e/ou promissores para investimentos em pesquisas de P&D em linhas de transmissão. Neste sentido, estes resultados fornecem subsídios importantes para a elaboração da agenda estratégica por parte das empresas, objetivando a realização dos seus projetos de P&D.

Referências

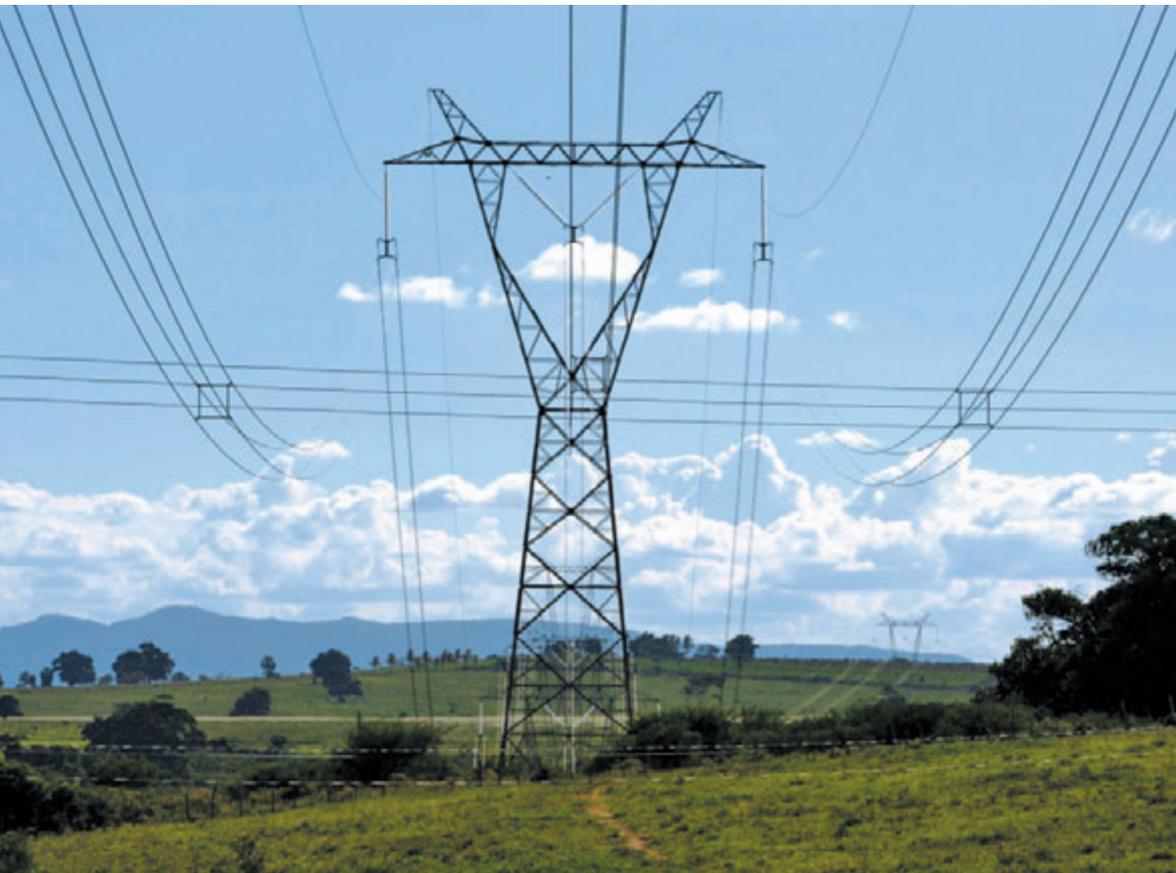
- BANA E COSTA, C. A. *Como piorar a tomada de decisão nas organizações? MACBETH: princípios, metodologia e casos reais de aplicação*. Fortaleza: UEC, 2006.
- BOWER, J. L.; CHRISTENSEN, C. M. *Disruptive technologies: catching the wave*, *Harvard Bus. Rev.*, pp. 43–53, jan.–fev. 1995.
- FOSTER, R. N. *Timing technological transitions*, *Technol. Soc.* 7, pp. 127–141, 1985.
- GOMES, L. F.; MOREIRA, A. M. *Da informação à tomada de decisão: agregando valor através dos métodos multicritérios*. In: Recitec, Recife.v.2, n.2. pp. 117-139.
- JOHNSON, G.; SCHOLES, K. *Exploring Corporate Strategy*. 2ª Ed., Prentice Hall, New York, 1988.
- KIM, S. C. *Statistical issues in combining expert opinions for analytic hierarchy process*. Coreia: Soongsil University, 1999.
- MCKENNA, H. P. *The Delphi technique: a worthwhile approach for nursing?* *Journal of advanced Nursing* 19, pp. 1221-1225, 1994.
- MITCHELL, G. R. *New approaches for the strategic management of technology*, *Technol. Soc.* 7, pp. 227–239, 1985.
- MONTALLI, K. M. L. *Subsídios para a formulação de uma política de informação científica e tecnológica*. Projeto de pesquisa de pós-doutoramento. São Carlos, UFSCar/UNICAMP, 1996.
- MONTALLI, K. M. L.; CAMPELLO, B. dos S. *Fontes de informação sobre companhias e produtos industriais: uma revisão de literatura*. *Ci. Inf.*[on-line]. 1997, v.26, n.3 ISSN 0100-1965. doi: 10.1590/S0100-19651997000300014.
- NORONHA, S. M. D. *Um modelo multicritérios para apoiar a decisão de escolha do combustível para alimentação de caldeiras usadas na indústria têxtil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção). Florianópolis: UFSC, 1998.
- SOARES, S. R. *Análise multicritério como instrumento de gestão ambiental*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção). Florianópolis: UFSC, 2003.
- VILAS BOAS, C. *Modelo multicritérios de apoio à decisão aplicado ao uso múltiplo de reservatórios: estudo da barragem do Ribeirão João Leite*. Dissertação (Mestrado: Economia) Brasília, UnB, 2006.
- VERGARA, S. C. *Métodos de pesquisa de administração*. São Paulo: Editora Atlas, 2006.
- WET, G. DE. *Corporate strategy and technology management: creating the interface*, *Proceedings of the 5th International Conference in the Management of Technology (IAMOT)*. Miami, pp. 510–518, 1996.



CAPÍTULO 14

Vibração Eólica e Fadiga de Cabos em Linhas de Transmissão: Estado da Arte, Teorias de Projeto e *Roadmapping*

Ricardo Ramos Fragelli
José Alexander Araújo



PREFÁCIO

Jorge Luiz de Almeida Ferreira

O cabo condutor é o componente mais importante em uma linha de transmissão e pode contribuir com até 40% do custo em investimento de capital da rede. Os condutores têm que sustentar cargas de origem mecânica, elétrica e ambiental ao longo de sua vida operacional que pode superar os 50 anos. Nesse contexto, a fadiga por *fretting* de cabos provocada pela vibração eólica representa um fator de importância fundamental na manutenção dos condutores. Não é necessário dizer que a avaliação dos intervalos de inspeção das linhas e de sua vida residual inclui a avaliação quantitativa desse fenômeno.

Supervisionar as linhas de transmissão de energia é uma atividade ariscada, que exige equipes especializadas e envolve custo elevado, portanto deve ser racionalizada ao máximo. Por outro lado, é gigantesco o impacto financeiro que uma falha inesperada por fadiga de uma linha de transmissão pode provocar. Em 2001, aproximadamente 67 milhões de habitantes das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil ficaram sem energia elétrica por várias horas devido a um *blackout* provocado pela ruptura por fadiga de uma linha de transmissão de 460 kV que atravessava o Rio Paraná, no estado de São Paulo. Todo o setor produtivo dessas regiões foi afetado com paralisação em suas atividades. Assim, não há dúvida de que o aumento do conhecimento nacional nessa área é fundamental para dar mais confiabilidade ao sistema e reduzir custos desnecessários associados a falhas inesperadas.

Neste capítulo, os autores introduzem brevemente o problema da fadiga por *fretting* devido à vibração eólica em cabos condutores e apresentam algumas das principais metodologias existentes para abordar o problema. De posse desse ferramental teórico básico, levantaram dados que permitem uma



visão abrangente sobre o nível de atividade e investimento em pesquisa e desenvolvimento nesse tema, não apenas mas principalmente em nível nacional. Posteriormente propuseram *roadmaps* estratégicos de Pesquisa e Infraestrutura e de Tecnologia e Produção do Conhecimento com avaliação da situação atual, proposta de ações, e cenário futuro esperado. O material produzido torna-se leitura fundamental para os engenheiros e formadores de políticas públicas ligados ao setor de transmissão de energia elétrica.

Vibração Eólica e Fadiga de Cabos em Linhas de Transmissão: Estado da Arte, Teorias de Projeto e *Roadmapping*

Ricardo Ramos Fragelli
José Alexander Araújo

Objetivo

Este capítulo apresenta uma revisão sobre fadiga de cabos condutores e vibração eólica, as teorias de projeto contra fadiga mais utilizadas e um *roadmapping* estratégico simplificado sobre o tema.

