



**HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA COMO ALTERNATIVA
TECNOLÓGICA DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL
DE ÁREAS DEGRADADAS POR RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS – ESTUDO DE CASO:
ATERRO CONTROLADO DO JOCKEY CLUBE
(LIXÃO DA ESTRUTURAL – BRASÍLIA-DF)**

Relatório Final

Período – 14 de setembro 2018 a 14 de março 2021

Consórcio Projeto P&D RAEESA



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E EQUIPE DA EXECUTORA	4
1.1 – ENTIDADES	4
1.2 – EQUIPE EXECUTORA	5
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS DO PROJETO	7
2.1 – OBJETIVOS	7
2.2 – PALAVRAS CHAVES	8
CAPÍTULO 3 - ORIGINALIDADE	9
3.1 – ESTUDO DE ANTERIORIDADE	9
3.1.1 - PRÉ REALIZAÇÃO DO PROJETO DE P&D	9
3.1.2 – ESTUDO DE ANTERIORIDADE DURANTE A REALIZAÇÃO DO PROJETO DE P&D	10
3.2 – CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTADO DA ARTE	11
3.3 – ORIGINALIDADE DO PRODUTO OU TÉCNICA	34
CAPÍTULO 4 - APLICABILIDADE	41
4.1 – ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO	41
4.2 – TESTE DE FUNCIONALIDADE	42
CAPÍTULO 5 – CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO	44
5.1 – CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS	44
5.2 – CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS	50
5.3 – CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	52
5.4 – CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS	63
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS FINAIS DO PROJETO	70
6.1 – FASES DO PROJETO	70
6.2 – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	89
6.3 – RECURSOS EMPREGADOS E JUSTIFICATIVAS	90
6.4 – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	95
CAPÍTULO 7 - PEDIDOS DE CESSÃO E DOAÇÃO DE BENS	97
7.1 – PEDIDOS DE DOAÇÃO DE BENS	97
7.2 – PERMANÊNCIA NO ATIVO DA CEB GERAÇÃO S.A.	98
ANEXO I – RELATÓRIOS TÉCNICOS (24)	100
ANEXO 2 – TRABALHOS ACADÊMICOS (10)	102
ANEXO 3 – INFORMES TÉCNICOS (10)	103
ANEXO 4 – CAPÍTULOS DO LIVRO (15)	104

PROJETO RAEESA - RELATÓRIO FINAL

Período – 04 de setembro 2018 a 15 de março 2021

HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS DEGRADADAS POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. ESTUDO DE CASO: ATERRO CONTROLADO DO JOCKEY CLUBE (LIXÃO DA ESTRUTURAL – BRASÍLIA-DF)

Capítulo 1 – IDENTIFICAÇÃO DAS ENTIDADES E EQUIPE DA EXECUTORA

1.1 – ENTIDADES

ENTIDADE PROPONENTE

CEB Geração S.A.
CNPJ: 04232314/0001-70

ENTIDADE COOPERADA

CEB Lajeado S.A
CNPJ: 03677638/0001-50

ENTIDADE EXECUTORA

Fundação Universidade de Brasília – FUB
CNPJ: 00.038.174 / 0001-43
Endereço: Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Prédio da Reitoria. Asa Norte, Brasília, DF.

ENTIDADE INTERVENIENTE

Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos - FINATEC
CNPJ: 37.116.704/0001-34
Endereço: Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Edifício FINATEC. Asa Norte, Brasília, DF.

1.2 – EQUIPE EXECUTORA

Participaram do projeto um total de 26 pesquisadores e 1 auxiliar administrativo. O grupo de pesquisadores foi constituído por 9 doutores, 1 mestre, 3 estudantes de doutorado, 6 estudantes de mestrado e 7 estudantes de graduação, conforme apresentado no quadro a seguir:

Nome	Currículo Lattes	Titulação	Função
Antônio Cesar Pinho Brasil Junior (Faculdade de Tecnologia)	http://lattes.cnpq.br/3642213701314265	DO	COG
Luciano Soares da Cunha (Instituto de Geociências)	http://lattes.cnpq.br/0116073523162074	DO	COEx
Sergio de Oliveira Frontin (Faculdade de Tecnologia)	http://lattes.cnpq.br/9363537328567858	ME	COEx
Mario Benjamim Baptista de Siqueira (Faculdade de Tecnologia)	http://lattes.cnpq.br/3787439720927527	DO	PE
Rafael Amaral Shayani (Faculdade de Tecnologia)	http://lattes.cnpq.br/6471578140876893	DO	PE
André Luís Brasil Cavalcante (Faculdade de Tecnologia) (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/1515779118499986	DO	PE
Welitom Rodrigues Borges (Instituto de Geociências) (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/0799322864183147	DO	PE
Anésio de Leles F. Filho (Faculdade de Tecnologia) (09.2018 a 10.2019)	http://lattes.cnpq.br/1573568521807396	DO	PE
Carlos Alberto Gurgel Veras (Faculdade de Tecnologia) (a partir de 10.2019)	http://lattes.cnpq.br/6698982112174569	DO	PE
Fábio Cordeiro de Lisboa (Faculdade de Tecnologia) (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/2319987080713046	DO	PE
Luan Carlos de Sena Monteiro (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/1853213451758913	Dr	PE
Ana Rafaela Sobrinho de Miranda (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/7186129426467674	Dr	PE
Hugo Mesquita (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/0030757395445886	Dr	PE
Mariana dos Santos Diniz (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/7869849705278109	Me	PE
Felipe Leite Nisiyama (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/3657524268835059	Me	PE
Luciana Cesário Braga (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/8466797269298818	Me	PE
Miguel Angel Garcia (02.2019 a 08.2019)	http://lattes.cnpq.br/7816794026644226	Me	PE

Marcela C. Rodrigues. (de 11.2018 a 09.2020))	http://lattes.cnpq.br/8532690711287281	Me	PE
Giovanna Orietti Del Rey (a partir de 02.2020)	http://lattes.cnpq.br/0820018200570472	Me	PE
Maria Beatriz de Paula Macedo (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/3559798707851248	G	PE
Camila Turon Baran (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/0613333569822881	G	PE
Vitor Rodrigues Rossi (até 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/6694565406814873	G	PE
Rogier Roel Awadraj Anjis (de 11.2018 até 09.2020))	http://lattes.cnpq.br/4356604981642010	G	PE
Tiago José de Menezes Cardoso (11.2018 a 02.2020)	http://lattes.cnpq.br/3937938352219114	G	PE
Fernanda Couto Costa (de 02.2020 a 09.2020)	http://lattes.cnpq.br/9619605477522052	G	PE
Priscila Trifletti Crespo (a partir de 02.2020)	http://lattes.cnpq.br/9139628782974124	G	PE
Denise Santos Valadão (10.2018 a 10.2019)	-	TE	AA

DO - Doutor	Me - Mestrando	COG– Coordenador Geral
ME - Mestre	G – Graduando	COEx – Coordenador Executivo
Dr – Doutorando	AA – Aux Administrativo Administrativo	PE – Pesquisador

Capítulo 2 - OBJETIVOS DO PROJETO

2.1 – OBJETIVOS

O objetivo primordial deste projeto foi o desenvolvimento de uma metodologia para qualificar e quantificar técnica e economicamente a geração de energia elétrica com a recuperação energética pela hibridização de fontes alternativas como componente complementar da integração de técnicas tradicionais de remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.

A alternativa tecnológica de remediação ambiental para áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos proposta neste projeto foi o desenvolvimento de um Sistema Híbrido de Fontes Alternativas que consiste na geração de eletricidade primária por fontes alternativas integrada a sistemas de recuperação energética do tipo *Waste to Energy* (WtE). Foi considerado um subsistema de geração primário que compreende um componente solar fotovoltaico associado a um componente solar heliotérmico enquanto o subsistema de recuperação energética WtE seria composto por um componente de queima de metano (gás de aterro) associado a um componente de gaseificação do resíduo sólido urbano pré-selecionado.

A motivação para esta pesquisa se baseou no fato de que até o momento, nenhuma iniciativa tecnológica dessa natureza foi testada. Somente em algumas poucas áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos no país, a remediação utilizando a recuperação energética com gás de aterro, isoladamente, foi implantada como uma alternativa tecnológica de remediação ambiental.

Mas, acredita-se que transformar lixo em energia pode apresentar mais benefícios ambientais intrínsecos e que estes devem estar associados à redução do volume de resíduos a ser disposto em aterros sanitários, na redução de emissão de gases de efeito estufa (em particular do metano), e, no próprio benefício econômico associado à produção de eletricidade primária utilizando as áreas antropizadas dos locais de deposição de resíduos. Trata-se, portanto, de transformar um problema ambiental urbano em uma oportunidade econômica e social, com forte viés de sustentabilidade.

Uma plataforma computacional denominada de Plataforma Carolina, foi desenvolvida e estruturada de acordo com o objetivo estabelecido na temática de produção de energia com sistemas híbridos aplicados à remediação de áreas degradadas por resíduos sólidos, considerando a caracterização de todos os potenciais energéticos da área do aterro, definindo o potencial principalmente da queima do gás metano existente e as potencialidades das recuperações energética a partir da gaseificação do resíduo sólido hibridizando com os potenciais solares fotovoltaico e heliotérmico.

2.2 – PALAVRAS CHAVES

Lixão
Aterro Controlado
Resíduo Sólido Urbano - RSU
Remediação Ambiental de Áreas Degradadas
Fontes Alternativas de Geração de Energia
Combustível Derivado de Resíduo (CDR)
Hibridização de Fontes Alternativas de Energia
Potencial Energético do Gás Metano
Recuperação Energética
Energia Solar Fotovoltaica
Energia Solar Heliotérmica
Energia Térmica
Waste-to-Energy (WtE)

Capítulo 3 - ORIGINALIDADE

3.1 – ESTUDO DE ANTERIORIDADE

3.1.1 - PRÉ REALIZAÇÃO DO PROJETO DE P&D

A pesquisa de anterioridade datada de 13.09.2016, apresentada a seguir, foi realizada pela empresa Versattus Gestão de Projeto e Energia, contratada pela CEB Geração para análise da proposta do projeto de P & D.

O consultor contratado pela CEB, realizou uma ampla pesquisa de anterioridade do projeto nas seguintes bases

- Banco de Dados da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial,
- Banco de Teses da Capes,
- BDTD – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações,
- Banco de Dados de Seminários, Congressos do Setor Elétrico Nacional e Buscadores de Informações como Google/Google Scholar,

Foram feitas buscas com as palavras:

- Hibridização de (Fontes de) Geração de Energia,
- Hibridização Solar Biomassa,
- Geração de Energia de Resíduos Sólidos Urbanos.

Base da Aneel

Foi realizada uma busca no banco de dados da ANEEL, considerando os programas de P&D dos Ciclos 2001/2002 até o Ciclo 2009/2010 e a última planilha de projetos disponibilizada (Resoluções nº318 e nº512) pela ANEEL em 18/03/2015.

Verificou-se que: alguns projetos abordam a utilização de fontes de geração de energia de forma híbrida, como solar, eólica, biomassa, usando motores Sterling, a combustão interna, dentre outros. No entanto, nenhum dos projetos apresentou similaridade à proposta do projeto em análise, diferenciando-se nos aspectos de energia heliotérmica, resíduos sólidos orgânicos oriundos de lixões/aterros com análises e possibilidades de arranjos híbridos considerando a geração de energia solar (fotovoltaica e heliotérmica) e geração a partir dos resíduos sólidos urbanos (incineração e queima do gás de aterro). Além disso, não empregam uma estrutura inovadora de multi técnicas de remediação onde seja possível o seu emprego em áreas e subáreas contaminadas nas matrizes solo, água e ar, ao mesmo tempo. Desta forma entende-se que dentre os projetos encontrados, nenhum deles apresenta-se como antecedente ao projeto que pretende desenvolver Metodologia para identificação técnica econômica de hibridização de fontes de geração como alternativa tecnológica de remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.

Base INPI

Nenhum dos processos encontrados no banco de patentes do INPI é antecedente ao projeto que pretende desenvolver Metodologia para identificação e quantificação técnico-econômica de hibridização de fontes de geração de energia elétrica como alternativa tecnológica de remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Estudo de Caso – Lixão da Estrutural (Brasília).

Base Capes

Igualmente não se identificou nesta base de dados, tese ou dissertação plenamente antecedente à proposta em pauta.

Base Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

Os trabalhos encontrados nesta base não se mostraram conclusivos

Base Google e Google Scholar

Foram encontrados vários trabalhos que abordam separadamente os assuntos “hibridização de energia solar baseado em gás natural e petro derivados”. No entanto, a proposta em referência que pretende desenvolver Metodologia para identificação e quantificação técnico-econômica de hibridização de fontes de geração de energia elétrica como alternativa tecnológica de remediação ambiental de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Estudo de Caso – Lixão da Estrutural (Brasília), não pode ser ter sua anterioridade verificada de forma plena.

3.1.2 – ESTUDO DE ANTERIORIDADE DURANTE A REALIZAÇÃO DO PROJETO DE P&D

Garantido os aspectos de originalidade a partir da pesquisa de anterioridade realizada antes do início da pesquisa, foi preocupação permanente dos pesquisadores durante a realização do projeto, ampliar a busca por outras referências objetivando, não somente consolidar o entendimento prévio da condição original do projeto, mas também, obter subsídios complementares que pudessem contribuir para o avanço e mesmo aprimoramento do tema em pauta.

Neste sentido foram identificados, catalogados e analisados diversos outros informes e artigos publicados em revistas, periódicos, anais de eventos, produção acadêmica de universidades e relatórios de estudos elaborados por organizações. Esta busca foi realizada em âmbito nacional e internacional.

A seguir, se apresenta os temas que foram desenvolvidos no projeto e o número de referências pertinentes que foram analisadas:

Conversão Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (98 Referências)
Conceitos de Hub Energético (27)

Marcos Regulatórios (29)
Aproveitamento de Recursos Solar em Lixões (89)
Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica (13)
Potencial de Geração de Energia Heliotérmica (104)
Aproveitamento Energético do Gás Metano (23)
Aproveitamento Energético de Combustíveis Minerados (35)
Processos de Conversão Termoquímicos (34)
Fluxo de Metano em Lixões (36)
Investigações Geofísicas e Geotécnicas em Lixões (76)
Avaliação Ambiental em Áreas Degradadas (64)
Implantação de Sistemas Híbridos (47)

Em resumo, foi possível concluir pela não existência de projeto com a abrangência ao que foi realizado, entretanto deve ser enfatizado que as publicações analisadas certamente contribuíram para o avanço e aprimoramento da pesquisa em pauta.

3.2 – CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTADO DA ARTE

Tendo em vista a multidisciplinaridade do projeto, a elaboração do Estado na Arte, deu ênfase às possíveis tecnologias de aproveitamento energético na área de lixões de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a sua hibridização. Neste contexto, foram considerados os seguintes temas:

- conversão energética de resíduos sólidos urbanos (RSU)
- conversão termoquímica
- aproveitamento energético do gás metano
- aproveitamento energético de combustíveis minerados de aterro de RSU
- sistema solar fotovoltaico em aterros de RSU
- sistema solar heliotérmico em aterros de RSU
- hibridização de fontes de geração de energia em aterros de RSU

3.2.1- Conversão Energética de Resíduos Sólidos Urbanos

A geração de eletricidade, a partir de ciclos termodinâmicos de potência, associada à queima adequada de resíduos sólidos urbanos (ou do metano oriundo da sua decomposição bioquímica), representa uma prática moderna que pode proporcionar resultados positivos e com efeitos multiplicadores em termos da gestão ambiental para grandes e médias cidades. Esta abordagem estratégica visa mitigar um importante problema ambiental, recuperando parcialmente o aporte energético intrínseco dos materiais que compõem os resíduos sólidos. A prática de converter lixo em energia (*WtE* – *Waste to Energy*) apresenta benefícios ambientais inerentes à redução do volume de resíduos dispostos em aterros, na redução de emissão de gases de efeito estufa (em particular do metano) e no próprio benefício econômico associado à produção de eletricidade. Trata-se de transformar um problema ambiental em uma oportunidade econômica, com um viés de promoção de soluções sustentáveis.

O enfrentamento do problema ambiental associado à gestão de resíduos sólidos urbanos requer um conjunto de ações da sociedade, que compõem uma agenda contemporânea global que mobiliza políticas comuns de promoção da sustentabilidade urbana (e.g. ISWA, 2017; ONU, 2015; UNEP, 2015). A Figura 1 ilustra a linha hierárquica de prioridades para a promoção de soluções técnicas que visam ao estabelecimento de estratégias sustentáveis para a gestão de resíduos sólidos urbanos (WRAP, 2017). Nesse contexto, as estratégias de recuperação, nas quais se inserem as tecnologias *WtE*, contribuem nas ações integradas da gestão de resíduos sólidos somente ao fim da cadeia. No entanto, embora as estratégias atuais para enfrentamento do problema apresentem uma lógica com foco na redução do resíduo na fonte, bem antes do destino em aterro, as ações de recuperação final de resíduos (em contra fluxo da linha de hierarquia de gestão) podem induzir o estabelecimento de soluções que viabilizem resultados de curto prazo em face de passivos ambientais crônicos, fruto da ineficácia da gestão acumulada ao longo de décadas. Nesse sentido, as tecnologias de mineração, compostagem e *WtE*, podem ser engendradas com eficácia na gestão de resíduos sólidos urbanos, como no caso das situações críticas encontradas em grandes cidades de países em desenvolvimento (WEC, 2016; ISWA, 2017). Cabe observar que todas as quatro etapas antes da disposição final envolvem uma logística de coleta, separação e reciclagem que agregam valor ao processamento em forma de cascata, acumulando benefícios de maneira incremental. Se eficiente, este efeito cascata reduzirá o volume de material de fim de vida, como também o potencial energético do resíduo. Isto deve ser considerado no planejamento de longo prazo em unidades *WtE*. Pensar nas soluções integradas para a gestão de resíduos sólidos urbanos requer a promoção de soluções técnicas criativas, cujas dinâmicas próprias considerem cenários de transformação permanente do consumo e descarte, com estratégias sinérgicas em todas as etapas da cadeia hierárquica.

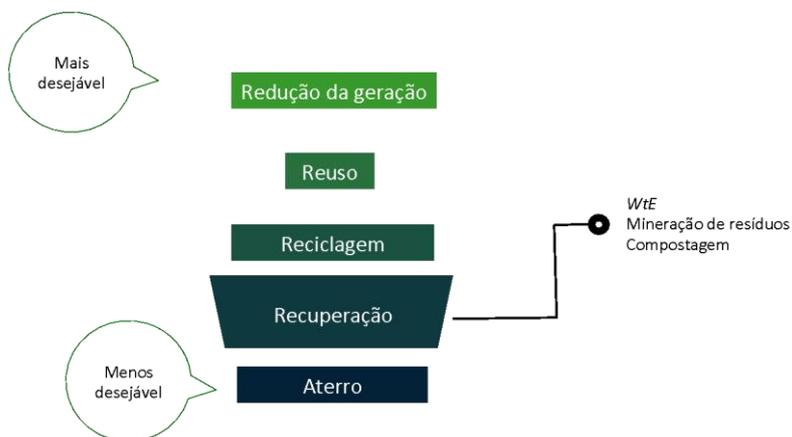


Figura 1 - Hierarquia das ações de gestão de resíduos sólidos (Gertsakis e Lewis, 2013), (European Commission, 2017), (WRAP, 2017).

No sentido de construir uma visão geral de tecnologias adequadas à recuperação de resíduos sólidos urbanos, cabe, antes de tudo, estabelecer uma definição geral sobre os diferentes tipos de resíduos sob os quais o presente trabalho será focado.

A Tabela 1 apresenta uma categorização dos diferentes tipos de resíduos sólidos que compõem uma tipologia proposta na literatura internacional sobre o tema. Em particular, serão considerados, para fins energéticos, somente os resíduos de origem residencial, comercial e de serviços urbanos. Este recorte focal visa considerar ações para a grande parte da carga de deposição em aterros urbanos – sem considerar particularidades de resíduos de fontes específicas (construção civil, resíduos perigosos, hospitalares etc), os quais requerem um tratamento diferenciado.

Tabela 1 – Tipos e fontes de resíduos sólidos (Hoorweg e Bhada-Tata, 2012; WEC, 2016).

Fonte	Tipo	Composição
Resíduos sólidos urbanos	Residencial	Restos alimentares, papel, papelão, plásticos, têxteis, couro, resíduos de jardim, madeira, vidro, metais, cinzas, resíduos especiais (por exemplo, itens volumosos, eletroeletrônicos, eletrodomésticos, baterias, óleo, pneus), resíduos domésticos perigosos, lixo eletrônico).
	Industrial	Resíduos de limpeza, embalagens, resíduos alimentares, madeira, aço, concreto, tijolos, cinzas, resíduos perigosos.
	Comercial e institucional	Papel, cartão, plásticos, madeira, resíduos alimentares, vidro, metais, resíduos especiais, resíduos perigosos, lixo eletrônico.
	Construção e Demolição	Madeira, aço, concreto, solo, tijolos, telhas, vidro, plásticos, isolamento, resíduos perigosos.
	Serviços municipais	Varreduras de rua, aparas de paisagens e árvores, lamas, resíduos de áreas recreativas.
Resíduos de processo		Sucata de materiais, produtos fora de especificação, escória, rejeitos, solo superficial, resíduos de rocha, água de processo e produtos químicos.
Resíduos médicos e hospitalares		Resíduos infecciosos (bandagens, luvas, culturas, zangaratoas, sangue e fluidos corporais), resíduos perigosos (perfurocortantes, instrumentos, produtos químicos), resíduos radioativos, resíduos farmacêuticos.

Resíduos de produção agrícola		Resíduos alimentares estragados, cascas de arroz, caules de algodão, cascas de coco, pesticidas, excrementos de animais, água suja, efluentes de silagem, plástico, máquinas de sucata, medicamentos veterinários.
--------------------------------------	--	--

Considera-se inicialmente que os resíduos apresentam uma composição média ilustrada na Figura 2 abaixo (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012; IPEA, 2012; WEC, 2016). Observa-se que grande parte dos resíduos sólidos urbanos são compostos por materiais orgânicos, oriundos de restos alimentares e outras fontes em geral (poda, lodos, madeira etc). Tal composição gravimétrica induz o estabelecimento de estratégias de adequação das ações hierárquicas, em particular para a redução de resíduos e na reciclagem (coleta seletiva, políticas públicas sobre embalagens etc).

A composição dos resíduos sólidos urbanos reflete principalmente o contexto econômico e cultural de uma dada população, em particular de seu padrão de consumo. Em países em desenvolvimento, observa-se uma tendência mais direcionada à geração de resíduos com maior composição orgânica. No entanto, tendo em vista a industrialização de economias emergentes e o processo de reconcentração de populações em cidades, este perfil vem sendo fortemente modificado nas últimas décadas (UNEP, 2015; Zaman, 2016).

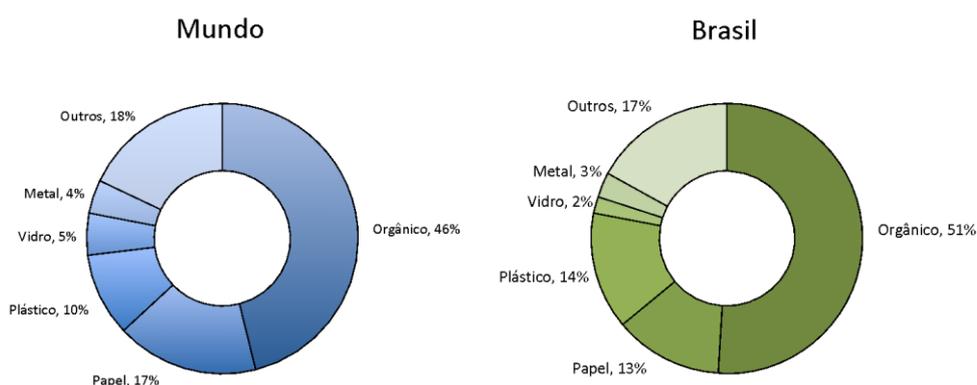


Figura 2 - Composição característica de resíduos sólidos urbanos (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012; IPEA, 2012).

A escolha de estratégias para recuperação de resíduos, antes de sua disposição final em aterro, tem uma relação direta com a composição destes. Os processos de conversão energética, por exemplo, são fortemente influenciados pelo poder calorífico do resíduo e, portanto, de sua composição (WEC, 2016). Da mesma maneira, para o processamento de compostagem, é necessário o dimensionamento da parcela orgânica do resíduo, para mitigação antes do destino final. Nesse sentido, na etapa de recuperação, um processo de triagem que separe as parcelas específicas de vidro, papel, plástico, etc, é de vital importância para o estabelecimento de um processamento final integrado, envolvendo *WtE* e compostagem.

No Brasil, onde a cadeia de aproveitamento de recicláveis pode eventualmente envolver trabalho de cooperativas de catadores (Gutberlet, 2015; Meira de Sousa Dutra, Harue Yamane e Ribeiro Siman, 2018), o processamento final de recuperação pode ser dinamizado com políticas sociais de inclusão ao final da cadeia de processamento de RSU.

3.2.2- Conversão Termoquímica

A destinação de resíduos sólidos em grandes cidades é apresentada como um importante problema social. Garantir a correta disposição de rejeitos é sobretudo um fator de saúde pública e sustentabilidade ambiental, uma vez que diversos produtos dispostos em aterros têm ciclos de vida na ordem de centenas de anos. Vários autores (Stehlík, 2009; Ali *et al.*, 2012; Kalyani and Pandey, 2014; Bajić *et al.*, 2015), em trabalhos anteriores, analisando cenários parecidos com este estudo, sinalizaram a significância da gestão de resíduos urbanos e do seu aproveitamento para conversão em energia térmica. Existe um consenso na sustentabilidade ambiental, econômica e social do uso deste recurso (Baran, Mamis and Alagoz, 2016; Zhao *et al.*, 2016), apesar de contestados por Yay (2015), que aponta baixa viabilidade econômica no processo de incineração de resíduos urbanos, devido aos altos custos de operação e manutenção. Várias soluções são analisadas para a conversão energética do resíduo sólido urbano, no entanto esta revisão tratará somente aquelas que usam processos de combustão direta (incineração), de pirólise e da gaseificação para obtenção de combustíveis derivados do resíduo.

Processos termoquímicos são métodos que através de reações físico-químicas obtêm-se geração ou consumo de calor e outros produtos gasosos, líquidos e sólidos. Os processos que geram calor são chamados de exotérmicos, já os que consomem são tidos como endotérmicos. A obtenção dos produtos pode ser direcionada de acordo com o tipo de processo que se adota.

O avanço da engenharia e da termodinâmica, tornou possível que essa energia mecânica seja convertida em energia elétrica, porém com o custo benefício não muito atrativo. A primeira Usina Termelétrica do mundo foi construída em 1882 em Nova Iorque e o problema de eficiência e custo benefício ainda é atual. No Brasil a primeira termelétrica foi acionada em 1883 na região de Juiz de Fora, junto a um complexo de duas hidrelétricas, justamente para servir de base à produção de eletricidade. Um exemplo disso é quando a ONS (Operador Nacional do Sistema de Energia Elétrica do Brasil) necessita acionar usinas térmicas para abastecimento de energia do país as tarifas de energia elétrica ficam mais caras. Um dos principais fatores que afetam esse aumento é o custo dos combustíveis utilizados, que em sua maioria são de origem fóssil.

Desde a criação da primeira máquina térmica em 1698 até os anos 1960, com o surgimento dos primeiros grupos ambientalistas, a preocupação com a poluição gerada por processos termoquímicos utilizados na indústria era pequena. No processo de combustão, que é o caso da máquina a vapor, o produto principal é o calor gerado. Os gases e outros resíduos provenientes da queima eram apenas rejeitados. Por falta de conhecimento sobre os impactos ambientais causados, o processo de combustão foi usado por mais de 200 anos sem que o tratamento de seus resíduos fosse controlado.

Outro motivo era a ausência de alternativas viáveis, o primeiro gaseificador de combustíveis (alternativa a combustão de combustíveis) foi criado em 1839 na Alemanha. Mas apenas em 1861, os irmãos Siemens constroem o primeiro gaseificador de nível industrial. Não chegou a substituir a combustão e a gaseificação também gerava resíduos nocivos ao meio ambiente. Com isso os processos termoquímicos eram sempre atrelados a poluição.

Atualmente, o conceito chamado de “*Waste to Energy*”, que basicamente significa transformar um rejeito em energia, tem contribuído para que os processos termoquímicos percam a fama de poluentes e passem a fazer parte de processos mais sustentáveis para o meio ambiente. “*Waste-to-energy*” (WtE) são processos de recuperação de energia na forma de eletricidade ou calor, a partir de resíduos. Os processos termoquímicos estão sendo amplamente utilizados no aproveitamento energético do tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), e tem o papel de dar destino final adequado ao resíduo e gerar energia com isso. Além disso, a aplicação em RSM causa outros benefícios como:

- **Redução do espaço** necessário para o aterro: Com a passar do tempo, o RSU passivo será tratado (a uma taxa muito maior que quando aterrado), diminuído a área de ocupação e o RSU que recém chegar será tratado sem necessidade de grandes depósitos;
- **Redução de contaminantes** orgânicos: o processo termoquímico consome grande parte dos contaminantes que são gerados no processo de tratamento atual dos aterros. Os RSU que chegarem a estação não serão enterrados e o que estão enterrados serão minerados e tratados;
- **Redução das emissões** de gases de efeito estufa produzido pela decomposição do RSU;
- **Alternativa para tratamento** de resíduos que o processo bioquímico de digestão anaeróbia não consegue atender devido a sua composição química.

Os principais processos termoquímicos para tratar o RSU são: Gaseificação, pirólise e queima direta (combustão completa). Segundo Coelho et al. (2006), a gaseificação, combustão e pirólise podem ser diferenciadas por dois aspectos: quantidade de oxidante utilizada no processo e pelos produtos gerados. Na pirólise não ocorre a presença de oxidante, já a combustão e a gaseificação sim. Porém o primeiro com excesso e o segundo com medidas de oxidantes inferiores às estequiométricas teóricas para combustão em razão da quantidade de carbono presente nas reações. Em relação aos produtos desejados, a pirólise gera mais compostos líquidos. A combustão visa o aproveitamento de calor, gerando subprodutos gasosos, essencialmente gás carbônico (CO₂) e vapor de água. Já a gaseificação, como o próprio nome sugere, visa à obtenção de compostos gasosos com relevante poder calorífico.

No tratamento de RSU não existe apenas um processo que possa ser escolhido e usado para todo resíduo do aterro. É necessário a junção de vários processos, para que cada um extraia uma fração de interesse no resíduo e consiga-se obter um processo global sustentável e rentável, direcionando as conversões energéticas para a redução da matéria orgânica a CO₂ e H₂O.

Um exemplo é o caso da combustão, quando usada isoladamente, queima-se os resíduos de forma direta e além de gerar perdas energéticas de produtos não extraídos é um

processo poluidor. Atualmente, com a simbiose de mais de um processo, consegue-se compensar os pontos fracos de um com outros complementares.

3.2.3. Aproveitamento Energético do Gás Metano

A conversão energética do gás de aterro, após sua extração, é efetuada pela liberação de sua energia térmica na queima reativa em câmaras de combustão de motores ou turbinas. O gás de aterro, tal como extraído, é fruto do processo de decomposição da matéria orgânica que compõe os resíduos sólidos depositados em subsolo. A composição química típica do gás é apresentada na Tabela 2, cujas faixas de valores de concentração são baseadas em relatos na literatura (ver Eklund *et al.*, 1998; Themelis e Ulloa, 2007; Terraza e Willumsen, 2009, por exemplo). Seu poder calorífico, em torno de 16 MJ/Nm³, é calculado principalmente com base no teor de metano, o principal gás combustível para fins energéticos, cujo poder calorífico é de 35,8 MJ/Nm³.

Embora boa parte do volume de gás de aterro seja composta por dióxido de carbono e metano, alguns traços gasosos merecem uma atenção particular, tendo em vista seus potenciais de formação de poluentes atmosféricos, bem como pelos seus efeitos sobre a integridade de materiais que compõem o sistema. Nesse sentido, o gás de aterro deve ser pré-processado antes de sua queima. Esta etapa (*LFG Cleaning and upgrading*) visa proporcionar os seguintes indicadores quanto à qualidade do gás (Knabael e Reinhold, 2003; Gis, Wojciech e Samson-Brek, 2012; Sun *et al.*, 2015):

- **redução do teor de umidade:** em subsolo, o gás de aterro encontra-se distribuído na matriz porosa do solo, compartilhando o volume dos poros com a solução aquosa do chorume. No processo de extração, parte do chorume é carregado junto com o gás, que também se encontra praticamente saturado de vapor d'água em sua composição. A secagem do gás é um procedimento necessário e é efetuada em equipamentos nas unidades de pré-processamento. Parte do líquido é também extraída diretamente em drenos e reservatórios de contenção na tubulação do sistema de extração;
- **remoção de traços gasosos:** em instalações de gás de aterro, um processamento prévio para a proteção de sistemas é implementado no sentido de remover siloxanos (compostos orgânicos de silício com radicais SiOx), compostos sulfurosos (em geral H₂S), amônia (NH₃) ou ainda os demais compostos orgânicos voláteis (VOC). Estes compostos são fortemente danosos à integridade de motores ou turbinas, apresentando um forte poder de corrosão de suas partes ou ainda sendo responsáveis pela deposição de óxidos sobre suas superfícies internas (Kuhn *et al.*, 2017);
- **redução do teor de dióxido de carbono:** ao reduzir o CO₂, o processamento do gás de aterro proporciona maior poder calorífico no volume de gás, modificando, assim, sua gradação (ou teor) de purificação (UK-EA, 2004).

Tabela 2. Componentes gasosos do gás de aterro (Themelis e Ulloa, 2007)

Componente	Composição típica (% em volume, base seca)
Componentes principais	
Metano (CH ₄)	40-70
Dióxido de carbono (CO ₂)	30-60
Componentes secundários	
Nitrogênio (N ₂)	3-5
Oxigênio (O ₂)	0.5-1.0
Monóxido de carbono (CO)	0-0.5
Hidrogênio (H ₂)	0-5
Traços gasosos	
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	0-400 ppm
Amônia (NH ₃)	0-5 ppm
Compostos orgânicos voláteis	0-100 ppm

As unidades de pré-processamento do gás de aterro são necessárias no sentido de garantir confiabilidade e qualidade do suprimento de gás combustível para o processo de conversão, garantindo a integridade de instalações com custos de manutenção adequados, bem como os padrões de emissões compatíveis com normas ambientais vigentes (Knabael e Reinhold, 2003; Sun *et al.*, 2015). Nesse sentido, o fluxo de aproveitamento de gás de aterro pode ser ilustrado no diagrama da Figura 3, no qual são caracterizados os diferentes níveis de purificação do gás visando a sua aplicabilidade na cadeia de aproveitamento.

A adequação das tecnologias das máquinas térmicas para a conversão da energia, a partir do uso de gás de aterro, está associada aos diferentes tipos de pré-processamento necessários ao uso conveniente do volume de gás disponível. O uso direto do gás de aterro, após sua extração, é limitado a um pequeno número de aplicações, tendo em vista seu baixo poder calorífico e os componentes nocivos presentes em sua composição. Nesse sentido, o Estado da Arte de tecnologias de utilização energética de gás de aterro e o avanço tecnológico na área compõem as rotas tecnológicas adequadas ao moderno arranjo de usinas, visando ao aproveitamento eficiente e ambientalmente compatível deste potencial energético.