Palavras-chave

Cabos condutores, fadiga, vibração eólica, autoamortecimento, amortecedores para linhas, medidor de vibrações, vibrógrafo, *stockbridge*, *fatigue overhead conductors*, *fatigue overhead power lines*.

Metodologia

Devido ao alto custo do cabo condutor no processo de construção de uma linha de transmissão/distribuição e ao fato de a fadiga ser considerada o problema mecânico mais grave, e por outro lado menos compreendido, que ameaça a integridade da linha, justifica-se um estudo específico nesse tema. Em vários aspectos, a metodologia utilizada é semelhante à dos capítulos anteriores. Contudo, pela especificidade e caráter técnico do tema,



um estudo sucinto do fenômeno e das teorias de projeto mais utilizadas contra fadiga de cabos condutores precede a elaboração de dois *roadmaps*. Os *roadmaps* – mapas sintéticos sobre possíveis rotas estratégicas – são construídos a partir da prospecção da base de conhecimento e a análise dos principais indicadores obtidos com o objetivo de traçar um panorama sobre o tema.

Inicialmente, foi realizada uma revisão sobre o fenômeno da fadiga em cabos e das teorias de projeto mais utilizadas contra fadiga, que serviu de base para a condução da etapa de investigação acerca dos esforços em nível nacional e mundial que estão sendo envidados no sentido de melhor entender o fenômeno da vibração e fadiga em cabos condutores.

Para isso, identificaram-se a intensidade de atividade acadêmica e tecnológica no tema e o nível de investimento na busca de soluções inovadoras, os principais atores no processo de produção de conhecimento em nível nacional e internacional.

Em seguida, os resultados foram apresentados a pesquisadores especializados em fadiga da Universidade de Brasília para validação, construção de cenários futuros e ações necessárias. Com fundamento nesses elementos, foram elaborados *roadmaps* estratégicos simplificados com a intenção de apoiar previsões de investimentos em áreas-alvo.

Fadiga em Cabos Condutores

Fadiga por *Fretting*

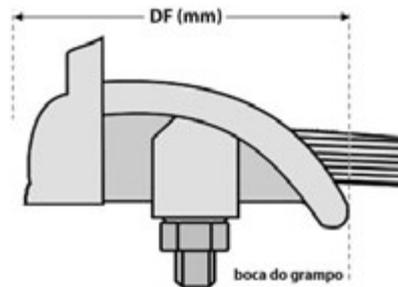
A fadiga por *fretting* é um fator importante a ser considerado no projeto de juntas mecânicas. O termo *fretting* é utilizado para denotar um pequeno movimento relativo entre superfícies em contato. Além do movimento vibratório no acoplamento, a fadiga por *fretting* envolve a presença de uma tensão remota cíclica em pelo menos um dos componentes da montagem. Ela pode levar o sistema prematuramente ao colapso, pois acelera os processos de nucleação e de crescimento de trincas devido ao desgaste superficial e à concentração de tensões provocada pelas cargas de contato. Tipicamente, o *fretting* ocorre em montagens sob regime de escorregamento parcial (caracterizado por uma região de contato onde existe uma zona de adesão circundada por uma zona de escorregamento) com movimento relativo inferior a 50 micra e pode provocar reduções de até 90% da resistência à fadiga convencional de um material (SHARP *et al*, 1996).

O mecanismo de *fretting* no alumínio inicia-se com a remoção, decorrente da fricção, do filme oxidante. No primeiro momento, as superfícies tendem a se aderir, porém esses pontos de aderência serão rompidos posteriormente com movimento relativo entre as superfícies. Esse processo forma um acúmulo de resíduos entre a superfície dos corpos propiciando o surgimento de uma fina e quebradiça camada de óxido de alumínio Al_2O_3 (Azevedo *et al*, 2009). A partir daí, a formação de microtrincas torna-se inevitável podendo levar à falha do material, caso essas se propagem por debaixo da camada de Al_2O_3 em direção à estrutura remanescente de alumínio (CIGRÉ-SCB2-WG11-TF7-06-01, 2006; SHARP *et al*, 1996).

Fadiga por *Fretting* em Cabos Condutores

A fadiga por *fretting* é influenciada por diversos fatores, tais como a carga de contato e a amplitude do escorregamento entre os fios, o coeficiente de fricção, condições da superfície do material, tipo de material em contato e as condições do ambiente externo. A principal causa da fadiga em cabos é a flexão cíclica imposta por vibrações decorrentes da ação das correntes de ar. Os pontos onde há uma restrição ao movimento causado por essas vibrações, tais como grampos e espaçadores, são os mais sujeitos à falha.

A restrição de movimento faz com que os fios que constituem o cabo escorreguem entre si, e as forças de fricção aliadas a esse movimento relativo causem o *fretting* entre os fios e nos contatos do cabo com os grampos de sustentação. Uma trinca induzida por *fretting*, uma vez formada, poderá se propagar por fadiga levando ao rompimento do fio (figura a seguir) ou, em casos extremos, ao rompimento total do cabo (IEEE, 2007).





Fotos cedidas pelo Laboratório de Fadiga em Cabos Condutores de Energia Elétrica da Universidade de Brasília - UnB



Montagem cabo/grampo de suspensão e vista ampliada mostrando a quebra dos fios de alumínio nas regiões danificadas por *fretting*. As quebras dos fios costumam ocorrer no interior do grampo, a uma distância DF (em torno de 27 mm) da sua boca.

Em 1965, Poffenberger e Swart desenvolveram uma solução analítica que define a relação entre o deslocamento e a flexão sofrida pelos fios de cabos condutores. Essa relação depende da tensão no cabo condutor, do comprimento do cabo de grampo a grampo e a sua rigidez à flexão. Esse foi um passo fundamental para o desenvolvimento de teorias de durabilidade de cabos baseadas no uso de propostas mais modernas no âmbito da Fadiga de Metais (POFFENBERGER & SWART, 1965).

O IEEE propôs um novo guia com os procedimentos a serem seguidos, bem como os tipos de aparelhos hoje disponíveis no mercado para se medir a vibração causada em cabos condutores pela ação dos ventos – *Aeolian vi-*

bration. A influência do tipo de terreno, da vegetação, dos tipos de grampos de sustentação e possíveis erros na aquisição de dados também foram abordados. Com essa padronização, os aparelhos vibrógrafos são fabricados e posicionados para obter a matriz de frequência e deslocamento para um determinado cabo em uma região específica ao longo do ano. São esses dados que serão utilizados na celebrada Equação de Poffenberger-Swart para cálculo da sollicitação mecânica do cabo e, assim, alimentar os modelos preditivos de acúmulo de dano por fadiga (IEEE, 2007).

Ramey e Silva realizaram uma série de testes a fim de avaliar a eficiência da redução da amplitude de vibração na vida à fadiga de cabos condutores. Nesse trabalho, foi desenvolvido um aparato experimental para simular no laboratório o carregamento cíclico devido a forças eólicas a que o cabo está submetido em campo. 33 testes foram realizados com cabos CAA (Cabo de Alumínio com alma de Aço). Grande parte dos cabos testados foi submetida inicialmente a altas amplitudes de vibração. Após a ruptura de alguns fios (geralmente dois ou três), a amplitude de vibração era reduzida prosseguindo então com o teste (RAMEY & SILVA, 1981).

O uso de um LVDT (sensor para medição de deslocamento linear) para medição da rotação do condutor permitiu a monitoração cronológica das falhas nos fios, fornecendo o número de ciclos de fadiga e a localização exata de cada fio rompido. Os resultados mostraram que a redução na amplitude de vibração dos cabos é uma forma eficiente de evitar a falha de outros fios que o compõem. Cabos testados a altas amplitudes e que apresentaram alguns fios rompidos após alguns poucos milhões de ciclos resistiram a vidas de até 10^8 ciclos, sem apresentar outras falhas, quando a amplitude de vibração foi reduzida a aproximadamente um terço da amplitude aplicada inicialmente. Foi então sugerido pelos autores que o uso de amortecedores capazes de reduzir os níveis de vibração eólica nos cabos pode ser uma forma eficiente de conter o dano por fadiga nesses elementos.

Outro estudo experimental desenvolvido por Ramey *et al* (1986) visava obter curvas S-N para cabos CAA tipo Drake. Vibrações eólicas foram simuladas em laboratório, utilizando-se um excitador de vibrações eletromagnético conectado à montagem cabo/grampo de suspensão. Para cada teste, o número de ciclos de carga necessários para a ruptura de um fio era gravado, e o experimento era interrompido após a ruptura de cinco fios. Os fios de alumínio eram fabricados de uma liga 1350-H₁₉ e os fios de aço possuíam uma cobertura de zinco. 40 testes foram realizados para a confecção das curvas S-N. Os resultados obtidos mostraram que, apesar de o alumínio não possuir um limite de fadiga bem definido, o cabo Drake apre-



sentou um limite de fadiga (para a ruptura do primeiro fio) de 21,31 MPa. Foi observado também que a dispersão dos dados experimentais aumentou significativamente para baixos níveis de tensão.