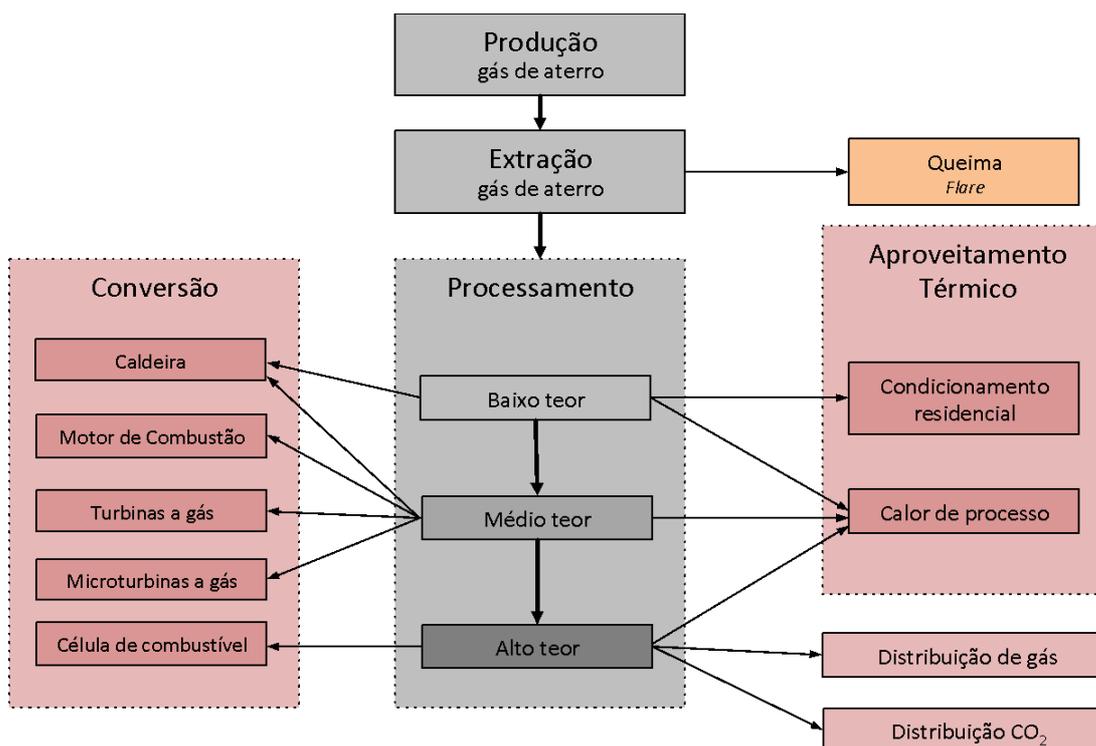


Figura 3. Aproveitamento de gás de aterro adaptado de Conestoga-Rogers, 2004

3.2.4. Aproveitamento Energético de Combustíveis Minerados de Aterro

Em sítios onde há grandes depósitos de matéria orgânica, metano é produzido por decomposição anaeróbica. O gás de aterro, se devidamente coletado, pode ser empregado na produção de calor e/ou trabalho (WtE). No caso brasileiro, há um interesse quase exclusivo na conversão do metano em eletricidade, em ciclos térmicos de motores a gás. Quando o sítio não mais recebe matéria passível de decomposição, ocorrerá, em algum momento, decaimento e esgotamento da produção de metano. Neste caso, do ponto de vista das aplicações WtE, restarão no depósito, como fontes primárias de combustível, materiais sólidos carbonosos como plásticos, papéis, madeira e outros. O emprego sistemático e com viabilidade econômica destes insumos para aplicações WtE depende de um rigoroso balanço energético do sítio obtido por amostragem, processamento e caracterização das fontes primárias depositadas previamente, associados, invariavelmente, às rotas tecnológicas de conversão disponíveis.

A retirada de insumos para conversão energética ou para o reaproveitamento de metais valiosos e/ou limpeza da área é classificada como mineração de aterro (*landfill mining*) (Krook *et al.*, 2012; Kumar & Sharma, 2014; Bhatnagar *et al.*, 2017). Cabe lembrar que a retirada de metano para aplicações WtE é também considerada uma atividade de mineração de aterro.

Recentemente, Márquez *et al.* (2019) analisaram 112 projetos de mineração de aterro, relatados desde 1953, sendo 40% na Europa, 31% na América do Norte, 21% na Ásia e 4% no Oriente. Os autores não identificaram projetos de mineração na América do Sul, na África nem tampouco na Austrália. Do ponto de vista metodológico, este trabalho tem, portanto, elevado grau de ineditismo no Brasil.

Jones *et al.* (2013) sugerem que a mineração de aterro deve ocorrer num contexto mais abrangente (*Enhanced Landfill Mining*), de tal sorte que o acondicionamento, a escavação, a valorização integrada dos depósitos materiais e energéticos devem ser implementadas por transformações tecnológicas inovadoras e respeitando critérios sociais e ecológicos. Conceitualmente, a mineração abrangente incorpora metas de redução de CO₂ e poluentes advindos dos processos de valorização tanto para produtos como energéticos (Jones *et al.*, 2013). Ao longo do texto, a Mineração Abrangente de Aterro Sanitário será referenciada como MAAS.

Segundo Bosmans *et al.* (2013), a mineração abrangente de aterro permite ao sistema gestor selecionar o momento adequado para “valorizar” os depósitos como fonte de matéria-prima (WtP – *Waste to Products*) e/ou como fonte energética (WtE - *Waste to Energy*), a depender do nível das tecnologias associadas. Aquilo que não pode ser reutilizado num dado momento pode ser reservado para mineração futura. Os autores observam que a atividade de mineração abrangente pode ser vista como uma valorização iterativa objetivando aterros novos e antigos.

Conforme destacado por Hermann *et al.* (2016), um projeto para mineração de aterro envolve um grande número de *stakeholders* em função dos diversos fatores ambientais e socioeconômicos relacionados com a atividade. Hölzle (2019) sugere que flexibilidade, pragmatismo e coordenação dos *stakeholders* são fatores chaves no negócio, dada a complexidade e particularidade de cada projeto e suas diversas interfaces. A tomada de decisão para se levar adiante um projeto de mineração de aterro deve, obviamente, ser fundamentada por um conjunto de diretrizes previamente estabelecidas. Este capítulo, portanto, busca sintetizar os elementos principais que precisam ser considerados num projeto abrangente de mineração de aterro (MAAS).

O investimento num projeto de mineração requer, naturalmente, uma avaliação multidimensional, abrangendo elementos técnicos e socioeconômicos que permitam definir o potencial do aterro para futura exploração comercial (Winterstetter *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2015; Laner *et al.*, 2019).

Winterstetter *et al.* (2018) apresentaram um processo para a classificação dos recursos buscando avaliar a potencialidade de mineração economicamente sustentável de aterro, dividido em cinco fases consideradas para cada uma delas os objetivos, fatores de influência e métodos que fundamentam o processo decisório. Segundo os autores, devem-se considerar os seguintes fatores sistêmicos na avaliação:

- legislação local;
- estruturas institucionais e organizacionais;
- desejo político/governamental;
- práticas prévias em sistemas energéticos;
- infraestrutura regional;
- mercado local para produtos secundários;

- valor de *commodities* no mercado global;
- custo local da terra.

A mineração é *in situ* quando os processos ocorrem inteiramente na área do depósito, e *ex situ* quando o material é retirado, transportado e processado em localidade distinta. Os gases leves combustíveis da pirólise, por exemplo, podem ser consumidos *in situ*, juntamente com o metano. Alguns subprodutos processados da mineração *in situ* podem ter destinação final *ex situ*, como, por exemplo, óleo, carvão da pirólise, cinzas, entre outros. Tais insumos podem ser tratados *ex situ* objetivando a sua padronização e seu incremento de qualidade como fontes energéticas (beneficiamento). Esta opção pode ser comercialmente viável, dada a alta densidade energética dos subprodutos (óleo e carvão).

Dada a complexidade e elevado custo da atividade de mineração, pode ser oportuno ou mesmo mandatório dividi-la em etapas. Sugere-se que, num momento inicial, ocorra mineração *in situ*, com foco nas aplicações WtE. Isto é, o material é processado na própria área do aterro objetivando a separação e o consumo de insumos energéticos. No decorrer da mineração *in situ*, seria conveniente classificar e quantificar materiais não energéticos com valor de mercado (*Waste to Materials*) para estudo de viabilidade da mineração *ex-situ*. Nesta modalidade, o material é coletado no aterro e transportado para ser minerado numa outra localidade e por agente especializado, seja para produzir CDR, ou recuperar metais e outros substratos com valor de mercado, ou ambos.

A rápida retirada de lixo do depósito, para processamento *ex situ*, permite que a área disponibilizada abrigue sistemas fotovoltaicos, heliotérmicos, projetos imobiliários e/ou industriais (LwW: *Land without Waste*).

Na mineração *in situ*, cabe destacar que a disponibilização de área (LwW) ocorre num ritmo mais lento se comparada com a retirada do lixo para mineração *ex situ*. Pode-se, contudo, combinar as estratégias quando a área ocupada pelo aterro for de grandes dimensões e provida de infraestrutura, como eletricidade, água, acesso para trabalhadores etc. Na medida em que a mineração *in situ* disponibilizar área, esta pode ser comercializada ou arrendada, tornando-se *ex situ* para projetos que guardem sinergia com a primeira. Dessa forma, economiza-se no transporte do material depositado para posterior processamento (mineração). Obviamente, uma avaliação mais aprofundada é necessária para definir o melhor cenário para Brasília, atendendo às expectativas dos principais *stakeholders*.

Einhäupl *et al.* (2019) estudaram a integração de *stakeholders* na avaliação de projetos de MAAS para identificar lacunas de conhecimento e incertezas relacionadas à implementação de iniciativas desta natureza atendendo a necessidades destes (*stakeholders*). Como exemplo de importante *stakeholders* de projetos MAAS, destacam-se os responsáveis pelo aterro, instituições governamentais, provedores de tecnologia, a academia e a sociedade local.

A mineração abrangente traz dois benefícios diretos ao longo do processo: a reciclagem de materiais e a recuperação energética do lixo. Se, paralelamente, medidas para tratar os poluentes também forem implementadas, ter-se-ia um benefício adicional relacionado à descontaminação da área, que isenta de lixo, materializar o quarto benefício, isto é, disponibilização da área para exploração socioeconômica.

Estas ações, contudo, precisam ser conduzidas de forma integrada e com a participação dos *stakeholders* principais. Um projeto de mineração requer investimentos de capital, de operação e controle do aterro. Parte do investimento pode ser recuperado pela reciclagem de metais e outros materiais de valor, pela venda de eletricidade e, na medida em que o processo avance, pela possível comercialização da área recuperada.

3.2.5 Sistema solar fotovoltaico em aterros de resíduos sólidos urbanos

O sistema fotovoltaico é uma tecnologia inovadora de geração de eletricidade. As formas convencionais tipicamente necessitam queimar um combustível, muitas vezes de origem fóssil, para movimentar mecanicamente o eixo de um gerador, o qual converte energia mecânica em energia elétrica. Já o sistema fotovoltaico funciona de forma eletrônica, por meio do efeito fotoelétrico, onde os elétrons dispostos na célula solar absorvem a energia do sol e se tornam livres, circulando diretamente pelos condutores em forma de corrente elétrica (Frontin *et al.*, 2017). Não há queima de combustível, conseqüentemente não emitindo gases de efeito estufa durante sua operação, além de possuir baixa manutenção e funcionar sem fazer barulho por não ter o desgaste de peças rotativas. Essas características permitem que seja gerada energia renovável em qualquer lugar que a irradiância do sol seja adequada. Tal característica possibilita que a geração de energia ocorra independentemente do solo em que o painel está instalado, sendo uma opção interessante para ocupar a área disponível em aterros de Resíduos Sólidos Urbanos.

O componente principal do sistema fotovoltaico é a célula solar, que converte a energia solar em eletricidade. Ela é tipicamente produzida em formato quadrado de 12,5 cm ou 15 cm. Elas são classificadas em cristalinas (monocristalina e policristalina), multijunção, filme fino ou orgânico. As células cristalinas de silício correspondem a mais de 97% da produção anual. As células monocristalinas possuem eficiência entre 16% e 25%. As policristalinas possuem eficiência menor, entre 14% e 18%, porém possuem custo de produção menor. As células multijunção de Arsenieto de Gálio (GaAs) possuem eficiência superior a 40% e, devido ao seu custo mais elevado, são tipicamente utilizadas com concentradores conectados a sistemas de rastreamento do sol. As células de filme fino requerem menos matéria-prima, reduzindo o custo de produção. Os materiais mais utilizados são Telureto de Cádmio (CdTe) e Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS e CIS). A eficiência de CdTe já alcançou 21% em laboratório, e possui 16% em produtos comerciais. Os filmes finos de silício possuem eficiência menor, de 7%. As células de perovskita estão sendo estudadas em laboratório (IEA-PVPS, 2018).

As células fotovoltaicas são interconectadas entre si e encapsuladas, formando o módulo fotovoltaico, com potências típicas entre 50 W e 400W. Os módulos são fixados em estruturas de sustentação, que podem ser fixas ou possuírem rastreadores de sol, visando aumentar a incidência da radiação solar sobre a célula fotovoltaica. Os rastreadores podem ser de um eixo, aumentando a produção de energia entre 25% e 35%, ou de dois eixos, promovendo um aumento da energia gerada entre 35% e 45%. Vários módulos são conectados juntos, formando um arranjo, o qual é conectado a um conversor CC-CA, responsável por converter a corrente contínua gerada pelo efeito fotoelétrico em corrente alternada com valores de tensão e frequência compatíveis com a rede elétrica (IEA-PVPS, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos apresentam crescimento acentuado na última década. A quantidade de potência instalada em 2017 alcançou a marca de 99 GW, com destaque para a China. No mundo foram registrados 403 GW de potência instalada acumulada em 2017. Esse rápido crescimento é acompanhado de uma drástica redução do custo dos módulos, que tiveram seu custo drasticamente reduzido na última década (IEA-PVPS, 2018).

Para que possa ser estimada a produção de energia por um sistema solar fotovoltaico, é necessário conhecer o recurso solar incidente no local. Essa informação é disponibilizada em atlas solarimétricos (Figura 4). A Tabela 3 apresenta valores médios para as regiões brasileiras (Pereira *et al.*, 2017).

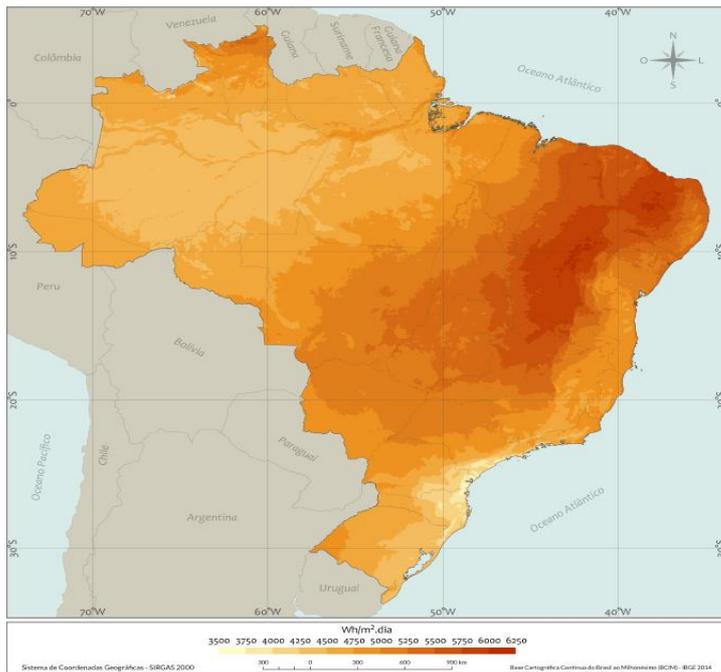


Figura 4. Total diário da irradiação global horizontal - Média anual. Fonte: (Pereira *et al.*, 2017).

Tabela 3. Irradiação média global, no plano inclinado e direta normal para as regiões brasileiras.

	Irradiação global horizontal [kWh/m2.dia]	Irradiação no plano inclinado [kWh/m2.dia]	Irradiação direta normal [kWh/m2.dia]
Região Norte	4,64	4,66	3,26
Região Nordeste	5,49	5,52	5,05
Região Centro-Oeste	5,07	5,20	4,53
Região Sudeste	5,06	5,26	4,75
Região Sul	4,53	4,77	4,20

Conforme dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica, o Brasil possui 70.906.513 consumidores residenciais, que consumiram em 2017 o montante de 134.368 GWh de energia elétrica, o que representa um consumo médio de 1.895 kWh/ano (EPE, 2018). Com base nestes dados é possível inferir que em média uma área de 1 ha pode gerar energia elétrica suficiente para abastecer 600 residências típicas brasileiras.

Os aterros de Resíduos Sólidos Urbanos geralmente apresentam grandes áreas com baixo valor de mercado, por não possuírem condições ambientais adequadas para utilização por estabelecimentos comerciais ou residenciais. Essas áreas podem ser utilizadas para a instalação dos painéis fotovoltaicos, os quais apresentam os seguintes benefícios (Kiatreungwattana *et al.*, 2013):

- reuso ambientalmente correto do local;
- geração de energia renovável, reduzindo os impactos ambientais associados à geração de energia por fontes fósseis na matriz energética nacional;
- investimento economicamente viável e atrativo, que pode auxiliar a reduzir o custo do “*cleanup*”; e
- possibilidade de “*green remediation*”, onde há redução do impacto ambiental do “*cleanup*” ao utilizar a própria energia renovável produzida no local para as atividades de remediação que necessitam de insumos energéticos, tais como calor e eletricidade.

Além disso, os aterros costumam apresentar aspectos logísticos que podem facilitar a instalação de um sistema de geração de energia (Kiatreungwattana *et al.*, 2013):

- geralmente estão localizados próximos de ruas e estradas, o que facilita o acesso de caminhões para a montagem da usina, visto que o percurso já era utilizado por caminhões de lixo;
- geralmente estão próximos de linhas elétricas de distribuição, facilitando a injeção da energia produzida na rede elétrica da Concessionária de Distribuição;
- sistemas fotovoltaicos podem e devem ser instalados a céu aberto, que é uma característica típica dos aterros; e
- geralmente costumam ter grandes áreas planas, o que facilita a instalação do sistema FV.

A implantação de sistemas de energia solar fotovoltaica em aterros é uma tendência que vem crescendo a cada ano. Conforme informações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*U.S. Environmental Protection Agency*), por meio de seu programa “*RE-Powering America’s Land Initiative: Renewable Energy on Potentially Contaminated Land, Landfills and Mine Sites*”, já existem 124 aterros de Resíduos Sólidos Urbanos com sistemas fotovoltaicos. Ao analisar as informações dessas instalações já existentes, pode-se constatar que, desde 2008, sistemas fotovoltaicos totalizando 288 MW foram instalados em aterros de diversos tamanhos, com área variando de 2 ha até 1000 ha, e que a potência FV instalada é, em média, de 2,3 MW, variando de sistemas pequenos de 10 kW até sistemas maiores que 16 MW. (EPA, 2019).

Informações sobre sistemas de geração de energia renovável (fotovoltaico, solar e geotérmica) instalada em outras áreas contaminadas (aterros de outros resíduos, tais como materiais industriais, madeira, óleo, materiais de construção, cinzas e papel) e demais áreas potencialmente contaminadas (áreas de mineração, *superfund* e *brownfield*) estão disponíveis na literatura (EPA, 2019).

Por outro lado, o projeto de uma usina solar fotovoltaica considera, idealmente, a disponibilidade de um solo adequado, plano, estável e sem sombreamento, para instalação dos painéis, da malha de aterramento e dos condutores que conectam os arranjos aos conversores. O solo de um aterro, pode possuir peculiaridades que podem levar a restrições ao projeto, e que, portanto, devem ser previamente analisadas.