O efeito da geometria dos grampos de suspensão no processo de fadiga dos cabos condutores é outro fator que tem sido estudado. Para avaliar tal efeito, Preston e Ramey (1986) realizaram uma série de testes de fadiga em cabos CAA utilizando grampos de suspensão com três diferentes raios longitudinais. Medidas de deformações estáticas e dinâmicas foram conduzidas nas camadas exteriores do cabo. Foi observado que quanto maior o raio de curvatura do grampo de suspensão menor era o nível de tensão medido e, consequentemente, maior era a resistência à fadiga da montagem. Também foi verificado que todos os fios rompiam em algum lugar entre os últimos pontos de contato entre o cabo e as partes superiores e inferiores do grampo, em uma região onde o desgaste por *fretting* estava sempre presente. A maioria dos fios rompidos (aproximadamente 75% deles) pertencia às camadas intermediárias do cabo, onde o desgaste por *fretting* foi mais severo.

Gopalan (1993) desenvolveu um experimento alternativo em que as oscilações dos cabos foram provocadas pela atração e repulsão eletromagnética de dois outros cabos paralelos. Esses cabos paralelos, um sob corrente alternada e outro sob corrente contínua, foram excitados perto de suas frequências naturais. Para se menosprezar os efeitos de ponta, foram propostos que os fios fossem muito maiores que o espaço entre eles. O autor enfatizou que, apesar de os testes em laboratório negligenciarem os efeitos da umidade, temperatura e direção variável do vento, estes ainda poderiam fornecer uma boa indicação das variáveis que controlam o processo de fadiga dos cabos, além de oferecer uma opção mais econômica quando comparada a testes em campo.

Um aparato experimental para testes de fadiga por *fretting* dos fios que constituem os cabos condutores foi desenvolvido por Zhou *et al* (1995). Nesses experimentos, um fio de alumínio H₁₉ era submetido a uma carga de fadiga aplicada por um dispositivo motor-excêntrico. Uma pré-tensão era induzida no corpo de prova, utilizando-se um sistema mola-parafuso. Transversalmente ao fio, uma carga de contato era aplicada por um conjunto de sapatas cilíndricas simulando o contato entre o fio e o grampo de suspensão ou o contato entre fios. O objetivo foi comparar o comportamento à fadiga do fio quando testado isoladamente e quando testado em conjunto com o cabo. Para tal, as superfícies em contato onde o desgaste por *fretting* ocorria (nos testes com o fio) eram analisadas em detalhe e comparadas com zonas típicas observadas em testes completos com cabos executados por Zhou *et al*, (1996) em outro estudo. Os testes com os fios isolados mos-

taram que as zonas em contato eram divididas em uma zona de adesão, sem desgaste, e uma zona de escorregamento, com perda de material. O tamanho dessas zonas dependia das condições de carregamento aplicadas ao fio. Adicionalmente, concluiu-se que maiores amplitudes da carga de fadiga provocavam um crescimento da zona de escorregamento com uma consequente redução na vida à fadiga do fio.

Assim como verificado anteriormente por Mcgill e Ramey (1986), e Ramey (1984), as trincas invariavelmente tinham início nas zonas de escorregamento. Após uma série de análises, os pesquisadores concluíram que as características das zonas em contato, assim como os modos de nucleação e propagação das trincas em testes de fadiga por *fretting* em fios e cabos, eram similares. Portanto, é plausível o uso dos resultados de simples testes em fios para prever o comportamento à fadiga do conjunto cabo/grampo, tornando os testes mais simples e baratos.

Hardy e Dyke (1994), munidos de uma coletânea sobre observações referentes a vibrações eólicas sobre cabos condutores, em escala natural, chegaram a várias conclusões, entre elas:

- A frequência e a amplitude da vibração são independentes com relação a correntes de ar paralelas.
- A turbulência colabora significativamente na atenuação da vibração do condutor.
- Altos índices de tensionamento no cabo (EDS) aumentam sua sensibilidade a vibrações.
- O uso de espaçadores antivibração (*damping spacers*) foi de grande benefício no controle das vibrações eólicas, porém não surtiu muito efeito no caso de vibrações induzidas por esteiras turbulentas.

Goudreau *et al* (2003) apresentou os resultados de testes de fadiga no qual seu histórico de carregamento aplicado ao cabo seguiu uma aproximação da distribuição de Rayleigh. Uma comparação entre o diagrama de Rayleigh-Mainer e os resultados experimentais mostrou uma tendência não conservativa quando aplicada a regra de Palmgren-Miner para baixos níveis de amplitudes de tensões.

Hardy e Brunelle (1991) apresentaram os princípios básicos do dimensionamento e análise de vibrações eólicas sobre cabos condutores utilizando o vibrógrafo PAVICA. A principal análise feita foi quanto à probabilidade de falha do cabo quando utilizado o método do CIGRÉ, demonstrando ser esse muito conservativo em ambos os experimentos executados.



Cardou (2002), em uma revisão da literatura, concluiu que o uso da regra de Miner para um contexto de vibração de cabos condutores causada pelo deslocamento do ar – *Aeolian vibration* é mais satisfatória que o uso da metodologia EPRI, devido principalmente aos seguintes fatores: o ponto de obtenção das amplitudes de vibração ser próximo ao contato entre o cabo e o grampo de suspensão e do detalhamento dos dados de falha do material durante e após os testes. Entretanto, salientou-se que maior número de testes deve ser executado a fim de se definir com uma maior exatidão em qual situação a regra de Miner será mais bem empregada.

Mansur *et al* (2008) avaliaram a vida restante em corpos de prova de aço SAE 8620 quando submetido à fadiga de alto ciclo para as seguintes teorias: Palmgren-Miner, Henry, Corten-Dolan, Marin, regra de danos Double Linear de Manson e a teoria do ponto do joelho da curva S-N (Knee-point). A teoria que apresentou os melhores resultados para condições de carregamento, aplicados de forma alternada, foi a de Corten-Dolan, sendo que os resultados obtidos com a teoria de Palmgren-Miner mostraram-se muito bons para uma probabilidade de falha de 50 %.

Em 2009, Azevedo *et al* (2009) apresentaram o detalhamento do projeto, construção e operação da bancada para ensaios de fadiga por *fretting* de cabos condutores de energia, localizada no Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Essa bancada permite a realização de ensaios com rigoroso controle da amplitude de deslocamento medido no ponto padrão (localizado sobre o cabo a 89 mm do último ponto de contato entre o cabo e grampo de suspensão) em malha fechada, dos instantes em que ocorrem as rupturas dos fios de alumínio e da carga de pré-esticamento do cabo condutor. Mostrou-se nesse trabalho que a intensa degradação, como a deformação plástica e a perda de material incluindo a manta de Zinco, da rosca dos parafusos de aço carbono que fixam o grampo de sustentação ao cabo, também tem grande importância no processo de dano, sendo fundamental o controle da especificação dos componentes dos grampos para a realização de testes em larga escala.

Metodologias de Avaliação da Vibração em Condutores

As medições da amplitude da vibração eólica em cabos condutores são essenciais para avaliação do dano. As metodologias que serão apresentadas neste item do relatório são comumente utilizadas na determinação da severidade da vibração nas linhas de transmissão.

Metodologia do EPRI

A metodologia do EPRI sugere valores máximos de amplitude de flexão e de amplitude de tensão, definidos como limites de resistência, para vários tipos de condutores. Caso esses patamares de amplitude fossem ultrapassados, a integridade do cabo estaria condenada pelo critério de fadiga. Esses valores são válidos para condutores suspensos por grampos metálicos rígidos com um perfil interno liso, sendo definidos principalmente para condutores ACSR (EPRI, 1979).

Considerando um cabo ACSR com mais de uma camada de fios de alumínio, a amplitude máxima de flexão varia entre 0,2 e 0,3mm podendo ser considerado um único valor de 0,23mm, caso haja uma falta de precisão na estimativa do limite de resistência do condutor (IEEE, 2007).

$$Y_b = 4\sigma_a \frac{e^{-pX_b} - 1 + pX_b}{E_{al} p^2 d_{al}}$$

Essas amplitudes de flexão foram calculadas por meio da equação invertida de Poffenberger-Swart baseando-se nos limites de resistência à fadiga, obtidos mediante testes laboratoriais para diferentes tipos de cabos ACSR de diferentes tamanhos (IEEE, 2007):

Para um cabo ACSR com uma camada de fios de alumínio, o limite de resistência à fadiga é de 22,5 MPa, enquanto que para duas ou mais camadas esse valor é de 8,5 MPa.

No caso de condutores de alumínio homogêneos, não há aparentemente dados suficientes para a determinação dos limites de resistência à fadiga. Contudo, esses dados sugerem a possibilidade do uso dos mesmos limites anteriormente mencionados para ligas 1350 e 5005, enquanto que, para as ligas 6201 e similares, os limites de fadiga sugeridos são de 15 MPa para cabos com uma camada de fios de alumínio e 5,7 MPa para duas ou mais camadas (IEEE, 2007).