3.2.6 Sistema solar heliotérmico em aterros de resíduos sólidos urbanos

A Tecnologia heliotérmica, também conhecida como solar térmica ou solar concentrada (CSP), se refere àquelas que permitem o aproveitamento da energia solar a altas temperaturas, em excesso a 200°C, como é o caso de conversão de energia térmica em eletricidade. No caso de coletores solares planos usados para aquecimento de água, a absorção da energia solar é proporcional à área. No entanto, a perda de energia para o ambiente é proporcional não só à área, mas também à diferença de temperatura entre o absorvedor e o ambiente, limitando assim a temperatura operacional deste tipo de coletor. Para temperaturas maiores, a solução é concentrar a energia solar opticamente desacoplando, assim, a área de absorção da área de perda de energia. Desse modo, as tecnologias heliotérmicas fazem uso de concentradores solares para absorção de energia solar arranjados em um campo solar. Uma característica relevante desses concentradores é a razão de concentração, que é definida pela razão entre a área projetada da superfície refletora no plano normal à direção do sol e a área do absorvedor (Foster, Ghassemi and Cota, 2010). Essa característica é importante, pois define limites máximos das temperaturas para cada tipo de tecnologia.

Atualmente, existem quatro tecnologias heliotérmicas que podem ser citadas como passíveis de utilização em sistemas de geração de energia, são elas: Calha Parabólica, Torre Solar, Linear Fresnel e Disco Parabólico. A Figura 5 abaixo ilustra esquematicamente essas tecnologias.

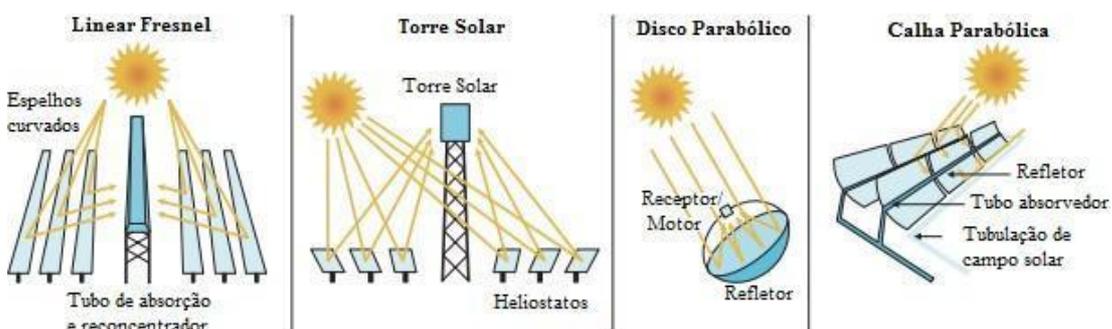


Figura 5. Tecnologias heliotérmicas adaptadas. Fonte: IEA (2014)

A tecnologia de Calha Parabólica consiste em um campo solar formado por laços de calha espelhadas em formato parabólico em que, em seu foco, é posicionado um tubo absorvedor, se tratando, assim, de uma tecnologia de foco linear com razão de concentração perto de 100/1. No interior do tubo, escoo um fluido de transferência de calor, normalmente um óleo térmico, que absorve a energia solar convertendo em energia térmica a ser posteriormente utilizada para algum propósito como, por exemplo, a geração de energia em um ciclo termodinâmico de potência. A calha é montada em uma estrutura que permite o movimento do conjunto para o rastreamento do sol. Normalmente, o posicionamento das calhas é na direção norte-sul; e o rastreamento, na direção leste-oeste.

No caso de Linear Fresnel, similarmente à Calha Parabólica, a energia solar é concentrada em tubo absorvedor. No entanto, ao invés de uma Calha Parabólica, o concentrador consiste de segmentos de espelhos (planos ou ligeiramente curvos) que são posicionados no plano horizontal, de maneira que sempre reflitam a irradiação solar no tubo absorvedor. É usual para sistema Linear Fresnel a utilização de concentradores secundários com intuito de melhorar a sua eficiência ótica para que se aproxime das obtidas com Calhas Parabólicas. Apesar da menor eficiência ótica, a tecnologia Linear Fresnel tem algumas vantagens em relação à Calha Parabólica. A sua concepção mais simples com espelhos no plano horizontal proporcionando menores esforços estáticos e aerodinâmicos permite estruturas de suporte menos complexas, mais leves com menores custos (Lovegrove and Stein, 2012). Como mencionado na seção anterior, a fixação das estruturas de suporte em lixões é um desafio devido à composição do solo por resíduos sólidos desagregados, e estruturas mais leves do sistema Linear Fresnel podem ser relevantes no contexto *WtE*. Além disso, o fato de o absorvedor ser fixo facilita o uso da água como fluido de transferência de calor, permitindo, assim, a geração de vapor diretamente no campo solar, conhecido como geração direta de vapor. Esses fatores fazem com que a tecnologia Linear Fresnel seja atrativa para determinadas situações, e o aproveitamento de energia de aterros sanitários se encaixa neste cenário.

A tecnologia de Torre Central consiste de um campo solar formados por espelhos, chamados heliostatos, que, através de sistema de rastreamento solar de dois eixos, são posicionados de tal forma que a irradiação solar direta incidente em cada um deles seja refletida em um ponto onde é instalado um receptor no alto de uma torre. Novamente um fluido de transferência de calor é escoado pelo receptor onde absorve a irradiação solar e a converte em energia térmica a ser utilizada posteriormente. Por ser de foco pontual, permite razões de concentração muito superiores do que Calha Parabólica ou Linear Fresnel, podendo ultrapassar o valor de 1000 permitindo, assim, temperaturas operacionais maiores e, conseqüentemente, maiores eficiências na conversão de energia térmica em elétrica. A desvantagem dessa tecnologia é que cada heliostato requer um controle individual de rastreamento solar, aumentando o custo da instalação.

Finalmente, o sistema de Disco Parabólico, assim como a Calha Parabólica, faz uso da propriedade geométrica da parábola, mas como um paraboloide tridimensional espelhado. A reflexão é concentrada em um ponto, onde é colocado um absorvedor, atingindo-se razões de concentração comparáveis à do sistema de Torre Central. No entanto, em contraste com as outras tecnologias, neste sistema um motor Sterling com um gerador é normalmente acoplado ao absorvedor e, assim, a energia elétrica é gerada. Trata-se, portanto, de um sistema modular de geração de energia.

Na literatura, é possível encontrar publicações com extensas discussões cobrindo vários aspectos das tecnologias de concentração solar, como, por exemplo, a de Lovegrove and Stein, (2012). Outras tecnologias heliotérmicas existem como, por exemplo, a chaminé solar, em que a absorção de irradiação solar no solo é direcionada para uma chaminé onde é instalada um turbogerador. No entanto, essas tecnologias ainda não se mostraram tecnicamente viáveis.

Apesar de eficiências competitivas na conversão de energia solar em eletricidade, quando comparada com fotovoltaica em locais com altos níveis de irradiação direta normal e com a vantagem de possuir maior flexibilidade de despacho, graças à possibilidade de armazenamento térmico, plantas heliotérmicas ainda têm dificuldade de penetração no mercado devido aos altos custos de capital (Juergen H. Peterseim *et al.*, 2014). Mesmo com amadurecimento do setor, tecnologias heliotérmicas ainda não se beneficiaram de redução de custos experimentados por outras fontes renováveis como PV e Eólica pelos ganhos de escala de mercado em que, para tais fontes, houve uma redução de 15% a 20% a cada duplicação de capacidade instalada a nível mundial em anos recentes (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014). Sendo assim, o avanço comercial da tecnologia heliotérmica aconteceu em parte por políticas de incentivos a energias renováveis implementadas em alguns países com destaque para Espanha e Estados Unidos (Malagueta *et al.*, 2013; F. Wang *et al.*, 2016).

Apesar disso, estudos apontam que a heliotermia será economicamente competitiva com outras fontes térmicas, como gás natural e carvão, em um horizonte de 10 anos (Pramanik and Ravikrishna, 2017), caso a maturação mercadológica, que ainda está na fase inicial, avançar como o esperado (Lilliestam *et al.*, 2018). Um dos fatores apontados como fundamental para que isso ocorra são as oportunidades de hibridização com outras fontes, renováveis ou não, que a tecnologia heliotérmica oferece (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014; K. M. Powell *et al.*, 2017). Dentre as vantagens da hibridização de heliotérmica com outras fontes, vale a pena destacar Powell *et al.* (2017):

- redução de investimento de capital específico com o compartilhamento de equipamentos;
- ganhos de despachabilidade da fonte renovável com a combinação com fonte não renovável;
- aumento de fator de capacidade da instalação;
- aumento de confiabilidade;
- oportunidades de operação mais flexível; e
- oportunidades de otimização operacional.

Além disso, a hibridização com outras fontes viabiliza plantas heliotérmicas híbridas de menor porte do que plantas puramente heliotérmicas, reduzindo, assim, os riscos financeiros de empreendimentos (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014).

Existem diversos artigos científicos abordando sistemas heliotérmicos híbridos com diferentes arranjos tecnológicos que vão desde estudos de performance de plantas existentes até novos conceitos ainda em fases iniciais de desenvolvimento. Vale destacar que a maioria das plantas heliotérmicas comerciais em operação hoje são híbridas em algum nível, pois têm a necessidade de um sistema de *backup* com algum combustível. No entanto, algumas políticas de incentivos de renováveis limitam a participação de combustível fóssil na operação das plantas beneficiadas, como, por exemplo, 15% na Espanha e 25% nos Estados Unidos (Baharoon *et al.*, 2015).

3.2.7 – Hibridização de fontes de geração em lixões

Os artigos de revisão classificam as hibridizações de acordo com diferentes critérios. As mais usadas são em relação ao grau de “renovabilidade” do sistema híbrido (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014) ou às sinergias associadas entre as diferentes fontes hibridizadas (Pramanik and Ravikrishna, 2017). Na primeira classificação, os conceitos híbridos são divididos em alta, média, baixa renovabilidade. No caso específico de *WtE*, o gás de aterro é considerado como fonte renovável (The European Parliament and The Council of the European Union, 2009). No entanto, existe uma controvérsia se os próprios resíduos sólidos e o Combustível Derivado de Resíduo (CDR), usados em incineradores, podem ser considerados renováveis (Kiatreungwattana, Mosey, Jones-Johnson, *et al.*, 2013; DEFRA - Department for Environment Food & Rural, 2014). A segunda forma de classificação é quanto à sinergia entre as fontes. Neste caso, a hibridização é considerada leve, média e forte, como já mencionado anteriormente. Para esse relatório, diante da controvérsia de renovabilidade ou não de material de incineração, a última classificação será usada na descrição das diversas formas de hibridização.

A hibridização de aterros de Resíduos Sólidos Urbanos, utilizando a área disponível para geração de energia renovável em conjunto com a geração de eletricidade baseado no gás de aterro e combustíveis derivados de resíduos, promove o uso ambientalmente adequado da área degradada ociosa, propiciando também benefícios em níveis nacionais e internacionais. No panorama nacional, a previsão da Empresa de Pesquisa Energética é que o consumo de eletricidade brasileira triplique até 2050, visto que é esperado crescimento econômico e, conseqüentemente, energético dos países em desenvolvimento (EPE, 2016). Para atender a esse crescimento expressivo, diversas fontes energéticas deverão ser utilizadas, incluindo o recurso solar. Neste sentido, numa área degradada pode-se visualizar diversas possibilidades de hibridização das fontes de geração, como as mencionadas a seguir

Hibridização Fotovoltaica (PV) – Heliotérmica (CSP)

O estado tecnológico atual da energia solar é composto por um maior desenvolvimento comercial da tecnologia fotovoltaica, que é identificado com maior viabilidade para aplicações em pequena e média escala (Khan and Arsalan, 2016). Enquanto isso, maiores retornos econômicos são identificados para a tecnologia *CSP*, que, apesar de ser mais dispendiosa, é, portanto, mais indicada para aplicações em larga escala. A hibridização entre essas duas tecnologias permite aliar um melhor retorno econômico a uma maior disponibilidade e oferta de tecnologias, trazendo otimização ao processo de geração de energia (Rodrigues, 2017).

Sistemas de energia solar concentrada usam o sol como fonte de calor, onde a concentração de irradiação solar por espelhos ou lentes é utilizada na geração de eletricidade (Magrassi *et al.*, 2019). A grande vantagem que mais se destaca dos sistemas *CSP* é sua capacidade de armazenamento térmico, possibilitando o fornecimento de eletricidade mesmo com a ausência do sol (Khan and Arsalan, 2016). Apesar disso, trata-se de um tipo de geração alternativo ainda não competitivo com as demais fontes de energia, sendo que alguns autores (Arvizu *et al.*, 2011; Trieb *et al.*, 2014) citam uma previsão de que isso só aconteça após o ano de 2030.

Tecnologias de geração *CSP*, geralmente, exigem índices de irradiância normal direta, maiores que 2.000 kWh/m²/a para se tornarem plantas autônomas e eficientes (Peterseim *et al.*, 2012). Em contrapartida, a implementação de sistemas *CSP* em plantas híbridas torna-se vantajosa pelo fato de serem aceitos índices menores de irradiância direta (a partir de 1.700 kWh/m²/a) e por serem menores os investimentos iniciais (Peterseim *et al.*, 2012). Apesar disso, não se trata de uma métrica autossuficiente para a projeção de sistemas solares híbridos, uma vez que a variabilidade sazonal e a constatação de dias não ideais para geração solar são outros fatores essenciais para se programar o melhor fator de capacidade da planta (Green *et al.*, 2015).

Em relação ao mercado, a hibridização *PV-CSP* se enquadra muito bem no sentido de suprir demandas diurnas com a geração fotovoltaica e as demandas de pico, tradicionalmente ocasionadas após o pôr do sol, com a disponibilidade da energia armazenada pelo *CSP*. Tradicionalmente, esse tipo de hibridização compactua com sinergias híbridas leves, dadas pela operação particular de cada tecnologia e pelo compartilhamento de uma mesma rede elétrica de distribuição,

No cenário nacional, dados do Ministério de Minas e Energia de 2016 mostraram, em termos gerais, que os custos de instalação de uma usina autônoma *CSP* variam entre R\$350,00 e R\$650,00 por MWh, enquanto que para a tecnologia fotovoltaica variam entre R\$250,00 e R\$300,00 por MWh (Rodrigues, 2017). Com isso, em termos ótimos, o melhor arranjo seria aquele capaz de gerar energia para atender a demandas 24 horas por dia, aliando o menor custo da tecnologia fotovoltaica ao armazenamento térmico da *CSP*. Isso forneceria a extensão do período de fornecimento de energia a um custo mais baixo, se o arranjo for comparado aos sistemas autônomos, aumentando o fator de capacidade da planta.

Em 2016, (Parrado *et al.*, 2016) comprovaram a viabilidade de instalação de uma planta híbrida *PV-CSP* no norte do Chile, região de alta disponibilidade de recurso solar, para, sobretudo, atender de forma contínua à demanda de eletricidade de uma indústria de mineração da região. O levantamento do custo nivelado de energia (*Levelized Cost of Energy* – LCOE) foi simulado especialmente para o caso da planta híbrida com geração de 24h/dia, composto por um sistema *PV* de silício monocristalino de 20 MWp e *CSP* de Calha Parabólica de 30 MWe com 15h de armazenamento térmico (*Thermal Energy Storage* - TES). O estudo contribuiu com um importante resultado para o futuro econômico e ambiental do Chile, mostrando a projeção econômica do LCOE até 2050 para a planta *PV-CSP*, com um forte decréscimo no custo das tecnologias.

O cenário mundial de desenvolvimento das usinas híbridas *PV-CSP* encontra-se em crescimento e conta, por exemplo, com o projeto em desenvolvimento em Copiapó, no Deserto do Atacama – Chile, promovido pela indústria *SolarReserve*. Trata-se de um arranjo com armazenamento térmico com sais fundidos, sendo composto por duas torres de sal fundido de 130 MWe e uma usina fotovoltaica de aproximadamente 150 MWe (Larchet, 2015). Um segundo projeto, localizado na África do Sul, conhecido como *Redstone*, compõe um parque solar *CSP* combinado com plantas fotovoltaicas *PV*, que, juntos, representarão uma capacidade total instalada de 239 MW (Larchet, 2015),

Hibridização Heliotérmica (CSP) – Usinas Térmicas

A hibridização mais natural da heliotermia, pela própria natureza térmica da energia solar, é como fonte de calor para um ciclo de vapor *Rankine* (Powell *et al.*, 2017). Em sua grande maioria, nas plantas heliotérmicas comerciais em operação atualmente, a fonte solar é usada com esse propósito. No entanto, diferentes arranjos podem ser utilizados para aproveitamento do recurso solar em áreas de aterro em conjunto com fontes lá existentes. Vale ressaltar que atualmente não existem instalações heliotérmicas, híbridas ou não, em aterros sanitários. Por outro lado, a disponibilidade de CDR e a possibilidade de usar gás de aterro em caldeiras sem as exigências de pureza de outras tecnologias (Ferreira *et al.*, 2018) podem tornar essa rota tecnológica atrativa para usinas híbridas em aterros sanitários. A seguir, algumas configurações serão abordadas baseadas em estudos recentes de instalações heliotérmicas híbridas encontrados na literatura. Além destes, serão discutidos alguns conceitos inovadores de formas de hibridização com heliotérmica compatível com o conceito *WtE*.

Plantas de grande porte heliotérmicas híbridas comerciais já são uma realidade. Um bom exemplo é a planta híbrida heliotérmica-gás natural de 100 MWe Shams One, instalada perto de Abu Dhabi nos Emirados Árabes. O gás natural é usado em um superaquecedor externo elevando a temperatura do vapor de 380°C, obtido em um campo solar de Calha Parabólica com óleo térmico, para 540°C, contribuindo em 18% do calor para a Planta (Goebel and Luque, 2010; apud Juergen H Peterseim *et al.*, 2014).

Outro caso interessante para o conceito de hibridização heliotérmica em aterros sanitários é a usina híbrida Termosolar Borges (NREL, 2019) localizada em Les Borges Blanques, na região da Catalunha, Espanha. A Termosolar Borges é uma referência em hibridização heliotérmica por ser a primeira planta comercial híbrida heliotérmica-biomassa. A ideia por trás do conceito de hibridização heliotérmica-biomassa é o fornecimento de energia renovável, que não é o caso de Shams One devido ao gás natural, de forma contínua com sistemas complementares que permitissem o balanço do sistema sem nenhuma intermitência (Overton, 2015).

O uso da biomassa para superaquecer o vapor é fator primordial para a viabilidade Termosolar Borges. Ele permite a aplicação de uma tecnologia heliotérmica madura, como é o caso de Calha Parabólica com óleo como fluido de transferência de calor, que possui limites de temperatura, mas, ao mesmo tempo, graças à queima da biomassa, possibilita que o ciclo de vapor trabalhe a temperaturas mais altas elevando, assim, a sua eficiência (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014). Por ser uma planta híbrida classificada como de forte sinergia entre as fontes, já que todo o ciclo do vapor é o mesmo para ambas, existem vantagens na hibridização quando comparada a duas plantas independentes

(Overton, 2015). Além disso, o uso da tecnologia heliotérmica mais madura (Calha Parabólica) promove redução de investimento de capital, diminuindo riscos financeiros e facilitando financiamento (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014). Considerando a disponibilidade do biogás de aterro e o CDR, essa configuração seria forte candidata a ser replicada em aterros sanitários.

Configuração semelhante, mas para unidade em que a incineração de resíduos sólidos foi usada no lugar da queima de biomassa como fonte de calor suplementar ao campo solar, foi objeto de estudo por Sadi e Arabkoohsar (2019). Nesse estudo inicial, uma unidade geradora de 10MWe, foi simulada para uma localidade na Dinamarca. Apesar de a simulação desconsiderar efeitos dinâmicos do sistema, seus resultados apontam para aceitáveis 24% de eficiência na conversão térmico-elétrica e aproximadamente 8000 tCO₂ de emissões evitadas quando comparadas com uma planta de gás natural com a mesma potência.

Uma configuração de hibridização heliotérmica que pode ser de interesse para *WtE* é a integração de energia solar em Ciclos Combinados, ou como é conhecido na literatura *ISCCS* (sigla do inglês, *Integrated Solar Combined Cycle System*). Ciclos Combinados se referem a instalações de potência em que um ciclo *Brayton* (ciclo de turbinas a gás) é complementado por um ciclo *Rankine* com o aproveitamento da energia térmica do gás de escape da turbina para a geração de vapor superaquecido. Atualmente, já existem plantas comerciais em operação que aplicam tecnologia *ISCCS* em diversos países, incluindo Estados Unidos, Marrocos, Itália, Egito e Irã (Juergen H Peterseim *et al.*, 2014), e muitas outras estão em construção ou em planejamento (NREL, 2014). A eficiência combinada dessas instalações ultrapassa os 50% (Powell *et al.*, 2017) e tem sido a tecnologia mais escolhida para plantas novas devido aos ganhos de eficiência, baixo custo relativamente a puramente heliotérmica e baixa emissões quando comparado com plantas de ciclo combinado convencionais (Powell *et al.*, 2017).

Behar *et al.* (2014) realizaram um estudo de revisão de *ISCCS* em que a tecnologia solar utilizada era a Calha Parabólica. Um dos fatores abordados na revisão foi a geração direta de vapor em oposição ao uso de óleo térmico como fluido de transferência de calor. Esse é um aspecto relevante para a definição do sistema. Eles avaliaram os diversos estudos que fazem essa comparação e apresentaram a conclusão de que a geração direta de vapor é opção interessante, pois permite a operação a temperaturas maiores. No entanto, por resultar em um escoamento em duas fases, torna a operação do campo solar mais complexa e instável com maiores perdas de vapor.

Um estudo semelhante foi realizado por Okoroigwe and Madhlopa (2016) considerando a Torre Solar como a tecnologia de captação da energia solar. Um fato interessante nestes casos é que, além de poder entrar na geração de vapor, a Torre Solar tem capacidade de gerar temperaturas compatíveis com as de combustão do gás e conseqüentemente podem entrar no ciclo *Brayton* diretamente com altas eficiências de conversão solar-energia elétrica. No entanto, para tal o receptor tem que ser a ar pressurizado, o que impõe alguns desafios tecnológicos e, por isso, ainda carecem de algum desenvolvimento tecnológico para aplicação comercial. Apesar de as plantas comerciais que atualmente utilizam a hibridização *ISCCS* serem de grande porte, esta pode ser uma opção interessante no contexto de *WtE* pela disponibilidade do gás de aterro.

Outras formas de hibridização de energia heliotérmica com o aproveitamento de gás são possíveis. A injeção de vapor nas câmaras de combustão de turbinas a gás, conhecido como *STIG*, pode aumentar a potência da turbina no chamado ciclo Cheng (Motz, 1987; Penning and de Lange, 1996). Tipicamente, a geração de vapor para essa aplicação é realizada com um sistema de recuperação de calor a partir dos gases de escape da turbina a gás. Neste caso, inviabiliza a utilização do ciclo combinado, pois o calor para o ciclo de vapor e *STIG* competiriam pela mesma fonte de energia. Apesar de o ciclo combinado ser mais eficiente, existem vantagens no *STIG* devido à maior simplicidade do sistema (De Paepe and Dick, 2001). A partir dessa ideia, Livshits and Kribus (2012) estudaram um sistema para a geração de vapor por energia solar. A vantagem é que, para essa aplicação, a temperatura e pressão do vapor são compatíveis com as tecnologias heliotérmicas. Os resultados obtidos apontam para uma eficiência global solar e combustível entre animadores 40% e 55% com aumento de eficiência sobre *STIG* convencional de 22% a 37%.

Como a gaseificação é uma possibilidade de aproveitamento do recurso energético dos resíduos sólidos do aterro, uma hibridização da fonte heliotérmica, classificada de média sinergia, aplicável no contexto *WtE*, é a utilização da energia solar no processo de gaseificação de biomassa. O seu uso na geração de vapor d'água aplicado ao processo elimina a necessidade de queima parcial do material para alimentar a reação endotérmica de gaseificação, aumentando, assim, o valor calorífico do gás de síntese. A gaseificação com vapor d'água de biocarvão foi estudada por Melchior *et al.* (2009). A conversão da energia solar em energia química corresponde a um armazenamento da energia heliotérmica (Melchior *et al.*, 2009) e atinge eficiências de até 50% neste processo (Powell *et al.*, 2017).

Existem outras tecnologias de hibridização com heliotérmica como fonte de calor associado à outra fonte que poderiam ser aplicadas para a geração de energia em aterros sanitários. Vale citar os trabalhos de Bianchini *et al.* (2013 e 2015) que estudaram o processo de reforma do metano por vapor (MSR, do inglês *Methane Steam Reforming*) com fonte de calor solar na conversão para gás de síntese de maior valor calorífico. Outro exemplo é a pesquisa de Habibollahzade *et al.* (2018), em que a combinação de calor de rejeito na condensação de ciclo *Rankine* de uma planta *WtE* em Teerã, Irã, associado à energia solar usada numa chaminé solar para geração de energia foi estudada. Apesar de promissoras, essas tecnologias estão ainda em estados iniciais de desenvolvimento e não se provaram aplicáveis em escala comercial.

Num conceito mais amplo de hibridização heliotérmica no aproveitamento energético na remediação de aterros sanitários em descomissionamento, podem-se considerar ainda os processos de remediação que requerem fornecimento de calor. Alguns tratamentos de chorume, como, por exemplo, o proposto por Xu *et al.* (2006) requer a evaporação deste. Neste caso, o calor para o processo de evaporação é de relativa baixa temperatura, 115 a 130°C que podem ser eficientemente obtidos com concentradores solares de baixo custo.

Poucos estudos existem na literatura a respeito da aplicação de *CSP* no contexto de *WtE* com hibridização. Das referências encontradas, apenas duas se enquadram neste conceito (Sadi e Arabkoohsar, 2019; Habibollahzade *et al.*, 2018) e, em ambas, de acordo com os próprios autores, são estudos iniciais de aplicação que ainda requerem maiores aprofundamentos. No entanto, um grande número de aterros sanitários não controlados (lixões) estão localizados em locais com potencial solar considerável, principalmente em países em desenvolvimento, o que deve estimular pesquisas aplicadas mais consistentes no futuro, inclusive no Brasil. No Brasil, a nova Política Nacional de Resíduos Sólidos obriga os governos a agirem no sentido de atacar o problema dos lixões. Diante disso, existem oportunidades a serem exploradas tanto em termos de PD&I quanto de aplicações comerciais de *CSP* em *WtE*.

3.2.8 – Contribuições para o Estado da Arte

Neste contexto, o projeto contribuiu para o estado da arte do tema em pauta, nos seguintes aspectos principais:

- subsídios para a formulação de modelos de negócio de geração de eletricidade em áreas de lixões;
- métodos e modelos para quantificação do potencial para aproveitamento direto do metano oriundo da biodigestão e combustíveis minerados nos aterros existentes,
- métodos e modelos para a escolha das tecnologias que proporcionem uma base de planejamento confiável para o montante de processamento de resíduos e eletricidade gerada, e, seja atrativa para investidores privados;

Tais considerações são relevantes pois apresentam uma série de ações estruturantes no sentido de estabelecer um planejamento estratégico para a política local de *WtE*, com vistas a implantação efetiva de projetos de usinas economicamente viáveis e sustentáveis.

3.3 – ORIGINALIDADE DO PRODUTO OU TÉCNICA

De forma a resolver problemas da baixa eficiência das fontes alternativas de geração de energia elétrica e/ou recuperação energética utilizada isoladamente como técnicas de remediação em áreas de deposição de resíduos é que esta proposta de P&D estruturou-se na inovadora e original aplicação da hibridização (Figura 6).

Este conceito fundamenta-se no princípio da associação de grupos de técnicas internamente hibridizados com objetivos integrados em um ciclo contínuo. Nesta proposta de P&D objetiva-se aumentar a geração energia elétrica e remediar áreas degradadas por RSU.

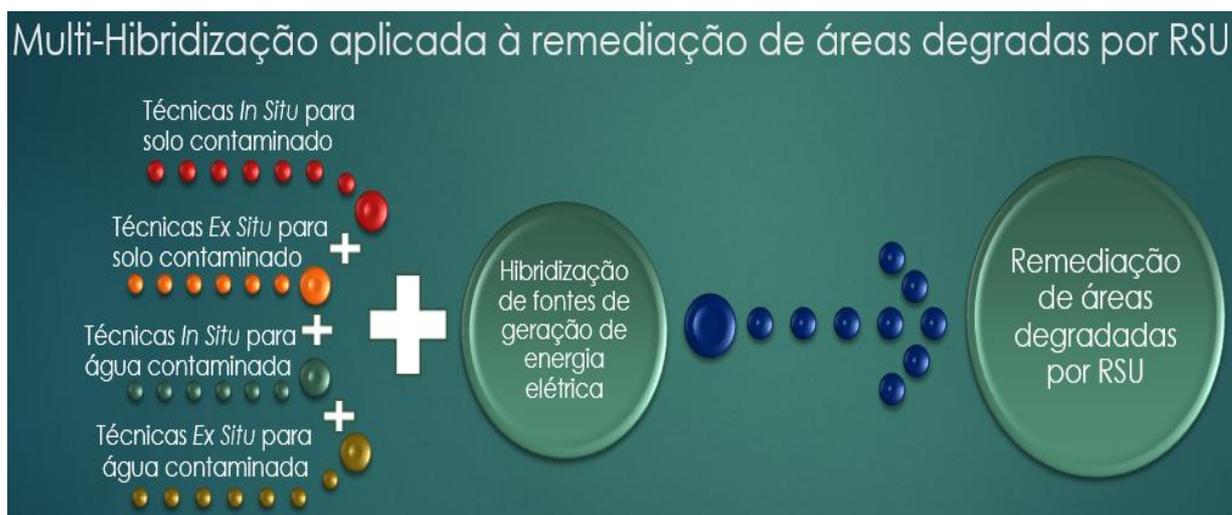


Figura 6 – Conceito inovador de multi-hibridização desenvolvido para o projeto.

Utilizando a hibridização de fotovoltaica, queima de gás metano, gaseificação de resíduo orgânico e heliotérmica será possível estimar o ganho econômico e ambiental no aumento do bloco de potência por fontes alternativas e o ganho ambiental e econômico na recuperação de uma área degradada dessa natureza.

A geração de energia elétrica fotovoltaica tem tido um avanço significativo recentemente. Na última década a capacidade acumulada de geração fotovoltaica cresceu a uma taxa de 49% ao ano, chegando a um total instalado de mais 135GW ao final de 2013 (IAE, 2014a). Apesar da nossa condição privilegiada em termos de radiação solar, a radiação global horizontal em qualquer região do Brasil é muito maior do que a maioria dos países europeus (Martins, 2012), a contribuição do Brasil neste mesmo ano não passou de 5 MW (EPE, 2015), enquanto a Alemanha tinha cerca de 30 GW (IAE, 2014).

Se considerarmos a geração heliotérmica, apesar de não ter experimentado crescimentos tão expressivos quanto a fotovoltaica, a International Energy Agency estima que até 2050 a geração de conversão de energia solar em eletricidade pela via heliotérmica concentrada possa atingir globalmente 4500 TWh por ano, ou seja, aproximadamente 11% do total da demanda projetada. Ciente disso, o Brasil tem adotado políticas de incentivo a pesquisa nesta área com a publicação de editais de chamada de pesquisa para setor (CNPq, 2013; ANEEL, 2015).

Os estudos realizados em 2014, pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sobre o Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos, que para a geração de eletricidade as opções analisadas de biodigestão e incineração apresentam potencial de atendimento de 1,5% e 5,4% do consumo de eletricidade nacional, com potencial de 6,9 TWh e 25 TWh respectivamente (EPE, 2014).

Assim, a hibridização de outras fontes com energia solar tem sido foco de diversas iniciativas, tanto comerciais (NREL, 2016) quanto científicas (Rodrigues e Siqueira, 2015; Lisboa et al, 2015; Srinivas e Reddy, 2014; Chasapis et al 2008).

As vantagens de tal aplicação são plenamente justificadas pelas oportunidades de, em termos operacionais, compensar a intermitência da fonte solar e, em termos econômicos, evitar os altos custos de instalações de armazenamento de energia.

O uso isolado de técnicas de remediação *in situ* de solo e água subterrânea em áreas de deposição de resíduos sólidos tem apresentado baixa eficiência na remediação produzindo alto volume de rejeitos, principalmente, com relação a água que não está tendo uma destinação adequada. Mesmo quando utilizada a hibridização com as técnicas *ex situ* aumenta-se um pouco a eficiência na remediação, mas o volume de rejeitos, normalmente, permanece o mesmo.

Esta proposta de P&D também de forma inovadora e original avaliou o aproveitamento desses rejeitos de solo e água contaminados dentro da hibridização das fontes de geração de energia elétrica e recuperação energética (Figura 7). Ou seja, os solos contaminados submetidos à descontaminação pelas técnicas de remediação tradicionais e que permanecerem com níveis indesejáveis de contaminação poderão ser submetidos a uma etapa inovadora em fornos a base de queima de gás metano. Este processo inovador também poderá ser utilizado para descontaminar solos oriundos de outras áreas contaminadas por RSU e/ou por outros contaminantes, por exemplo, hidrocarbonetos derivados de petróleo.

As áreas com solos contaminados submetidos à remediação por técnicas *in situ* e que ainda permanecerem com alguma contaminação serão avaliadas como áreas prioritárias para instalação de plantas de geração fotovoltaica e/ou também heliotérmica.

Assim, a multi hibridização estará concretizada pelo desenvolvimento de uma original metodologia de remediação ambiental que contemple uma maximização do potencial uso de todas as matrizes (solo contaminado, água contaminada, gás metano, biogás, resíduos sólidos) na geração de energia elétrica por fontes alternativas.

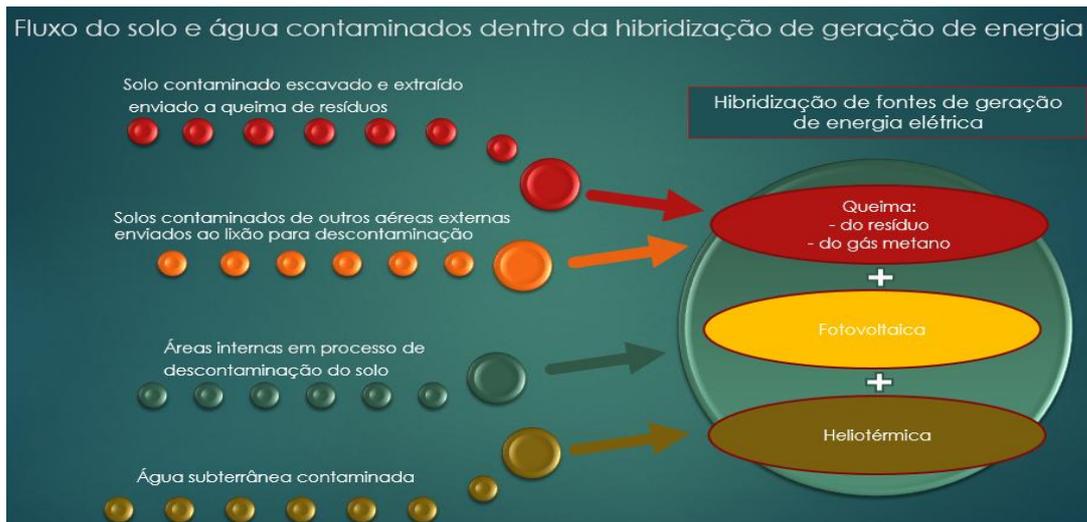


Figura 7 – Aplicação potencial da hibridização para a remediação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.

Fica assim, demonstrada a originalidade da técnica e metodologia desenvolvida objetivando identificar e analisar as possibilidades tecnológicas de fontes de geração em um processo de hibridização, em área degradada por resíduos sólidos urbanos, como alternativa a remediação ambiental da área. A metodologia e técnicas desenvolvidas foram aplicadas de forma abrangente e original no aterro controlado do Jockey Clube de Brasília.

Durante as pesquisas e estudos realizados, foram igualmente identificados três outros produtos que apresentam alto grau de originalidade com potencial para serem aplicados em outros projetos semelhantes, são eles:

- Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas.
- Análise de Sensibilidade da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas em Função do Recalque Diferencial do Solo
- Identificação de Emissões Fugitivas em Aterros por Meio de Termografia por Infravermelho

Segue resumo de cada um destes produtos com as suas referências

3.3.1 - Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas

O risco à saúde humana é um aspecto central no gerenciamento de áreas contaminadas, uma vez que a partir do seu reconhecimento e quantificação é possível planejar e elaborar ações de remediação voltadas para proteger os indivíduos presentes nessas áreas. Dessa forma, o presente trabalho tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento e a proposta de uma ferramenta computacional que auxilie a realização de avaliações de risco em áreas contaminadas. A ferramenta possui quatro módulos principais implementados em interfaces gráficas, cujas funcionalidades permitem conduzir avaliações de risco à

saúde humana – conforme a metodologia proposta pela USEPA (1989) – mediante a entrada de dados acerca da contaminação e do uso e ocupação das áreas onde existem indivíduos possivelmente expostos.

Atualmente, entende-se que o gerenciamento de áreas contaminadas está em grande parte condicionado à necessidade de adotar medidas voltadas para a proteção da saúde humana e dos diversos bens de interesse da sociedade, tais como os recursos hídricos. Sob esse entendimento, a avaliação de riscos à saúde humana permite ter evidências da forma com que as áreas contaminadas se traduzem em riscos à saúde dos indivíduos que residem ou desempenham alguma atividade em sua proximidade. Tais evidências fornecem subsídios à tomada de decisão voltada para a remediação destas, com abordagens baseadas na minimização desses riscos. Nesse contexto, a existência de áreas da disposição final inadequada de resíduos sólidos no Brasil suscita questionamentos acerca do passivo ambiental nestas e os possíveis riscos à saúde humana decorrentes disso. Assim, este trabalho se propôs a apresentar uma ferramenta computacional que dê suporte a realização de avaliações de risco à saúde humana em áreas contaminadas, e por meio desta, estudar o caso do antigo Aterro Controlado do Jockey Clube (ACJC), no Distrito Federal, no qual a disposição inadequada de resíduos sólidos foi realizada por décadas.