Para o cabo Grosbeak, os valores das amplitudes máximas de tensão (S_a Y_b) e flexão foram especificados de acordo com diferentes EDS's. Para EDS's iguais a 15, 20, 25 e 30%, o valor de S_a permanece constante igual a 8,50MPa, enquanto que os valores de Y_b são iguais a 0,26, 0,24, 0,23 e 0,22mm, respectivamente.



Metodologia do IEEE

A metodologia do EPRI pode ser considerada excessivamente cautelosa, pois utiliza como parâmetro de projeto apenas a máxima amplitude de tensão correspondente ao limite de fadiga (EPRI, 1979). Na prática, esses limites podem ser ultrapassados por um número limitado de vezes sem efeitos práticos na integridade do cabo condutor.

A extrapolação do limite de resistência proposto pelo IEEE segue as regras de que a amplitude de flexão não pode ultrapassar o limite de fadiga do material em mais de 5% do total de ciclos e de que apenas 1% do total de ciclos poderá ultrapassar 1,5 vezes o limite de fadiga. Além disso, o IEEE considera que, em nenhum ciclo da história de carregamentos, a tensão (σ) poderá alcançar duas vezes o limite de fadiga.

Metodologia do CIGRÉ WG 22-04

A metodologia do CIGRÉ WG 22-04 para avaliação da vida remanescente em condutores considera o efeito acumulativo dos ciclos de vibração adquiridos pelo medidor de vibrações (EPRI, 1979).

As amplitudes de deslocamento armazenadas na matriz gerada com os dados coletados são extrapoladas para o período de um ano, sendo posteriormente convertidas em tensões de flexão com o auxílio de uma equação semiempírica proposta por Poffenberger-Swart.

Utilizando a regra de Miner, pode-se então quantificar a fração de dano provocada por unidade de bloco de amplitude de tensão devidamente armazenado na matriz do vibrógrafo.

O cálculo da fração de dano por nível de amplitude de tensão necessita do número de ciclos de carregamento que o material resiste para um determinado nível de tensão (curva S-N). Para isso, é possível obter curvas S-N em laboratório ou utilizar uma curva teórica obtida a partir de um banco de dados experimentais para cabos condutores denominado de Safe Border Line (CIGRÉ WG 22-04). O resultado obtido por essa metodologia fornece a vida remanescente do condutor apresentada em anos.

FÓRMULA DE POFFENBERGER-SWART

Cabos condutores são formados por fios entrelaçados de forma helicoidal em diferentes camadas, cada qual com sentido oposto de entrelaçamento.

Para obter a tensão no ponto mais solicitado do cabo a partir dos dados obtidos por vibrógrafos posicionados nas proximidades do grampo, faz-se uso da fórmula de Poffenberger-Swart ($S_a = KY_b$), onde S_a é a faixa de tensão dinâmica (pico-a-pico), Y_b é a amplitude de deslocamento já explicada anteriormente e K é o fator de conversão dado por:

$$K = \frac{E_{al} d_{al} p^2}{4(e^{-pX_b} - 1 + pX_b)}$$

onde E_{al} é o módulo de elasticidade de um fio da camada mais externa, d_{al} é o diâmetro do fio da camada mais externa e p determinado por

$$p = \sqrt{\frac{T}{EI_{min}}}, \text{ onde } EI_{min} \text{ representa a rigidez do cabo à flexão.}$$

O uso da equação de Poffenberger-Swart deve ser feito com bastante atenção, pois não leva em consideração a variação da rigidez à flexão do cabo em função do comportamento dinâmico. Note que, para pequenos níveis de amplitude de tensão, deve-se esperar que os fios individuais do condutor não deslizem entre si e, portanto, o cabo se comporta como uma barra rígida, respondendo a flexão com sua máxima rigidez. Por outro lado, à medida que a amplitude de vibração aumenta, mais e mais fios passam a escorregar, e a rigidez à flexão se aproxima de EI_{min} . Nesse caso, a fórmula de Poffenberger e Swart torna-se uma melhor aproximação para os níveis de tensão na camada mais externa do cabo.

Roadmapping Estratégico

O *roadmapping* é uma ferramenta para o planejamento a longo prazo e pode surgir de análises simplificadas ou complexas sobre um determinado tema. Inicialmente, o *roadmapping* era utilizado com exclusividade no campo empresarial, voltado principalmente para o campo de desenvolvimento tecnológico e continha um forte componente confidencial. No entanto, com o passar do tempo, os *roadmaps* foram cada vez mais divulgados, e um número crescente de organizações industriais, científicas e governamentais adotou abordagens similares considerando os conceitos fundamentais e adaptando-os de acordo com o contexto (SENAI, 2008).



O *roadmapping* pode ser estratégico ou tecnológico. O estratégico tem como principal objetivo traçar representações gráficas sintéticas indicando trajetórias a serem percorridas em determinados domínios apontados como altamente promissores (CGEE, 2007). Já o tecnológico tem o objetivo de determinar as tecnologias mais promissoras, tecnologias alternativas, lacunas tecnológicas e em quanto tempo estas estarão disponíveis no mercado. Além de indicar o panorama tecnológico em um determinado tema, o *roadmapping* tecnológico também estuda a efetividade da coordenação de múltiplas tecnologias e serve para apoiar previsões de investimentos tecnológicos em áreas-alvo (CGEE, 2007).

Os *roadmaps* são o produto do *roadmapping* e fornecem um quadro para reflexão estratégica do futuro, e, no caso do *roadmapping* estratégicos considerados neste trabalho, mostram ações a serem tomadas nos campos da pesquisa, infraestrutura, tecnologia e produção de conhecimento com base no panorama do desenvolvimento nacional e internacional no tema fadiga de cabos condutores de energia elétrica e vibração eólica.

Situação da Pesquisa no Brasil e no Mundo

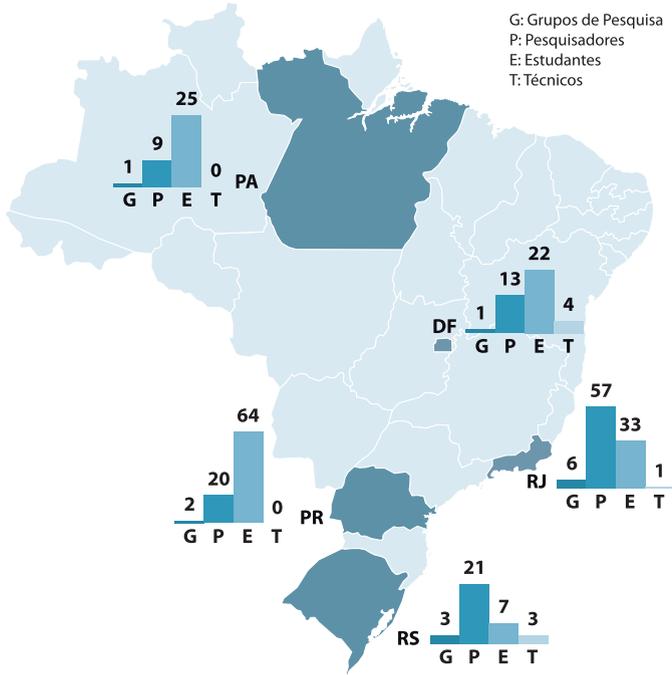
Com o objetivo de formar uma base de conhecimento sobre a fadiga de cabos condutores, foi feita uma pesquisa no diretório dos grupos de pesquisa no Brasil cadastrados no Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), patentes registradas no INPI e no exterior na base nos programas de P&D na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a partir de 2001.

A pesquisa foi realizada com base nas seguintes palavras-chave: Cabos condutores, Fadiga, Vibração Eólica, Autoamortecimento, Amortecedores para linhas, Vibrógrafo, Linhas de Transmissão, Medidor de vibrações, Stockbridge.

Em seguida, será apresentado um resumo dos principais indicadores levantados em cada uma dessas fontes de pesquisa.

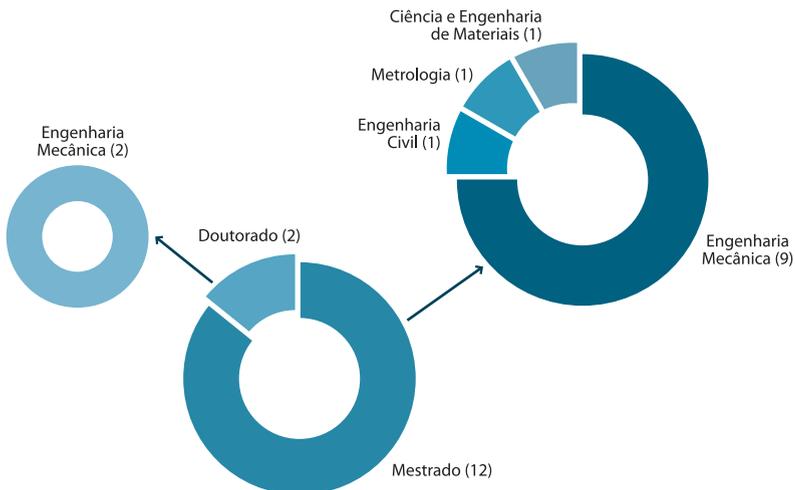
Grupos de Pesquisa Cadastrados no CNPq

Foram encontrados 13 grupos de pesquisa cadastrados no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq, conforme a distribuição da figura a seguir.



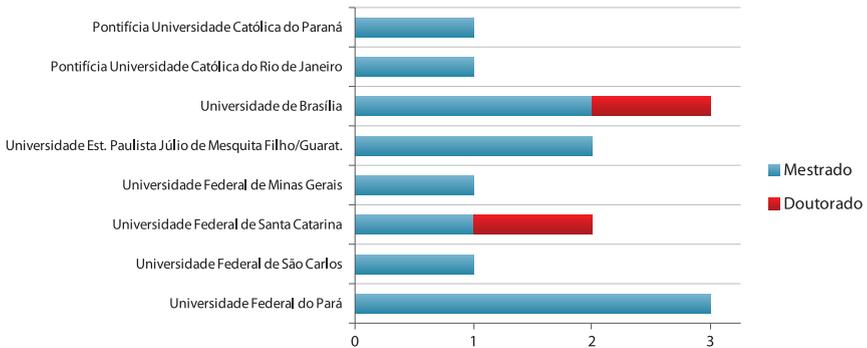
Banco de Teses da CAPES

Foram encontradas 12 dissertações de mestrado e duas teses de doutorado sobre o tema, cujos resultados estão representados na figura a seguir.





As universidades que mais produziram dissertações e teses estão indicadas no gráfico da figura a seguir, valendo destacar que as duas dissertações produzidas pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita foram nos anos de 1989 e 1990, enquanto que as demais foram defendidas entre os anos de 1999 e 2009.



Programa de P&D da Aneel

Para o tema, foram encontrados 10 programas de P&D distribuídos de acordo com os seguintes indicadores:

ANO DE INÍCIO DO PROJETO DE PESQUISA:

2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002
-	1	1	3	2	2	1

INVESTIMENTO ESTIMADO DOS PROJETOS DE P&D:

Ano Início	Investimento (R\$)
2001	-
2002	495.059,00
2003	640.751,00
2004	919.414,23
2005	2.067.436,93
2006	271.390,00
2007	187.514,00
2008	-
TOTAL	4.581.565,16

EMPRESAS PROPONENTES: ⁽¹⁾

- Centrais Expansion Transmissão Itumbiara Maribondo S.A. – ETIM (3).
- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP (2).
- Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. – ELETRONORTE (2).
- CEMIG Distribuição S.A. – CEMIG (2).
- Companhia Energética de Goiás – CELG (1).

Total de 5 empresas.

ENTIDADES EXECUTORAS: ⁽¹⁾

- Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos – FINATEC (4).
- Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico – CDT/UnB (1).
- Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPQD (1).
- Fundação de Apoio Institucional ao Desenvolvimento Científico – FAI. UFSCAR (1).
- Fundação Padre Leonel Franca – PADRE LEONEL (1).
- Pontifícia Universidade Católica – PUC (1).
- Universidade Federal de Minas Gerais – Escol – UFMG (1).
- Universidade Federal do Pará – UFPA-CT-DEM-GVA (1).

Total de 8 entidades.

INPI – Não foram encontradas patentes nacionais sobre o tema.

Derwent Innovations Index SM

Foram encontradas 10 patentes na combinação das palavras-chave *fatigue overhead conductors* e *fatigue overhead power lines* no período compreendido entre 1999 e 2009.

Web of Science

No *Web of Science* foram utilizadas as palavras-chave *fatigue overhead conductors* e *fatigue overhead power lines*, pesquisando artigos até o ano de 2009, e foram encontrados 17 artigos, sendo nove no período 1999-2009.

1) Entre parênteses – número de programas relacionados.



País	Número de Artigos	%
Alemanha	4	23,53%
Estados Unidos	4	23,53%
Brasil	3	17,65%
Canadá	3	17,65%
Inglaterra	2	11,76%
Índia	2	11,76%
Coreia do Sul	1	5,88%

Instituição	Número de Artigos	%
Th Darmstadt	2	11,76%
University Laval	2	11,76%
University Texas	2	11,76%
Auburn Univ	1	5,88%
Calicut Engn Coll	1	5,88%
Electrical Council Res Ctr	1	5,88%
Hanbat National University	1	5,88%
Indian Instute Technological	1	5,88%
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo	1	5,88%
Kansas State University	1	5,88%

Roadmaps

Com base nos indicadores apresentados anteriormente, foi realizada uma pesquisa junto ao grupo de pesquisadores ligados ao tema da Universidade de Brasília e produzidos dois *roadmaps*: um para a dimensão “Pesquisa e Infraestrutura” e outro para “Tecnologia e Produção do Conhecimento”.

Esses *roadmaps* estão organizados segundo a dimensão associada e cada qual contém objetivo, resumo da situação atual, ações de melhoria e cenário futuro.

O primeiro gráfico traz a crítica situação da pesquisa no Brasil em que foram encontrados poucos grupos de pesquisas, dissertações e teses nas áreas de fadiga em cabos condutores e vibração eólica. Esse é um fato preocupante, haja vista que o tema não é abordado em cursos de graduação, e a assimilação do conhecimento existente e o desenvolvimento de novas tecnologias se dão exclusivamente em nível de pós-graduação.

Apesar da grande importância das pesquisas científicas concernentes à fadiga de cabos condutores de energia, o levantamento de dados acerca dos grupos de pesquisa, pesquisadores e publicações, mostra que ainda há uma grande necessidade de crescimento nesse tema. Nas regiões Sul e Sudeste existem 11 grupos de pesquisa trabalhando no tema, enquanto nas demais regiões apenas dois grupos desenvolvem trabalhos nessa área. Sendo assim, há uma necessidade de ampliar os investimentos no tema, em especial dedicando parte desse investimento exclusivamente para as regiões Norte/Nordeste e Centro-Oeste.

Ademais, com o objetivo de ter mais atores em outras áreas do conhecimento além da Engenharia Mecânica, que domina as pesquisas no tema, é necessário induzir pesquisas em área correlatas, especialmente Engenharia de Materiais.

Nas prospecções realizadas, foram encontrados poucos projetos de P&D, baixa produção científica e inexistência de patentes nacionais. Com isso, o segundo *roadmap* indica como primeira ação a necessidade de haver uma conscientização dos gestores de P&D sobre a necessidade de ampliação do número de projetos em temas correlatos. Além disso, o número de patentes deve ser mais valorizado por empresas e agências de fomento à pesquisa, de modo que haja uma produção mais relevante de artigos científicos em revistas indexadas e de patentes depositadas.

PESQUISA E INFRAESTRUTURA

Objetivo

Formar e manter recursos humanos com competência técnica capazes de aumentar a confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica nacional. Fortalecer, ampliar e manter a infraestrutura física e laboratorial para desenvolvimento de pesquisa e prestação de serviço no tema.

Situação Atual	Ações	Cenário Futuro
<ul style="list-style-type: none">• Poucos grupos de P&D e geograficamente concentrados.• Poucas dissertações e teses produzidas, com forte concentração na Engenharia Mecânica.	<ul style="list-style-type: none">• Ampliar os investimentos no tema com parte dos recursos destinados exclusivamente para as regiões Norte/Nordeste e Centro-Oeste.• Induzir pesquisas prioritárias envolvendo outras áreas do conhecimento, principalmente em Engenharia de Materiais.	<ul style="list-style-type: none">• Desenvolvimento de competência e formação de talentos em P&D em nível nacional.• Mais atores das demais regiões e em mais áreas de conhecimento correlatas ao tema.• Infraestrutura de P&D em fadiga e vibração de cabos mais robusta e distribuída de forma homogênea.



TECNOLOGIA E PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO

Objetivo

Compreender o fenômeno da fadiga de cabos condutores e a vibração eólica. Desenvolver metodologias e produtos capazes de aumentar a competitividade de empresas brasileiras do setor de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Situação Atual	Ações	Cenário Futuro
<ul style="list-style-type: none"> Poucos projetos de P&D no tema, baixa produção científica e inexistência de patentes nacionais. 	<ul style="list-style-type: none"> Conscientização dos gestores de P&D sobre a necessidade de ampliação do número de projetos em temas direta ou indiretamente ligados à área para melhorar a confiabilidade do sistema de transmissão de energia nacional. Incentivo à proteção do conhecimento e valorização das patentes como produto nobre de ciência e tecnologia por parte das empresas e agências de fomento à pesquisa. 	<ul style="list-style-type: none"> Empresas brasileiras competitivas em nível internacional. Interação consolidada entre empresa e academia nesse tema com produção relevante de artigos científicos em revistas indexadas e de patentes depositadas.

Comentários Gerais

Apesar de a fadiga do cabo condutor ser considerado um dos problemas mecânicos mais graves no projeto de uma linha de transmissão, as pesquisas realizadas mostraram a crítica situação da pesquisa nessa área no Brasil.