A ferramenta foi concebida com base na metodologia de avaliação de riscos à saúde humana da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e implementada em interface gráfica que possui funcionalidades específicas que permitem auxiliar a realização de avaliações desse tipo, mantendo-se a maior acessibilidade possível para possíveis agentes externos que venham a utilizá-la. No caso de estudo realizado para o ACJC, identificou-se que no fim da década de 90 já haviam indícios de um processo de contaminação da zona não saturada e saturada. Nessa mesma década, observou-se um intenso processo de ocupação das áreas adjacentes ao aterro, configurando assim a existência de zonas de possível exposição das populações presentes nessas áreas aos compartimentos ambientais contaminados. Três zonas foram avaliadas neste trabalho, e os possíveis caminhos de exposição dos contaminantes às populações presentes nelas foram caracterizados. Utilizando-se modelagens matemáticas analíticas de transporte de contaminantes e dados de amostragem foram propostos cenários de contaminação das águas subterrâneas e dos solos superficiais para essas zonas, para o intervalo de tempo entre 1996 e 2019. As espécies químicas para as quais estes cenários foram propostos foram: Amônia, Nitrato, Cadmio (Cd), Chumbo (Pb), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercúrio (Hg), dados de entrada para a ferramenta computacional proposta, onde, primeiramente, procede-se a quantificação da exposição o Módulo de Avaliação da Exposição.

Adotando-se parâmetros de exposição que descrevem os usos e padrões de atividades humanas nas zonas avaliadas, quantificaram-se, pela ferramenta, as exposições por ingestão e contato termal às águas subterrâneas e aos solos superficiais segundo cenários de tendência central (mediana) e maximizados (percentil 95). Atribuindo-se valores de toxicidade às espécies químicas, com base em um banco de dados interno da ferramenta, pôde-se caracterizar os riscos à saúde das populações presentes nas zonas avaliadas. Para todas as espécies químicas a ingestão de meios contaminados (solo ou água) representou a componente que mais contribui para o risco de efeitos adversos. Com relação aos efeitos não cancerígenos, constatou-se que o Pb foi a única espécie química que apresentou valores medianos de indicadores de risco em níveis que poderiam levar a efeitos adversos. O Cd apresentou valores de percentil 95 que suscitam alguma preocupação. Pb e Cr, que

são comprovadamente cancerígenos, ocorrem em níveis que levam a obtenção de valores toleráveis de riscos de câncer, mesmo considerando as estimativas dos percentis 95 destes. Por fim, constatou-se que os valores de investigação das resoluções CONAMA, resultam, de fato, em valores protetivos à saúde humana – considerando os cenários de exposição estudados – para Pb e Cd, porém, isto não é verificado para o Cr.

Referências

- Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas – Caso de Estudo: Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/ DF. Julho de 2019. Dissertação por Felipe Leite Nisiyama
- Desenvolvimento e Proposta de Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas. GEOCENTRO. 24 A 25 de outubro de 2019. Brasília. Informe Técnico por: Felipe Leite Nisiyama, André Luís Brasil Cavalcante, Luciano Soares da Cunha

3.3.2 - Análise de Sensibilidade da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas em Função do Recalque Diferencial do Solo

Há uma crescente preocupação mundial em relação às mudanças climáticas, decorrentes principalmente da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Um dos setores que produz mais poluentes é a geração de energia elétrica, situação que impulsionou o uso de fontes renováveis. Neste contexto, há um grande crescimento da energia solar fotovoltaica na matriz energética mundial. Dentre as vantagens que justificam esse crescimento, pode-se citar o desenvolvimento tecnológico, o qual permite uma redução nos custos de implementação desse tipo de sistema. Concomitantemente, devido à disponibilidade de grandes áreas em aterros cujas atividades fins foram encerradas, a instalação de usinas fotovoltaicas se torna um grande atrativo.

Por se tratar de um terreno com camadas de resíduos sólidos em sua composição, deve-se levar em consideração a instabilidade desse solo. Dessa forma, faz-se necessário estudar a deformação coletiva uniforme ou não uniforme causada por alterações que afetam as propriedades desses resíduos ao longo do tempo, ou seja, o estudo do recalque. Para tanto, são empregadas ferramentas que possibilitam sua simulação, por meio da variação da inclinação e do azimute do solo do aterro. De posse dos resultados destas análises, é identificada a perda energética do sistema em relação à variação do assentamento, observando-se a máxima e a mínima produção de energia nas usinas implementadas nos aterros brasileiros selecionados.

Referência

- Análise de Sensibilidade da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas Localizadas em Aterros Brasileiros em Função do Recalque Diferencial do Solo. Dezembro de 2019. Trabalho de Conclusão de Curso por Ana Carolina de Lima Veloso.

3.3.3 - Identificação de Emissões Fugitivas em Aterros por Meio de Termografia por Infravermelho

Aterros de resíduos sólidos estão entre as duas maiores fontes de emissões de gases de efeito estufa, entre o período de 1990 a 2030, segundo estimativa do *Summary Report: Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990 - 2030* (EPA, 2012). Considerando o mesmo período, o CH₄ responde por uma média de 58% das emissões de resíduos (EPA, 2012). O vazamento de gases provenientes de áreas de disposição de resíduos sólidos (SWDS) é uma importante fonte de emissão de gases de efeito estufa, que promove risco de explosão, fazendo com que sua detecção seja extremamente relevante para o controle de qualidade ambiental.

O gás de aterro é produzido no subsolo em condições anaeróbicas através de reações bioquímicas exotérmicas, em temperaturas de até 55°C, devido à degradação de matéria orgânica em um processo de metanogênese (FJELSTED et al., 2019). Sua parte líquida é o chorume ou lixiviado, e a parte gasosa, o biogás ou gás de aterro. Este último, objeto de análise deste trabalho, é composto de 50 a 60% em volume de CH₄, 10 a 50% em volume de CO₂ e 1 a 5% em volume de outros gases (hidrogênio H₂, gás sulfúrico H₂S, oxigênio O₂ e nitrogênio N₂) (COSTA, 2006); (ALVES, 2000). O metano, principal componente do biogás, possui um alto poder calorífico e, diante dessa característica, sua recuperação energética aparece como uma solução alternativa dentro do contexto de mitigação de emissões atmosféricas.

A quantificação do biogás é envolta em complexidade devido, principalmente, à heterogeneidade dos resíduos e irregularidades topográficas de aterros. Um exemplo típico é a ocorrência de fissuras na cobertura do aterro, que é uma indicação da contração de camadas de argila, devido à variação de umidade do solo. Trata-se de situações que ocorrem periodicamente sob a influência de condições climáticas locais ou devido à própria degradação do material orgânico, o que resulta na alteração do estado físico dos resíduos aterrados. Através dessas fissuras, que podem ser observadas através da camada de cobertura, há um aumento significativo nas emissões de gases (OLIVEIRA, 2005). Durante a vida útil da camada de cobertura, a existência de fissuras aumenta significativamente a permeabilidade da superfície, a infiltração das águas da chuva e as emissões fugitivas de biogás, culminando em ciclos de emissões maiores em períodos de seca e menores em períodos de chuva (OLIVEIRA, 2005).

Pelo fato de a geração do biogás se dar por uma reação exotérmica, a presença do gás pode ser detectada por anomalias térmicas na superfície de coberturas de aterros. Para esse fim, iniciativas internacionais vêm empregando a visualização por infravermelho térmico (do inglês, *Thermal Infrared - TIR*) como uma técnica para detecção de metano na superfície. A atual revisão da literatura sobre a utilização da termografia por infravermelho para detectar gases de aterros foi resumida na publicação científica de Fjelsted et al. (2019), que organizou estudos que testaram essa ferramenta de triagem para *hotspots* de emissão de gás de aterro (*Landfill Gas - LFG*) com resultados variados. Alguns estudos relataram relação limitada entre emissões de LFG e temperaturas da superfície ((BATTAGLINI et al., 2013), (DESIDERI et al., 2007), (BATTAGLINI et al., 2013), (Lewis et al., 2003a)). Aponta-se que a maior limitação estaria no fato de que os resultados podem ser influenciados por fatores externos, como a incidência de luz solar, vento e temperatura ambiente (FJELSTED et al., 2019).

Neste contexto, foi realizada pesquisa, com o objetivo de verificar a relação entre os indicadores termográficos de superfície e a presença de emissões fugitivas de CH₄ e CO₂. Direcionando esforços para complementar os métodos e técnicas de triagem desses gases, este trabalho utiliza como estudo de caso o Aterro Controlado do Jockey Club (ACJ), localizado no Distrito Federal. Os estudos de campo foram complementados pela reprodução em laboratório de um experimento em meio poroso com troca de calor, onde campos de anomalia de temperatura são identificados.

A situação do ACJ como um lixão antigo que recebe cobertura após ser construído sem a estrutura geotécnica necessária para receber os resíduos sólidos, é comum no Brasil. Essa prática facilita a contaminação do subsolo e permite mais emissões fugitivas de gases, causando danos ao meio ambiente e à saúde humana. O teste de novas ferramentas confiáveis de baixo custo é necessário para otimizar a manutenção e a captura de gás de aterro para remediação ambiental e recuperação energética. A literatura indica o uso de métodos de triagem por termografia na detecção de vazamentos de gás em aterros como uma ferramenta que ainda precisa de complementação, o que foi verificado durante a coleta de dados realizada.

O ACJ ainda recebe resíduos do setor de construção, resultando em uma camada irregular do solo que pode dificultar o escape do fluxo de gases pela superfície. Neste cenário, é possível explicar a diferença entre a baixa concentração de metano e a alta temperatura da superfície nos pontos 6 e 9, onde a reação de degradação dos resíduos ali dispostos pode ter sido a principal causa do aquecimento da superfície. As emissões foram medidas na superfície da encosta. As concentrações de CH₄ variaram entre 1 e 38%, de CO₂ entre 0,3 e 37% e a temperatura do solo variou entre 10 e 55°C. Considerando que não houve interferência da incidência solar nos resultados dos dez pontos analisados, oito pontos mostraram convergência entre os aumentos da temperatura e altas concentrações de CH₄ e CO₂, o que mostra uma correlação entre as emissões fugitivas do ACJ e a temperatura dada pela termografia.

Em laboratório, foi observado que o fluxo de calor procura preferencialmente regiões de fissura, além disso, observou-se que não é simultâneo o aquecimento da superfície com liberação inicial de calor. A medição de temperatura por sensores e as imagens termográficas mostram o aquecimento desigual entre as camadas inferiores e a região menos densa do meio poroso.

Este estudo mostra que a termografia por infravermelho é uma metodologia promissora para complementar a identificação de vazamentos de gases em aterros, mostrando-se extremamente adequada para situações de aterros sanitários no Brasil, que possuem pouca infraestrutura de quantificação e coleta de gases, além de baixa capacidade de investimento.

Referências

- Identificação de Emissões Fugitivas em Aterros por Meio de Termografia por Infravermelho. 11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul. Informe Técnico por: Antonio C. P. Brasil Junior e Marcela Cardoso Rodrigues

- Assessment of Methane Emission Using Infrared Thermography - A Case Study In the Jockey Club Controlled Landfil. 25^o ABCM International Congress of Mechanical Engineering. 20 a 25 de outubro. Uberlândia MG. Informe Técnico por Ana Rafaela Sobrinho de Miranda, Marcela Cardoso Rodrigues, Hugo Mesquita, Luciano Soares da Cunha, Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

Capítulo 4 - APLICABILIDADE

4.1 – ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO

A abrangência da aplicação da metodologia desenvolvida no âmbito deste projeto de P&D é muito grande, tendo em vista principalmente o universo de cerca de 3.000 aterros desativados e a serem desativados nos próximos anos. Para as áreas degradadas resultantes os gestores dos estados e municípios vão necessitar urgentemente apresentar soluções técnicas econômicas e ambientalmente adequadas, como as que estão sendo apresentadas neste projeto de P&D.

Esta desativação está sendo imposta pela aplicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que foi instituída pela Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010.

Esta Lei estabeleceu em seu Artigo 54, o prazo de 2.08.2014, para os estados e municípios, estabeleçam planos e metas para a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, de modo evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos, até a coleta seletiva.

Tendo em vista a pequena adesão a esta iniciativa, a PL 2289/2015 prorrogou o prazo para as seguintes datas: 2019 – Capitais e regiões metropolitanas, além de municípios com mais de 100 mil habitantes, 2020 – Municípios com população entre 50 e 100 mil habitantes e 2021 – Municípios até 50 mil habitantes. Posteriormente a MP 868/2018, prorrogou estes prazos por mais 2 anos, com a condição de que o município apresente até 31/12/2019 um plano intermunicipal de resíduos sólidos ou plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos e que disponha de mecanismos de cobrança que garantam sua sustentabilidade econômico-financeira.

Tendo em vista os atrasos sistemáticos para encerramento dos lixões, vem surgindo grupos de trabalhos estaduais e municipais, fornecedores de equipamentos e associações (Ex. Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos – ABREN), além de eventos sobre o tema. Espera-se assim, que o processo de desativação possa ser acelerado, ampliando rapidamente a abrangência da aplicação da metodologia.

Esta abrangência de aplicação pode ainda ser visualizada quando se analisa o Boletim de Informações Gerenciais publicado pela Aneel. O Boletim, correspondente ao segundo trimestre de 2018, indicou que a capacidade instalada total do Brasil era de cerca de 160.000 MW gerados em 7.097 empreendimentos.

A geração de energia elétrica a partir de RSU é feita primordialmente através da utilização de biogás de aterros sanitários, que juntamente com resíduos derivados de estações de tratamento de esgotos, é classificado pela Aneel como resíduos urbanos. E este montante está inserido na fonte Biomassa.

Neste cenário, a capacidade total instalada de usinas térmicas a biomassa é de cerca de 14.600 MW (9,13% do total instalado), dos quais a geração proveniente dos RSU é de somente 129 MW (0,08 % do total instalado) em 19 plantas.

Pode-se assim notar que a geração de energia a partir do RSU é bastante inferior às outras fontes e que certamente seria interessante analisar a possibilidade de formular novas políticas públicas ou mesmo incentivos, no sentido de alavancar este tipo de geração.

Com relação a perspectivas futuras, a EPE (2014, indica que os cálculos realizados para determinar o aproveitamento energético dos RSU, apresentam premissas frágeis, tendo em vista a inexistência de série histórica sobre a produção dos RSU no país e a falta de dados sobre a análise gravimétrica do lixo produzido por núcleos populacionais de diferentes condições sociais, de forma que se pudesse analisar o potencial energético específico dos resíduos de cada um dos grupos.

Estes fatos indicam que o Brasil poderia produzir um terço da energia da Usina de Itaipu, quando da incorporação de ações de remediações de áreas degradadas do aproveitamento de geração de energia por meio de incineração ou queima do gás de aterro.

4.2 – TESTE DE FUNCIONALIDADE

Como teste de funcionalidade foi analisada técnica e economicamente a viabilidade de projetos de inserção de usina solar fotovoltaica em locais degradados que, após o fechamento desses locais, não terão mais funcionalidade para a sociedade. Com o propósito de dar uma utilidade a estes terrenos, o estudo projetou uma usina solar fotovoltaica para cada um dos 5 principais aterros definidos pela ABRELPE nas seguintes cidades: Brasília – DF, o maior da América Latina e segundo maior do mundo desativado em 2018, Carpina – PE, Camacan – BA, Divinópolis – MG e Jaú – SP.

Com os dados de irradiação global horizontal e área útil de cada um destes, dimensionou-se a capacidade de potência instalada para cada um dos aterros, com valores de 219,26 MWp para o aterro de Brasília, 5,09 MWp para Carpina – PE, 1,7 MWp para Camacan – BA, 1,17 MWp para Divinópolis e 2,1 MWp para Jaú – SP. Permitindo, portanto, a análise técnica, definiu-se que o estudo analisa para o caso de locais com capacidade instalada maior que 3 MWp seriam estudados com esse valor de potência, pois é uma capacidade instalada que possui um valor capaz de produzir a forma de contratação de uma empresa para execução do projeto, valor que deve ser acima de 10 milhões de reais, de acordo com a lei de PPP.

Obtendo o valor inicial necessário para o financiamento de cada uma dessas usinas, a tarifa de energia, O&M de 1% a.a., Taxa de Juros de Longo Prazo de 6,26% a.a. e a troca de inversores no 10º e no 20º, mostrou-se que cada um dos projetos é completamente viável de ser realizado. Em destaque, estudou-se com mais afinco o caso de Brasília devido ao mesmo ter sido encerrado em 2018 as suas principais atividades, a ocorrência do início dos trabalhos de pesquisa para o desenvolvimento do Projeto de Remediação Ambiental-Energética e Sustentável para Aterros (RAEESA), o qual busca o aproveitamento dos poluentes provocados pelos resíduos ali despejado ao longo de tantos anos de atividade, inclusive utilizando a área para instalação de usina solar fotovoltaica e devido também ao fato de o trabalho ter sido realizado em Brasília.

Com o destaque a Brasília devido aos motivos supracitados, destaca-se que esta produziu os melhores resultados, com um valor presente líquido de R\$ 35.107.671,94, uma taxa interna de retorno de 36,60% e um tempo de retorno do investimento de aproximadamente 3 anos, mostrando que o projeto técnico também é vantajoso no sentido econômico. Além desses detalhes, destaca-se o custo nivelado de energia da fonte solar igual a 219,30 R\$/MWh, resultado este que foi capaz de comprovar a viabilidade do uso da energia solar fotovoltaica para abastecer Brasília.

Juntamente com esses resultados e mostrando que os demais projetos também são altamente atrativos, analisou-se a forma de contratação por meio de Parceria Público-Privada para efetivar a execução e gestão do empreendimento solar. A partir dos resultados econômicos concomitantemente a análise de sensibilidade apresentada também no trabalho, chegou-se ao resultado de que é viável a PPP para contratação de uma empresa desde que o parceiro público seja um órgão público que seja uma unidade consumidora de energia, em especial aos que se enquadram na tarifa B3. Ao mesmo tempo mostrou-se que não é viável para órgãos distribuidores de energia elétrica, pois o valor de compra de energia é relativamente baixo e além do que este custo é repassado para o cliente final.

Referência

- Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Instalação de Usina Solar Fotovoltaica os 5 principais Aterros do Brasil. Julho de 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Gabriel Neiva Pereira (TCC2). Orientador Prof. Rafael Amaral Shayani

Capítulo 5 – CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO

5.1 – CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS ECONÔMICOS

A recuperação da energia de resíduos sólidos proposta pelo projeto RAEESA envolveu um pacote de tecnologias de geração, que operam de forma híbrida e integrada no aproveitamento dos recursos energéticos do aterro. O aproveitamento energético proposto pode assim compor um polo energético sustentável, proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos. A valorização de rejeitos térmicos em equipamentos de conversão, viabiliza a utilização de tecnologias para processamento de resíduo remanescente (Combustível Derivado dos Resíduos - CDR) e na descontaminação do chorume. A Tabela 4 e a Figura 8 a seguir fornecem uma visão global dos possíveis aproveitamentos energéticos na área.

Tabela 4 – Componentes de energéticos

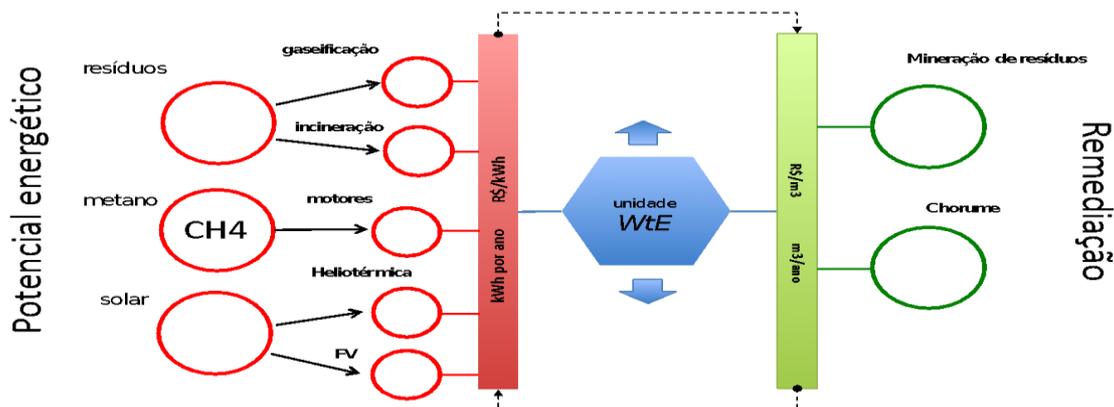


Figura 8 – Esquemático dos Componentes Energéticos

Em decorrência dos estudos realizados e das pesquisas e levantamento de dados na área, visualizou-se o seguinte posicionamento dos aproveitamentos, apresentado na Figura 9 a seguir, considerando dentre outros fatores a proximidade do insumo energético e das condições do terreno

Figura 9 – Aproveitamentos Energéticos no Lixão da Estrutural

Com base nos estudos realizados e levantamento de dados em campo, foi possível determinar o potencial energético das diversas fontes de geração e formular uma sugestão de um sistema híbrido composto por um conjunto de subsistemas que envolvem tecnologias de conversão solar e térmica, dimensionadas em face dos recursos energético primários (irradiação solar e massa de resíduos combustíveis) e do rejeito térmico dos grupos geradores a gás de aterro. A Tabela 5 a seguir apresenta uma descrição destes subsistemas que resultam no total de 60,3 MW.

Tabela 5 – Descrição de subsistemas energéticos

Sistema	Potência nominal	Descrição
Grupos geradores para gás de aterro	9 x 1,016 = 9,1 MWe	Motores de combustão interna turbo alimentados para a queima direta de gás de aterro. Eficiência global de 35%
Termoelétrica gaseificação e fornalha	15 MWt	Conjunto gaseificador fornalha para queima de gás de síntese, com troca de calor para óleo térmico. Eficiência térmica de gaseificação /queima de 81%
Termoelétrica bloco de potencia ORC	5 MWe	Ciclo ORC (Rankine orgânico) com turbinas axiais/gerador, bem como sistema de condensação em ar ambiente. Eficiência de ciclo de 20%
Usina solar fotovoltaica	30 MWp	Usina solar fotovoltaica com painéis de inclinação fixo e inversores modulares de 1 MW Eficácia de 1629 kWh/ano/kWp
Usina solar heliotérmica	1,2 MWt	Usina solar heliotérmica com concentradores lineares-Fresnel Eficácia de 2200 kWh/ano/kW

O sistema concebido despacha eletricidade para a rede e o calor é utilizado parcialmente para a conversão no sistema ORC (Rankine orgânico) de 5MW e para o processamento interno de churume (e eventualmente na secagem de CDR - Combustível Derivado dos Resíduos). O sistema de aproveitamento de gás de aterro produz eletricidade e calor. A energia térmica é complementada pela queima de CDR e pela absorção de energia solar pelo campo de concentradores do sistema heliotérmico. Os valores anuais médios apresentados demonstram um fechamento do balanço global de energia do sistema, com excedentes na ordem de 15%, que compensam assim perdas e variações de sazonalidade.

Lembra-se que a geração de energia varia ao longo do ciclo de vida da usina, tendo em vista o decaimento da disponibilidade de gás de aterro, bem como variabilidades devido à extração de resíduos pela mineração. Junta-se a este comportamento temporal o fato de que a energia solar apresenta uma variabilidade própria devido ao ciclo diurno e ao caráter naturalmente estocástico da disponibilidade de irradiação solar. Observa-se que os valores para a conversão energética em cada subsistema e no acoplamento entre eles foram obtidos pelos modelos desenvolvidos, utilizando dados de fabricantes para as características operacionais de equipamentos comerciais.

A partir desta composição foi possível estimar os valores de produção de energia elétrica nos 20 anos de operação da usina híbrida, conforme apresentado a seguir.

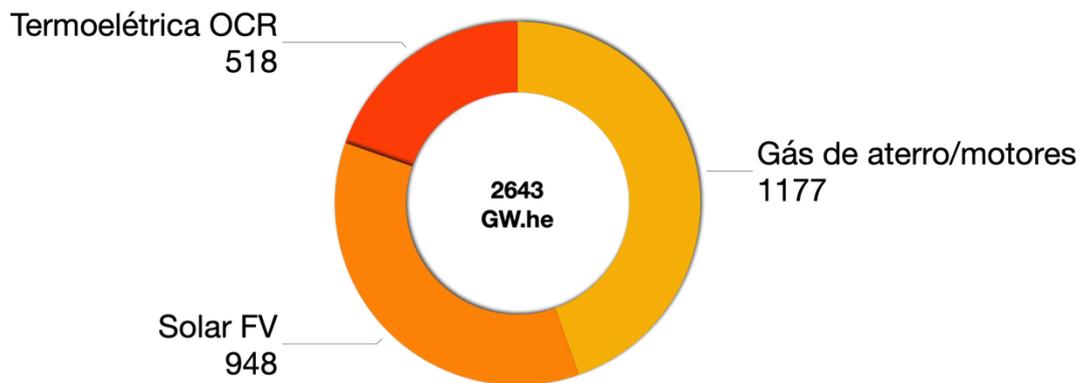


Figura 10 – Produção de energia elétrica no ciclo de vida do aterro (20 anos) em GWh

Estes valores são obtidos pela utilização dos modelos considerando todas as variabilidades dos sistemas (diária e anual). As simulações demonstram um potencial energético importante, o qual pode ser aproveitado de forma integrada ao processo de remediação. Este potencial preserva a exploração do gás de aterro no maciço e utiliza áreas mais livres (em particular a faixa junto à fronteira do Parque Nacional de Brasília) para a utilização de sistemas de conversão de energia solar – plenamente compatível com o baixo risco para a unidade de conservação. A produção de energia limpa de origem solar e de recuperação energética de RSU proporciona ganhos econômicos e de inserção de energia limpa na matriz energética local do Distrito Federal.

O principal peso na geração de eletricidade do sistema híbrido centra-se no aproveitamento de gás de aterro. A complementaridade dos sistemas de termoeletricidade (pela queima do CDR e subsistema heliotérmico) bem como na produção pela conversão direta da usina fotovoltaica, proporciona um fechamento de balanço energético coerente, proporcionando robustez ao despacho de eletricidade e uso do calor.

A mineração e produção de CDR centra-se nas áreas periféricas do maciço em um primeiro momento. A estratégia proposta considera a reciclagem de plástico tipo PET e de parte do CDR produzido, como forma de compensar custos de mineração.

Os benefícios ambientais advindos do processo de remediação envolvem a redução da carga de chorume (500 mil m³/ano), e pela a redução de emissões atmosféricas. Cabe observar que o sistema proposto apresenta uma redução de emissões de gases de efeito estufa estimada em 38,4 mil tonCO₂eq/ano, tendo em vista a produção de energia limpa e queima de metano.

Para a realização da avaliação econômica da composição apresentada foram levantados custos referenciais para cada um dos componentes do sistema integrado, junto a referências internacionais e nacionais de estudos econômicos de sistemas energético (EPE, 2018; IRENA, 2020; Lazard, 2020). Alguns contatos com fornecedores e empresas de montagem de plantas de energia e mineradoras foram efetuados no ano de 2020, convertendo valores em reais para dólar. A análise aqui desenvolvida considerou uma análise de valor presente de investimentos e manutenção e operação dos sistemas. A taxa de desconto anual utilizada é de 10%. A Tabela 6 a seguir apresenta um resumo dos custos de referência

Tabela 6 – Custos de referência

Sistema	Equipamentos e instalações CAPEX	Operação OPEX
Mineração*	10 – 15 US\$/ton	
Extração e condicionamento de gás de aterro	75.000 – 135.000 US\$/ha	1.200 – 1.600 US\$/ha/ano
Grupo geradores	700 – 800 US\$/kWe	10 – 15 US\$/MWeh
Termoelétrica (OCR+Gaseificador+Caldeira)	2.000 – 6.000 US\$/kWe	110 - 130 US\$/MWe/ano
Usina solar fotovoltaica	1.000 – 1.300 US\$/kWp	10 – 15 US\$/KWp/ano
Usina solar heliotérmica Campo solar	2.500 – 4.000 US\$/kWt	10 – 20 US\$/KWth
Evaporador de Chorume*	6,0 – 8,0 US\$/m ³	
Conexão à rede elétrica	12.000 US\$/MW	500-700 US\$/MW/ano

* Custos integrados CAPEX+OPEX

Cabe observar que os custos estimados de mineração e de processamento evaporativo de chorume foram orçados como uma prestação de serviço anual para o projeto, refletindo assim um modelo de negócio para o processamento do substrato lixo-solo (em ton/ano) e de processamento do volume bruto de chorume (em m³/ano).

Com base nestes valores alguns indicadores econômicos do projeto podem ser estimados conforme Tabela 7 a seguir:

Tabela 7– Estimativa de custos do sistema energético híbrido

Sistema	Base de cálculo	CAPEX (MUS\$)	OPEX (US\$/ano)
Grupo geradores (9 unidades)	9,1 MWe 1170 (GWh)	6,8	735.000
Termoelétrica (OCR+Gaseificador+Caldeira)	5 MWe 518 (GWh)	20,0	600.000
Usina solar fotovoltaica	30 MWe 948 (GWh)	34,5	375.000
Usina heliotérmica Campo solar	1,28 MWt 52,8 (GWth)	4,16	19.200
Conexão à rede elétrica	44,1 MWe	5,29	26.000
Evaporação do chorume	500.000 m ³ /ano	6,03	1.750.000*

*custo globalizado

Em conclusão, foi possível inferir que o estudo de viabilidade técnica e econômica do sistema energético híbrido para o Aterro JCB, realizado com base em uma concepção tecnológica inovadora, que visou integrar a geração de eletricidade à remediação ambiental da área do aterro fechado. Para um projeto de vinte anos de execução, propõe-se uma usina híbrida que agrega subsistemas de aproveitamento do gás de aterro (usando grupos geradores), de queima de RSU aterrados em uma pequena termoelétrica em ciclo orgânico (ORC), de uma central solar fotovoltaica e de uma central solar heliotérmica. Todo este sistema é capaz de proporcionar um retorno econômico para o contexto da geração de eletricidade, processando as emissões de chorume ao longo do ciclo de vida do projeto e reduzindo emissões de gases de efeito estufa.

O sistema proposto é viável do ponto de vista técnico e econômico em uma primeira avaliação técnica, proporcionando retornos econômicos ao empreendimento energético, mensurável por critérios econômicos e compatíveis em seus custos com padrões internacionais.

No entanto, ao integrar-se todos os custos de recuperação da área, altos valores do empreendimento de remediação e recuperação plena da área não podem ser compensados pelos retornos econômicos da geração de eletricidade e venda de recicláveis. Isto indica que algum aporte econômico adicional deva ser complementado, tendo como sugestões algumas possibilidades suplementares a serem consideradas em estudos posteriores:

- Expansão da área de exploração da energia solar fotovoltaica em um novo módulo de 20 MW, compatível com a disponibilidade de área do aterro; e/ou
- Aumento do tempo de vida de exploração energética do subsistema solar fotovoltaico para 25-30 anos; e/ou
- Sinergia do sistema energético proposto com a solução energética para a usina de “lixo novo”, compartilhando custos e retornos econômicos em uma proposta integrada para a recuperação energética do lixo em Brasília; e/ou
- Contabilização da valorização do valor venal do terreno (de propriedade pública), viabilizando assim o processo de recuperação plena da área; e por fim
- Contabilização de retornos ambientais quantificáveis economicamente, associados à redução de emissões.

Finalmente, a proposta apresentada representa uma iniciativa diferenciada para a transformação do passivo ambiental do aterro JCB, envolvendo benefícios mensuráveis para a sociedade e estabelecendo uma referência apropriada para solução da situação atual da área, reduzindo uma tendência de degradação ambiental local para uma rota de soluções sustentáveis. As contribuições relativas aos possíveis impactos econômicos do projeto, estão apresentados nas seguintes referências

- **Relatório - Hibridização de Fontes de Geração**

Resumo - Para o projeto RAEESA, se visualiza a hibridização de usina fotovoltaica com usina térmica. A usina térmica utiliza como combustível a queima do gás metano e queima dos resíduos sólidos urbanos. Podendo complementarmente ser utilizada a usina heliotérmica para a produção de vapor. Para iniciar a discussão sobre o tema, a Aneel apresentou a Nota Técnica nº 051/2019-SRG-SCG-SRD-SRT/ANEEL de 17/06/2019, e posteriormente no período de 19/06 a 03/08/2019, instaurou a Consulta Pública 014/2019 visando colher subsídios para elaboração de proposta de normativo sobre o estabelecimento de usinas híbridas e/ou associadas. O relatório apresenta aspectos relacionados à hibridização de fontes de geração, com foco na aplicação no Projeto RAEESA.

- **Relatório - Plataforma Coralina. Sistema para Avaliação Integrada de Sistemas Híbridos para Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**

Resumo - Neste relatório apresentou-se o conceito do sistema integrado para avaliação energética, econômica e ambiental para o aproveitamento de recursos energéticos em áreas de aterro de resíduos sólidos urbanos. Trata-se de uma visão geral do sistema e de seu detalhamento com a estratégia de implementação em ambiente digital. Este sistema (Plataforma Coralina©) integra de forma quantitativa os diferentes eixos de desenvolvimento do projeto de pesquisa, e permitirá uma visão geral do potencial de geração e aproveitamento sustentável de recursos energéticos.

Considerou-se que o conjunto de informações disponibilizadas pela plataforma Carolina, envolvendo os componentes energético, econômico e ambiental, representa as ideias fundamentais oriundas do Hub energético sustentável, vão permitir uma visão geral de como os conhecimentos desenvolvidos pelo projeto podem ser apropriados de forma prática para tomadores de decisões. A partir destas informações, será possível definir a configuração tecnológica tecnicamente, econômica e ambientalmente mais apropriada para cada área degradada.

- **Capítulo 14 do Livro**
Implantação de sistemas energéticos híbridos em aterros encerrados.

Resumo: Neste capítulo discutiu-se um arranjo operacional integrado para a remediação dos impactos ambientais de áreas de aterro associado à implantação de um sistema híbrido de geração de eletricidade, que utiliza potenciais energéticos dos resíduos sólidos associados ao aproveitamento de energia solar. Este sistema compõe assim um hub energético sustentável, que pode proporcionar benefícios amplos, no processo de recuperação de uma área de aterro fechado. Um estudo de casos para o aterro do Jockey clube de Brasília foi apresentado

5.2 – CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS TECNOLÓGICOS

Os impactos tecnológicos do projeto se referem essencialmente à qualificação e quantificação das fontes de geração passíveis de constituir o hub energético do aterro de resíduos sólidos urbanos do Jockey Clube de Brasília. Foram identificadas as possibilidades de centrais solar fotovoltaica e heliotérmica, central termelétrica e centrais de aproveitamento do gás de aterro e chorume

A geração de eletricidade a partir de ciclos termodinâmicos de potência, associada à queima adequada de resíduos sólidos urbanos (ou do metano oriundo da sua decomposição em subsolo), representa uma prática moderna que proporciona resultados positivos, com efeitos multiplicadores para a gestão ambiental em grandes e médias cidades. Esta abordagem visa mitigar um importante problema ambiental urbano, recuperando parcialmente o aporte energético dos resíduos sólidos descartados em aterro.

Neste sentido o Projeto RAEESA teve como objetivo a formulação de uma solução integrada e sustentável para o aproveitamento energético de resíduos, utilizando tecnologias de conversão associadas em arranjos híbridos (aproveitamento de gás de aterro, usina solar e combustão de resíduos). A mitigação ambiental das áreas contaminadas, pode ser operacionalizada com o aporte energético residual da geração de eletricidade.

A recuperação da energia de resíduos sólidos que foi proposta pelo projeto RAEESA envolve um pacote de tecnologias de geração, que operam de forma híbrida e integrada no aproveitamento dos recursos energéticos do aterro. O aproveitamento energético proposto, descrito a seguir, poderá assim compor um polo energético sustentável,

proporcionando benefícios ambientais, sociais e econômicos para o DF. A valorização de rejeitos térmicos em equipamentos de conversão, viabiliza a utilização de tecnologias para processamento de resíduo remanescente (Combustível derivado dos resíduos) e na descontaminação do chorume.

Central Solar Fotovoltaica

O Projeto RAEESA prevê a instalação de uma central solar fotovoltaica junto à fronteira oeste da área de aterro. Trata-se de uma área vizinha ao parque nacional de Brasília, onde é vedada qualquer utilização que induza riscos ambientais à unidade de conservação, portanto compatível com o uso para a geração fotovoltaica. A central solar é concebida com arranjos de matrizes de painéis fotovoltaicos de Silício poli cristalino, com inclinação fixa, agrupados a inversores centrais.