Foram encontrados apenas 13 grupos de pesquisas, sendo que 11 deles (84,6%) estão concentrados nas regiões Sul e Sudeste. As dissertações e teses nas áreas de fadiga em cabos condutores e vibração eólica totalizaram apenas 14 trabalhos nos últimos anos, sendo 78,6% voltadas para o campo da Engenharia Mecânica (11) e 85,7% desenvolvidas nos últimos 10 anos.

A pouca atividade científica nessa área tem como consequência o baixo número de artigos em revistas internacionais (17), segundo pesquisa na Web of Science, e poucos projetos de P&D nas pesquisas feitas sobre fadiga, vibração eólica e medidor de vibrações. Os três temas pesquisados nos projetos de P&D totalizaram um investimento de R\$ 4.581.565,16 e com o maior investimento em 2005 onde foram iniciados três projetos, totalizando R\$ 2.067.436,93.

Os *roadmaps* produzidos sintetizaram os indicadores da pesquisa e ações sugeridas, dentre as quais se destacaram a necessidade de ampliação dos inves-

timentos no tema, desenvolvimento de pesquisas induzidas envolvendo outras áreas do conhecimento e o incentivo à proteção do conhecimento gerado.

Referências

Referências Teóricas

ARAÚJO, J. A.; SUSMEL, L.; TAYLOR, D.; FERRO, J. C. T.; FERREIRA, J. L. A. *On the prediction of high cycle fretting fatigue strength, theory of critical distances vs. hot spot approach*. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 75, pp. 1763-1778: 2008.

AZEVEDO, C. R. F.; HENRIQUES, A. M. D.; FILHO, A. R. P.; FERREIRA, J. L. A.; ARAÚJO, J. A. *Fretting Fatigue in Overhead Conductors: Rig Design and Failure Analysis of a Grosbeak Aluminium Cable Steel Reinforced Conductor*, *Engineering Failure Analysis*, v. 16, pp. 136-151: 2009.

CARDOU, A. *Fretting Fatigue under Spectrum Loading – Application to Overhead Electrical Conductors*: 2002.

CGEE. *Semicondutores Orgânicos: Proposta para uma Estratégia Brasileira*: 2007.

CIGRÉ-SCB2-WG11-TF7-06-01. *Fatigue endurance capability of conductor/clamp systems – Update of Present Knowledge*: 2006.

EPRI – *Electrical Power Research Institute, Transmission Line Reference Book, Wind Induced Conductor*. Motion Palo Alto, CA: 1979.

GOUDREAU, S.; JOLICOEUR, C.; CARDOU, A.; CLOUTIER, L.; LEBLOND, A. *Palmgren-Miner Law Application to Overhead Conductor Fatigue Prediction*. International Symposium on Cable Dynamics, Santa Margherita Ligure (Itália): 2003.

HARDY, C.; BRUNELLE, J. *Principles of Measurement and Analysis with the New PAVICA Conductor Vibration Recorder*. Québec, J3X 1S1, May: 1991.

HARDY, C.; DYKE, P. V. *Field Observations on Wind-Induced Conductor Motions*. Institut de Recherche d'Hydro-Québec. Varennes, Québec, J3X 1S1, Canadá: 1994.

IEEE. *Guide for Aeolian Vibration Field Measurements of Overhead Conductors*: 2007.

GOPALAN, T. V. *New excitation system for indoor testing of overhead conductors*. *Journal of Energy Engineering*, v. 119, n. 3, pp. 159-167: 1993.

MANSUR, T. R.; PALMA, E. S.; JÚNIOR, A. A.; PINTO, J. M. A. *Estudo Comparativo para Avaliar Vida Restante em Aço SAE 8620, quando Submetido à Fadiga de Alto-Ciclo*: 2008.



MCGILL, P. B.; RAMEY, G. E. *Effect of Suspension Clamp Geometry on Transmission Line Fatigue*. Journal of Energy Engineering, v. 112, n. 3: 1986.

RAMEY, G. E.; SILVA, J. M. *An Experimental Evaluation of Conductor Aeolian Fatigue Damage Mitigation by Amplitude Reduction*. IEEE PES Summer Meeting, Portland, Oregon, pp. 26-31, July: 1981.

RAMEY, G.E. *Conductor Fatigue Life Research*. EPRI Project 1278-1 Final Report (Phase III) draft submitted for review, novembro: 1984.

RAMEY, G. E.; ASCE, A. M.; DUNCAN, R. R.; BRUNAIR, R. M. *Experimental Evaluation of S-N Curves for Drake ACSR Conductor*. Journal of Energy Engineering, v. 112, n. 02, pp. 138-151: 1986.

POFFENBERGER, J. C.; SWART, R. T. *Differential Displacement and Dynamic Conductor Strain*: 1965.

Rotas Estratégicas para o Futuro da Indústria Paranaense: Roadmapping de Metal Mecânica – Horizonte de 2018. SENAI, Departamento Regional do Paraná. Curitiba, SENAI/PR: 2008.

SHARP, M. L.; NORDMARK, G. E.; MENZEMER, C. C. *Fatigue Design of Aluminum Components & Structures*: 1996.

ZHOU, Z. R.; GOUDREAU, S.; CARDOU, A.; FISET, M. *Single wire fretting fatigue tests for electrical conductor bending fatigue evaluation*. Wear, pp. 181-183, pp. 531-536: 1995.

ZHOU, Z. R.; CARDOU, A.; GOUDREAU, S.; FISET, M. *Fundamental investigations of electrical conductor fretting fatigue*. Tribology International, v. 29, pp. 221-232: 1996.

CAPES – Teses e Dissertações de Universidades (14)

2009 (3)

T01-09 – BELLORIO, M. B. *Revisão sobre Critérios de Fadiga para Cabos Condutores de Energia e uso de Metodologia para Estimativa de sua Vida Remanescente*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Distrito Federal: 2009.

T02-09 – HORTÊNCIO, T. M. O. S. *Ensaio de Fadiga Sob Condições de Fretting com o Cabo CAA 397,5 MCM - IBIS*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Distrito Federal: 2009.

T03-09 – ROLIM, A. L. *Contribuições para o estudo de Tensões Mecânicas Induzidas por Vibrações Eólicas em Cabos de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Pará: 2009.

2008 (1)

T01-08 – SANTOS, A. S. *Estudos de vibrações eólicas em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Pará: 2008.

2006 (2)

T01-06 – HENRIQUES, A. M. D. *Bancadas de ensaios mecânicos à fadiga de cabos de condutores de energia*. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Distrito Federal: 2006.

T02-06 – SILVA, V. P. *Estudo Numérico e Experimental de Amortecedores tipo Stockbridge para Linhas Aéreas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Paraná: 2006.

2005 (2)

T01-05 – LAVANDOSCKI, R. *Estudo das propriedades mecânicas de cabos condutores elétricos do tipo CAA usados e sua adequação ao retracionamento*. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo: 2005.

T02-05 – NOGUEIRA, M. M. *Avaliação metrológica de acelerômetro óptico utilizando redes de Bragg. Aplicação em linha de transmissão de energia*. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2005.

2003 (1)

T01-03 – ARANHA JR., G. Y. R. *Formação de um Elemento Finito pelo Método das Forças para Análise Dinâmica Não Linear Geométrica de Estruturas Aporticadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Pará: 2003.

2002 (1)

T01-02 – FONSECA, B. Q. A. *Análise de vida útil de cabos condutores*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais: 2002.

2001 (1)

T01-01 – PIÑA, S. E. F. *Dinâmica de Estruturas Compostas Metal Elastômero: Uma Abordagem Generalizada*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina: 2001.



1999 (1)

T01-99 – NETO, J. M. S. *Identificação de parâmetros materiais e estruturais no domínio da frequência*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina: 1999.

1990 (1)

T01-89 – PERES, M. P. *Estudo de Amortecedores de Vibração de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/Guaratinguetá, São Paulo: 1990.

1989 (1)

T01-89 – TOMAZINI, J. E. *Análise Dinâmica do Amortecedor Stockbridge*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho/Guaratinguetá, São Paulo: 1989.

Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL (10)

2007 (1)

A01-07 – *Impacto do tratamento criogênico profundo nas propriedades físicas e mecânicas de ligas de alumínio de uso em linhas de transmissão e subestações*. CENTRAIS EXPANSION TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA S.A. – EXPANSION – CENTRO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – CDT/UnB: 2007.

2006 (1)

A01-06 – *Acúmulo de dano por fadiga em cabos condutores de alumínio submetidos a blocos de carregamento com amplitude variável*. CENTRAIS EXPANSION TRANSMISSÃO ITUMBIARA MARIMBONDO S.A. – ETIM. FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS - FINATEC: 2006.

2005 (3)

A01-05 – *Resistência Dinâmica e Avaliação da Utilização da Fórmula de Poffenberger-Swart para Sistemas Cabo/Grampo Operando com Altos Níveis de Tensão de Trabalho*. CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE. FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS - FINATEC: 2005.

A02-05 – *Efeito da carga de pré-esticamento na resistência à fadiga de cabos condutores de energia.* CENTRAIS COMPANHIA ENERGÉTICA DE GOIÁS – CELG. FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS - FINATEC: 2005.

A03-05 – *Medidor de amplitude de vibração a redes de Bragg para cabos em linhas de transmissão.* CENTRAIS EXPANSION TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA S.A. – EXPASION. FUNDAÇÃO PADRE LEONEL FRANCA. Pontifícia Universidade Católica – PUC: 2005.

2004 (2)

A01-04 – *Desenvolvimento de metodologia para determinação da vida útil de cabos condutores utilizados em Linhas Aéreas de Subtransmissão e Transmissão de Energia Elétrica.* CENTRAIS COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. Universidade Federal de Minas Gerais - ESCOL - UFMG/EE: 2004.

A02-04 – *Pesquisa aplicada em tecnologias de sensores óticos a fibra p/ monitoração e supervisão remota de redes de energia elétrica.* CENTRAIS COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES – CPQD: 2004.

2003 (2)

A01-03 – *Estudo experimental da ruptura de cabos de transmissão de energia devido à fadiga.* CENTRAIS COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP. FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS - FINATEC: 2003.

A02-03 – *Análise de retracionamento de cabos condutores e pára-raios antigos com deslocamento do ponto de grampeamento.* CENTRAIS COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA – CTEEP. FUNDAÇÃO DE APOIO INSTITUCIONAL AO DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - FAI. UFSCAR: 2003.

2002 (1)

A01-02 – *Desenvolvimento de um Programa para Prognóstico, Monitoração e Controle de Vibração em Condutores de LT's na Região Norte.* CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETRONORTE. Universidade Federal do Pará - UFPA-CT-DEM-GVA: 2002.



CAPÍTULO 15

Conclusões

Sergio de Oliveira Frontin



Conclusões

Sergio de Oliveira Frontin

Objetivo

Este capítulo consolida os principais fatos e conclusões apresentados nos capítulos anteriores.

Conclusões

Otimização Integrada de Linhas de Transmissão

Foi apresentada uma visão global dos aspectos relacionados às linhas de transmissão, de modo a facilitar o entendimento deste projeto de P&D relacionado à prospecção e hierarquização das inovações tecnológicas. Todos os parâmetros que foram apresentados e analisados devem ser reunidos de maneira lógica e tratados de forma integrada na procura do projeto global otimizado. Certamente, este é o desafio mais significativo dos técnicos envolvidos com as diversas etapas de implantação de linhas de transmissão, qual seja a determinação do projeto da linha de transmissão mais econômico no atendimento aos diversos requisitos, normas, critérios e restrições (Capítulo 1).

Linhas de Transmissão em Operação

Em 2009, a extensão das linhas de transmissão em operação no sistema elétrico brasileiro era de 144.672 km, considerando as tensões de 138 kV a 750 kV, incluindo os dois bipolos de corrente contínua do sistema de transmissão da Usina de Itaipu (Capítulo 2).



Evolução da Expansão

No período 1999 – 2009 ocorreu um acréscimo total de 30.236 km com média anual de 2.748 km. As linhas de 500 kV apresentaram o maior aumento com cerca de 90 % no período. As linhas de 138 e 230 kV tiveram menores acréscimos, mas continuam com as maiores extensões (Capítulo 2).

Expansão do Sistema

O Plano Decenal 2019 aponta uma evolução no período de 2010 a 2019 para a Rede Básica (sem as linhas de 138 kV) de 36.797 km. Nesta evolução, nota-se que as linhas de 500 kV continuam com crescimento importante. Neste período, deve enfatizar que, além da inclusão do sistema de Corrente Contínua do Rio Madeira em 600 kV atualmente em construção, foi adicionado à alternativa de um possível sistema de Corrente Contínua para a Usina de Belo Monte com extensão total de 4.600 km. Considerando o Sistema de Itaipu, a extensão total das linhas de CC estimada para 2019 é de 10.962 km (Capítulo 2).

Desempenho de Linhas a Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica é a causa principal de desligamento forçado das linhas de transmissão, o que indica a relevância de investigação de medidas que possam reduzir a frequência e duração deste tipo de desligamento, seja mediante maior blindagem e isolamento dos espaçamentos elétricos, seja mediante religamentos com alta probabilidade de sucesso etc. É igualmente importante notar o efeito da sazonalidade desta perturbação que atua com maior intensidade nos meses de janeiro, março e outubro (Capítulo 3).

Desempenho de Linhas a Queimadas

A segunda maior causa de desligamentos forçados refere-se a queimadas próximas às linhas. A partir de julho, o efeito das queimadas começa a aumentar com o máximo ocorrendo em outubro, tendo em vista principalmente o período de colheita em diversas regiões do Brasil. Isto indica a necessidade de um trabalho de conscientização, a fim de reduzir o número de ocorrências. A investigação de métodos de detecção e informação dos pontos críticos ao longo das linhas é importante para a aplicação de medidas preventivas (Capítulo 3).

Desligamentos Simultâneos de Linhas

A partir do ano de 2006, o ONS passou a incluir nos seus relatórios as estatísticas de desligamentos simultâneos de linhas de transmissão. Estes in-

dicadores são muito importantes, pois as falhas mais críticas dos sistemas elétricos correspondem geralmente a falhas simultâneas, o que pode ocorrer, por exemplo, quando um mesmo raio desliga simultaneamente os dois circuitos de uma linha de circuito duplo ou quando raios bifurcados atingem duas linhas no mesmo corredor ou, às vezes, com vários quilômetros de separação, ou quando a saída de um circuito produz a saída de outros, seja por sobrecarga ou por outras causas (Capítulo 3).

Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento

No período de 2000 a 2007, foram analisados 102 Projetos no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL apresentados por um total de 31 empresas proponentes e 51 empresas/entidades executoras. Os investimentos totais no período foram de R\$ 58.509.065,25. O destaque é para assuntos relativos a Monitoramento e Meio Ambiente que, juntas, levam cerca de 55% do investimento (Capítulo 4).

Evolução dos Investimentos

Notou-se que, após o ano de 2001, acontece um “boom” de investimentos em P&D na área de linhas de transmissão atingindo um auge no ano de 2005. Porém, a partir deste ano, os investimentos se reduziram. Este movimento acompanha não somente os valores em investimento, mas também o número de pesquisas (Capítulo 4).

Empresas Participantes do Programa de P&D

No que tange às empresas proponentes, a Eletronorte destacou-se bastante com relação às demais, apresentando 22 projetos. O Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e a Universidade do Pará (UFPA) demonstraram ser grandes pólos de execução de projetos de P&D com 12 e 6 projetos, respectivamente. O CEPEL e o CPQD também demonstraram muito interesse no assunto (Capítulo 4).

Teses Acadêmicas

Foi analisado um total de 83 teses registradas entre os anos de 1999 e 2008 no banco de dados da CAPES, entre mestrados profissionalizantes, mestrados e doutorados. Dentre estas teses, a maioria concentrou-se na área de Estudos e Projetos, com 27 teses, Estruturas com 13 teses e Condutores e Meio Ambiente com 11 teses cada. Entre as instituições que mais se destacam na produção de trabalhos acadêmicos está a Universidade de Pernambuco com 15% das teses, seguida das Universidades de Minas Gerais e Rio de Janeiro (Capítulo 4).



Patentes

Uma pesquisa no banco de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) não revelou uma produção nacional muito forte no campo de patentes. Foram encontradas apenas 13 patentes no período de 2000 a 2008. Destaques para as áreas de Manutenção e Monitoramento com cinco patentes cada uma (Capítulo 4).

Trabalhos Publicados

Foram analisados 533 informes, sendo 117 trabalhos publicados no SNPTEE (2001-2009), 136 artigos publicados nas bienais do CIGRÉ (1998-2008), 82 artigos da base de dados do IEEE (sendo 72 entre os anos 2006 e 2009). Percebe-se que a maior parte dos trabalhos em linhas de transmissão concentra-se nas áreas de Estudos e Projetos, Monitoramento e Condutores, ficando os outros temas com uma distribuição praticamente igualitária em número de trabalhos (Capítulo 4).

Trabalhos Publicados no SNPTEE

Com base nos informes publicados no SNPTEE, as áreas que mais se mostraram em evidência foram: Estudos e Projetos e Condutores, que somam 54 trabalhos, o que representa mais de 40% dos trabalhos publicados. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e Furnas Centrais Elétricas S.A. foram as entidades que apresentaram maior número de informes. A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte), COPEL Geração e Transmissão S.A. e o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) também tiveram importante participação no SNPTEE (Capítulo 4).

Trabalhos Publicados no CIGRÉ

O CIGRÉ tem dado mais atenção aos temas Monitoramento e Recapitação, ficando Estudos e Projetos em terceira posição com relação ao número de trabalhos publicados. Juntas, estas três áreas representam 55% dos trabalhos publicados pelo CIGRÉ em suas Bienais desde 1998 (Capítulo 4).

Trabalhos Publicados pelo IEEE

A base de dados do IEEE aponta para áreas que se preocupam com a natureza elétrica da linha de transmissão. Problemas envolvendo isoladores foi um dos temas mais discutidos entre os anos de 2006 e 2009, seguido pelos temas Estudos e Projetos e Monitoramento (Capítulo 4).

Participação Internacional

Os Estados Unidos, Brasil, Canadá, China, Japão e a Alemanha foram os países que mais se destacaram no CIGRÉ, considerando o número de informes apresentados no CIGRÉ e IEEE (Capítulo 4).

Publicações Internacionais

Com o objetivo de obter uma visão geral quantitativa do número de trabalhos publicados no exterior nos diversos revistas e periódicos científicos e identificar os países e instituições mais atuantes, foi feita uma busca com o tema *Overhead Power Line* na base de dados do *Web of Science*. A busca considerou os anos de 1999 a 2009. Foi encontrado um total de 297 trabalhos. Dentre os países que mais se destacaram na publicação de artigos estão Estados Unidos, Japão, Itália e Canadá. O Brasil aparece em 12º lugar no *ranking* (Capítulo 4).

Prospecção dos Temas Mais Promissores

Como resultado das prospecções realizadas, foram selecionados 98 temas mais promissores em termos de desenvolvimento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Espera-se que os investimentos em P&D nos temas apontados possam trazer benefícios para redução dos custos decorrentes das diversas atividades para implantação de uma linha de transmissão, melhoria do desempenho com consequente redução das saídas das linhas, redução dos impactos ambientais e indicação de novos processos e tecnologias que possam ser utilizados para aumentar a capacidade das linhas existentes e aplicados na expansão do Sistema Elétrico (Capítulo 13).

Classificação dos Temas Mais Promissores

Estes temas foram classificados em 11 áreas indicadas abaixo. Devido-se, entretanto, enfatizar que muitos dos temas podem ser classificados em mais de uma área, considerando a sua abrangência. Entre parêntesis, o número de temas selecionados por área (Capítulo 13).

- Estudos Integrados – Confiabilidade (8).
- Efeitos Eletrostáticos – Eletromagnéticos (6).
- Desempenho de Linhas de Transmissão (8).
- Recapacitação de Linhas de Transmissão (9).
- Estruturas (7).
- Fundações (6).
- Condutores de Linhas de Transmissão e Cabos OPGW (12).
- Isoladores de Linhas de Transmissão (11).



- Manutenção de Linhas de Transmissão (7).
- Monitoramento (10).
- Meio Ambiente (14).

Metodologia de Hierarquização – Delphi

Identificados e classificados os temas mais promissores, seguiu-se às atividades de hierarquização destes temas. Para esta tarefa, foi utilizada a metodologia Delphi que foi aplicada em duas rodadas de consulta aos especialistas. A primeira rodada ocorreu por meio de consulta presencial aos especialistas presentes em Seminário realizado no dia 28 de abril de 2010 na cidade de Brasília. A segunda rodada da metodologia Delphi foi realizada por intermédio de questionário enviado via *internet*, considerando 15 temas mais pontuados na primeira rodada. Para cada tema, foram apresentadas cinco perguntas específicas, relacionadas às dimensões Desempenho, Expansão do Sistema, Custos, Melhoria do Sistema Existente, Meio Ambiente (Capítulo 13).

Resultados da Hierarquização

Com base nas respostas dos especialistas, foi possível estabelecer a hierarquização dos temas mais promissores onde se verifica a seguinte ordem de preferência por blocos de assuntos: Projetos de Torres, Compactação, Recapacitação, Monitoramento e Geoprocessamento, Condutores, Manutenção, Isoladores, Efeitos Eletrostáticos e Eletromagnéticos (Capítulo 13).

Análise de Sensibilidade

Para verificar a robustez dos dados utilizados para a hierarquização dos temas prioritários para investimento em Pesquisa e Desenvolvimento no setor de linhas de transmissão, foi desenvolvida metodologia de análise da sensibilidade dos pesos utilizados para a autoavaliação e impacto das dimensões. Os resultados demonstraram que a hierarquização encontrada é bastante sólida (Capítulo 13).

Vibração Eólica e Fadiga de Condutores

Esse foi o tema escolhido para exemplificar a aplicação da metodologia de *Roadmapping Estratégico*. A escolha deste tema foi devido ao alto custo do cabo condutor na construção de uma linha de transmissão e ao fato de a fadiga ser considerada um dos problemas mecânicos mais graves no projeto de uma linha, mas por outro lado um dos menos compreendidos (Capítulo 14).

A Metodologia de *Roadmapping*

O *roadmapping* é uma ferramenta para o planejamento a longo prazo. Inicialmente, o *roadmapping* era utilizado exclusivamente no campo empresarial, voltado principalmente para o desenvolvimento tecnológico de produtos, muitas das vezes de caráter confidencial. Contudo, com o passar do tempo, os *roadmaps* vêm sendo cada vez mais utilizados por um número crescente de organizações industriais, científicas e governamentais, que adotaram abordagens similares considerando os conceitos fundamentais e adaptando-os de acordo com o contexto (Capítulo 14).

O *Roadmapping* Estratégico

O *roadmapping* estratégico considerado neste projeto aponta para o item relativo à pesquisa e infraestrutura as ações necessárias para formar e manter recursos humanos com competência técnica capazes de aumentar a confiabilidade das linhas de transmissão e fortalecer, ampliar e manter a infraestrutura física e laboratorial para desenvolvimento de pesquisas e prestação de serviços no tema. No item relativo à tecnologia e produção do conhecimento, são apresentadas ações necessárias para compreender o fenômeno da fadiga de cabos condutores e a vibração eólica e, ainda, desenvolver metodologias e produtos capazes de aumentar a competitividade de empresas brasileiras do setor de transmissão de energia elétrica (Capítulo 14).

Texto composto em *Minion Pro*, corpo 11
e títulos em *Rotis SemiSerif 55*

Brasília – Distrito Federal – Brasil
2010

ALEXANDRE MADURO-ABREU
Pesquisador Bolsista da UnB



Graduado em Administração, Mestre e Doutor em Desenvolvimento Sustentável, pelo CDS/UnB. Atualmente, é docente de graduação e pós-graduação, consultor do Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura (IICA), pesquisador em projetos associados ao Laboratório de Energia e Meio Ambiente, do Departamento de Engenharia Mecânica, da UnB, onde também realiza seu pós-doutorado na área de energias renováveis.

RICARDO RAMOS FRAGELLI
Pesquisador Bolsista da UnB



Engenheiro mecânico, Mestre em Engenharia Mecânica e Doutor em Ciências Mecânicas pela UnB. É Professor Adjunto da Universidade de Brasília (UnB) e faz parte do Grupo de Mecânica dos Materiais (Gamma/UnB) onde já desenvolveu trabalhos sobre fadiga em cabos condutores. Ex-professor Adjunto dos departamentos de Engenharia Elétrica e de Computação do Instituto de Educação Superior de Brasília (IESB).

LEONARDO BRANT MURÇA
Pesquisador Bolsista da UnB



Engenheiro mecânico e Mestre em Ciências Mecânicas pela Universidade de Brasília (UnB). Trabalha e desenvolve com o Grupo de Mecânica dos Materiais (Gamma/UnB) pesquisas relacionadas à fadiga ocasionada por vibrações eólicas em linhas de transmissão e em projetos de P&D relacionados ao comportamento mecânico de cabos condutores.

VINÍCIUS BARROS RÊGO
Pesquisador Bolsista da UnB



Engenheiro mecânico pela Universidade de Brasília (UnB). Ex-estagiário da ANEEL na Superintendência de Administração e Finanças. Foi pesquisador bolsista na área de materiais e soldagem da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal (FEUP). Trabalhou com pesquisas sobre o comportamento mecânico de cabos condutores na UnB.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) menciona no contexto do tema Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica relativo ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que a rede básica brasileira, com vida média na faixa de 20 a 30 anos de serviço, em pouco tempo apresentará inevitável degradação. Por este motivo, deve ser enfatizada a importância do desenvolvimento de tecnologias que permitam aumentar a capacidade de transporte e a confiabilidade das atuais linhas. Com este objetivo, foi desenvolvido o projeto de P&D intitulado *Inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão*. Este livro apresenta os resultados desta pesquisa.

Espera-se que os investimentos nas tecnologias mais promissoras apontadas no trabalho possam trazer benefícios para redução dos custos decorrentes das diversas atividades para implantação, operação e manutenção de uma linha de transmissão; melhoria dos índices de desempenho das linhas; redução dos impactos ambientais e indicação de novos processos e tecnologias que possam ser utilizados para aumentar a capacidade das linhas em operação. Presume-se, igualmente, que os indicadores apresentados possam fornecer subsídios importantes para a construção da Agenda Estratégica das empresas na escolha dos seus projetos de Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).



ISBN 978-85-88041-02-8



9 788588 041028