Central Solar Heliotérmica

A central solar heliotérmica proposta pelo projeto RAEESA se baseou em unidades de concentração Linear-Fresnell. Este tipo de dispositivo concentra a energia solar em sistemas de dutos onde flui óleo térmico em faixas de temperatura entre 200°C-400°C. Os concentradores proporcionam a conversão de energia solar em potencial térmico, o qual será utilizado nos ciclos de potência da unidade termelétrica e nas unidades de processamento de chorume. A estratégia de hibridização dos diferentes vetores térmicos (sistema solar heliotérmica com o rejeito térmicos dos motores e da termelétrica), proporcionarão um fluxo interno otimizado de disponibilidade de energia em forma de calor, aproveitando de forma eficiente o potencial energético global do aterro.

Central para Aproveitamento do Gás de Aterro

A extração do gás será efetuada na região central do aterro, onde grande parte do volume de resíduos foi depositada ao longo das últimas duas décadas. O gás extraído é tratado e purificado, para queima em motores de combustão interna. Os rejeitos térmicos associados aos gases de combustão das unidades geradoras, serão aproveitadas no tratamento térmicos do chorume.

Central de Processamento de Chorume

A tecnologia de processamento do chorume do projeto RAEESA utiliza o potencial térmico oriundo dos rejeitos térmicos dos ciclos de potência, associados à energia convertida no sistema solar heliotérmico. No processamento, o chorume é aquecido em temperaturas entre 120°C-200°C, proporcionando um ciclo de evaporação e condensação da solução. As plantas industriais de processamento podem ser instaladas em containers, em locais adequados para a extração do chorume de subsolo.

Central de Geração Termoeletrica

A Usina Termelétrica para processamento de resíduos sólidos remanescentes, considerou um ciclo Rankine Orgânico (OCR) de alto Desempenho, integrado a um sistema de gaseificação do combustível sólido derivado do resíduo. A ideia principal é recuperar o resíduo descartado no subsolo (mineração do resíduo), utilizando o processamento prévio através da separação de inertes e secagem, produzindo assim o combustível derivado do resíduo (CDR). O CDR é parcialmente queimado em gaseificadores, produzindo gás de síntese (com alto teor de monóxido de carbono e hidrogênio. A queima na caldeira do gás proporciona a energia para o ciclo de potência. Este tipo de processamento proporciona um alto desempenho energético, com um eficiente controle de emissões em todo o ciclo.

5.3 – CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

A produção científica, considerando os temas correlatos ao projeto e especificamente ao Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília/ DF para estudo de caso, foi constituída do seguinte agrupamento de trabalhos:

- 3 dissertações de mestrado
- 7 trabalhos de conclusão de cursos e
- 10 informes técnicos apresentados em diversos eventos e periódicos nacionais e internacionais,

Onde foram abordados os seguintes temas:

Dissertações:

- Hibridização de Gás Confinado em Depósitos de Resíduos Sólido Urbano com Heliotérmica para Geração de Energia
- Modelagem Regional do Fluxo de Contaminantes Inorgânicos sob as Condições não Saturada e Transiente.
- Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas

Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) :

- Análise Técnico-Econômica de um Sistema Fotovoltaico e de sua Hibridização com uma Usina Waste-to-Energy no Lixão da Estrutural.
- Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Instalação de Usina Solar Fotovoltaica os 5 principais Aterros do Brasil.
- Análise Técnica da Instalação de Sistemas Fotovoltaicos em Aterros
- Análise de Sensibilidade da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas Localizadas em Aterros Brasileiros em Função do Recalque Diferencial do Solo.
- Avaliação do Potencial de Geração de Biogás no Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília/DF
- Avaliação da Eficiência da Camada de Impermeabilização de Aterros Sanitários. [Distrito Federal]
- Utilização de Aeronave Pilotada Remotamente (RPA) para Mapeamento do Aterros Controlado do Jockey Club de Brasília.

Informes Técnicos:

- Estratégia de Conversão Termoquímica de Resíduos Sólidos Urbanos.
- Simulation Tools for The Assessment of Advanced Thermal Treatment of MSW – Gasification Code
- Identificação de Emissões Fugitivas em Aterros por Meio de Termografia por Infravermelho
- Analysis of a Hybrid LFG-Concentrated Solar Power Concept for Landfill Energy Recover
- Desenvolvimento e Proposta de Ferramenta Computacional para Avaliações de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas.

- Abordagem Analítica para Obtenção de Parâmetros Relevantes do Fluxo e Transporte de Gases em Meio Poroso Não-saturado
- Estudo da Influência do Tempo de Agitação na Adsorção de Cromo e Magnésio em Solo Laterítico
- Assessment of Methane Emission Using Infrared Thermography - A Case Study in the Jockey Club Controlled Landfil
- Aproveitamento Energético no Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília Através da Hibridação de Biogás e Energia Solar Fotovoltaica
- Emissões de Metano a Partir de Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos - Uma Revisão Bibliométrica

Os trabalhos completos estão disponibilizados em anexo e os resumos dos mesmos com a indicação dos autores e professores orientadores estão apresentados a seguir,

DISSERTAÇÕES DE MESTRADO

Arthur Monteiro Filho.

Hibridização de Gás Confinado em Depósitos de Resíduos Sólido Urbano com Heliotérmica para Geração de Energia. O Caso do Lixão da Estrutural no DF.

Janeiro 2018

ORIENTADOR - Prof. Mario Benjamim Baptista de Siqueira

RESUMO

A demanda energética em todo o mundo aumenta a cada ano que passa. Isso se deve ao aumento expressivo da população mundial. Essa alta demanda causa a necessidade da utilização de uma quantidade maior de combustíveis fósseis, o que pode ser considerado um problema, já que os mesmos além de serem finitos causam problemas ao meio ambiente. Com tal crescimento faz-se necessário estudar e entender novas tecnologias e novas fontes de geração de energia. Nesse sentido, fontes de energias renováveis têm sido largamente estudadas, já que podem resolver ambos os problemas, o da demanda de energia e também a redução de emissões de poluentes. Uma das possibilidades de fonte renovável é a energia solar. O Sol é uma fonte de energia muito poderosa e pode suprir as necessidades energéticas de nosso planeta. A energia solar pode ser utilizada em um processo de conversão direta, caso da fotovoltaica, ou de forma indireta, caso da energia heliotérmica que transfere calor para um fluido de transferência de calor que posteriormente troca calor com água que é transformada em vapor em um ciclo convencional Rankine.

O aumento da população traz um outro fator importante a ser observado, o aumento da quantidade de resíduos sólidos gerados. A grande produção de resíduos é um tema muito importante a ser considerado. Essa preocupação vem da dificuldade de encontrar uma destinação final para todo esse resíduo. Atualmente no Brasil as principais formas de destinação final desses resíduos são, os aterros sanitários, aterros controlados e os lixões ou vazadouros a céu aberto, sendo que a quantidade de lixões ainda é grande. Uma alternativa à disposição final do lixo utilizando um desses métodos é a geração de energia por meio dos resíduos sólidos municipais (RSM).

Muitas tecnologias existem com essa aparente função. Podem ser citadas, a pirólise, gaseificação, incineração, pirólise por plasma, thermosteact e a produção de combustível derivado de resíduo (CDR). Esse trabalho tem como objetivo estudar uma solução viável para o problema do Aterro Jockey Clube

de Brasília, também conhecido como "lixão da estrutural". Para tanto é proposto simular uma planta híbrida de geração de energia, tal planta vai funcionar utilizando tecnologia de geração de energia solar (Heliotermia), os resíduos sólidos urbanos e o gás confinado nas camadas de resíduos depositados há anos no lixão.

Mariana dos Santos Diniz

Modelagem Regional do Fluxo de Contaminantes Inorgânicos sob as Condições não Saturada e Transiente Aplicada ao Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília/ DF. Julho de 2019.

ORIENTADOR – Prof. André Luís Brasil Cavalcanti

RESUMO

A contaminação ambiental dos solos, do ar e das águas subterrâneas e superficiais devido ao descarte inadequado de resíduos é uma importante problemática mundial a ser solucionada, sobretudo, dos países em desenvolvimento. No Brasil, apesar da imposição política para o fechamento de todos os lixões e aterros controlados, ainda há inúmeros municípios que não conseguiram se adequar às exigências nacionais. Além disso, o fechamento por si só não é a solução, uma vez que os contaminantes presentes nos resíduos continuam se propagando pelo meio ambiente. No âmbito da geotecnia ambiental, é preciso estudar todos os mecanismos que regem o transporte de contaminantes que, por sua vez, estão atrelados ao estado do meio poroso, pois os solutos dispostos na superfície da terra migram inicialmente pela zona vadosa até chegar nas águas subterrâneas. Atualmente, tem sido observada a defasagem nos modelos conceituais e numéricos na consideração dos processos de infiltração não saturada e sua influência no transporte de contaminantes, além disso, são restritos para os meios homogêneos. Deste modo, a pesquisa fundamentou-se na implementação de soluções analíticas que acoplassem o fluxo não saturado ao de transporte de contaminantes inorgânicos, visando obter um modelo em escala regional de dupla camada que permitisse analisar a concentração do soluto ao longo do tempo e da profundidade na zona vadosa. Para isso, fez-se uso de soluções analíticas, equação de Richards e equação da advecção-dispersão.

A aplicação da modelagem foi realizada para o Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília, com o estudo do fluxo de Cd^{2+} e de Mg^{2+} considerando as medições de concentração realizadas em 1996. Com isso, foi possível determinar a migração desses compostos inorgânicos ao longo do meio poroso e em função do tempo. No caso da modelagem da dupla camada, não é possível aplicá-la na zona intermediária do meio poroso, porém os resultados mostram-se condizentes quando analisados na primeira camada e na região próxima do lençol freático. A consideração do meio heterogêneo permitiu uma representação mais realista das situações de campo, entretanto, a estratégia utilizada no modelo, por ser em escala regional, tornou o tempo de processamento relativamente longo, ainda sim é aplicável às situações reais e permite subsidiar tomadas de decisão no que tange à remediação dos compostos mediante a obtenção de diagnósticos e prognósticos com a modelagem da pluma de contaminação não saturada e transiente.

Felipe Leite Nisiyama

Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas – Caso de Estudo: Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília/ DF. Julho de 2019.

ORIENTADOR – Prof. André Luís Brasil Cavalcanti

RESUMO

Atualmente, entende-se que o gerenciamento de áreas contaminadas está em grande parte condicionado à necessidade de adotar medidas voltadas para a proteção da saúde humana e dos diversos bens de interesse da sociedade, tais como os recursos hídricos. Sob esse entendimento, a avaliação de riscos à saúde humana permite ter evidências da forma com que as áreas contaminadas se traduzem em riscos à saúde dos indivíduos que residem ou desempenham alguma atividade em sua proximidade.

Tais evidências fornecem subsídios à tomada de decisão voltada para a remediação destas, com abordagens baseadas na minimização desses riscos. Nesse contexto, a existência de áreas da disposição final inadequada de resíduos sólidos no Brasil suscita questionamentos acerca do passivo ambiental nestas e os possíveis riscos à saúde humana decorrentes disso. Assim, este trabalho se propôs a apresentar uma ferramenta computacional que dê suporte a realização de avaliações de risco à saúde humana em áreas contaminadas, e por meio desta, estudar o caso do antigo Aterro Controlado do Jockey Clube (ACJC), no Distrito Federal, no qual a disposição inadequada de resíduos sólidos foi realizada por décadas.

TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO

Gabriel Micussi Lima Batista

Análise Técnico-Econômica De Um Sistema Fotovoltaico e de sua Hibridização com uma Usina Waste-to-Energy no Lixão da Estrutural. Dezembro 2019

ORIENTADOR – Prof. Rafael Amaral Shayani

RESUMO

A energia solar é uma energia limpa, renovável, e provém de uma fonte inesgotável em termos práticos. A geração de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos tem crescido em larga escala no mundo nos últimos anos. No Brasil, o crescimento dessa fonte energética se iniciou em larga escala a partir da publicação da Resolução no 482/2012 pela ANEEL, que estabeleceu os conceitos de micro e minigeração distribuída, regulamentando o sistema de compensação de energia no país. Além disso, há no Brasil cerca de 3.000 lixões a céu aberto, que apresentam riscos ambientais e sociais. O encerramento desses depósitos de resíduos origina áreas ociosas que podem ser aproveitadas através de propostas sustentáveis. Uma dessas propostas se refere às usinas *Waste-to-Energy*, que utilizam os resíduos sólidos para geração de energia. Diante desse contexto, esse estudo visa avaliar a viabilidade técnico-econômica da instalação de um sistema fotovoltaico no Aterro Jockey Club de Brasília, conhecido como lixão da Estrutural, e sobretudo analisar o quanto a hibridização da energia fotovoltaica com uma usina WtE contribui com o barateamento da instalação da usina WtE isoladamente, em termos do Custo Nivelado de Energia.

A forma de compensação de energia considerada se refere ao modelo de geração compartilhada disposto na Resolução ANEEL no 482/2012. Dimensionou-se um sistema de 4,8 MW, contendo 18 painéis em serie, 861 em paralelo e 12 inversores de 400 kW cada, e previu-se a possibilidade de subdividir a usina completa em 12 sistemas modulares de 400 kW. A geração de energia no primeiro ano de funcionamento é de 9.091 MWh e 756,1 MWh, respectivamente. Considerando-se o custo de 3,35 R\$/MWp, estimou-se o investimento inicial em R\$ 18.425.000,00, sendo o custo com O&M igual a R\$ 184.250,00 por ano e o custo de troca do inversor no ano 13 igual a R\$ 3.500.750,00. Para o sistema modular, o desembolso inicial seria de R\$ 1.537.650,00, O & M igual a R\$ 15.376,50 e para a troca do inversor um custo de R\$ 292.154,00. Dessa forma, para a usina completa obteve-se um VPL de R\$ 58.983.066,41, Período de

Payback descontado de 3 anos e 4 meses, TIR de 33,41% e LCOE igual a 199,17 R\$/MWh. A depender do grau de hibridização (com 10%, 25% ou 50% da energia produzida pertencente ao sistema fotovoltaico), o LCOE do sistema híbrido apresentou redução de 3,18%, 7,94% e 15,88%, respectivamente, em relação ao LCOE da usina WtE de 291,9 R\$/MWh. Ao se considerar um LCOE máximo da usina WtE de 458,7 R\$/MWh, a redução percentual do LCOE do sistema híbrido passa a ser de 5,66%, 14,14% e 28,29%, para os casos de 10%, 25% e 50% da energia produzida pelo sistema fotovoltaico, respectivamente.

Gabriel Neiva Pereira (TCC2).

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Instalação de Usina Solar Fotovoltaica nos 5 principais Aterros do Brasil. Julho 2019

ORIENTADOR – Prof. Rafael Amaral Shayani

RESUMO

O estudo analisou técnica e economicamente a viabilidade de projetos de inserção de usina solar fotovoltaica em locais degradados que, após o fechamento destes locais, não terão mais funcionalidade para a sociedade. Com o propósito de dar uma utilidade a estes terrenos, o estudo projetou uma usina solar fotovoltaica para cada um dos 5 principais aterros definidos pela ABRELPE nas seguintes cidades: Brasília – DF, o maior da América Latina e segundo maior do mundo desativado em 2018, Carpina – PE, Camacan – BA, Divinópolis – MG e Jaú – SP.

Ana Luísa Arduini Folster (TCC1).

Análise Técnica da Instalação de Sistemas Fotovoltaicos em Aterros. Dezembro de 2019.

ORIENTADOR – Prof. Rafael Amaral Shayani

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo estimativo de potencial de geração solar fotovoltaica em lixões. Primeiramente, foram estimados a quantidade de municípios que lançam seus resíduos em lixões ou aterros controlados no próprio município. Calculado um tamanho da amostra representativa dos lixões e aterros, foram medidas as áreas visualmente com o auxílio do *Google Earth* e determinada a área média. Determinou-se, então, a potência e a energia que um sistema fotovoltaico, ocupando diversos percentuais da área média, seria capaz de fornecer com os valores de irradiância e latitude das capitais do Brasil. Os dados das capitais foram extrapolados para as Unidades da Federação e, por fim, para o país todo. Com um aproveitamento de 25% de toda a área de lixões e aterros controlados no Brasil, ter-se-ia uma potência instalada de 1,52 GW e geração de 2,12 TWh/ano, capaz de suprir 0,45% do consumo energético do país em relação ao consumo de 2017.

Ana Carolina de Lima Veloso (TCC1).

Análise de Sensibilidade da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas Localizadas em Aterros Brasileiros em Função do Recalque Diferencial do Solo. Dezembro 2019

ORIENTADOR – Prof. Rafael Amaral Shayani

RESUMO

Há uma crescente preocupação mundial em relação às mudanças climáticas, decorrentes principalmente da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Um dos setores que produz mais poluentes é a geração de energia elétrica, situação que impulsionou o uso de fontes renováveis. Neste contexto, há um grande crescimento da energia solar fotovoltaica na matriz energética mundial. Dentre as vantagens que justificam esse crescimento, pode-se citar o desenvolvimento tecnológico, o qual permite uma redução nos custos de implementação desse tipo de sistema. Concomitantemente, devido à disponibilidade de grandes áreas em aterros cujas atividades fins foram encerradas, a instalação de usinas fotovoltaicas se torna um grande atrativo.

Por se tratar de um terreno com camadas de resíduos sólidos em sua composição, deve-se levar em consideração a instabilidade desse solo. Dessa forma, faz-se necessário estudar a deformação coletiva uniforme ou não uniforme causada por alterações que afetam as propriedades desses resíduos ao longo do tempo, ou seja, o estudo do recalque. Para tanto, são empregadas ferramentas que possibilitam sua simulação, por meio da variação da inclinação e do azimute do solo do aterro. De posse dos resultados destas análises, é identificada a perda energética do sistema em relação à variação do assentamento, observando-se a máxima e a mínima produção de energia nas usinas implementadas nos aterros brasileiros selecionados.

Camilla Turon Baran

Avaliação do Potencial de Geração de Biogás no Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília/DF. Julho 2019

ORIENTADOR – Prof. André Luís Brasil Cavalcante

RESUMO

Apesar de a Política Nacional de Resíduos Sólidos considerar os aterros sanitários como formas de disposição final ambientalmente adequadas, eles têm o potencial de causar inúmeros impactos ambientais, como por exemplo, a contaminação dos recursos naturais por substâncias químicas presentes no lixiviado. Para evitar esse tipo de contaminação, é exigida uma camada de impermeabilização – ou *liner* de fundo –, a qual, normalmente, é composta por um solo de baixa permeabilidade compactado e um geossintético conhecido como geomembrana. Sua principal função é atenuar a percolação de contaminantes ao longo do solo de modo que suas concentrações permaneçam dentro dos limites de qualidade e não ofereçam riscos à saúde. Apesar disso, o mecanismo de transporte da difusão molecular ainda atua na transferência de substâncias químicas, pois ele é decorrente apenas do gradiente de concentração. O estudo tem o intuito de analisar a eficiência da camada de impermeabilização de aterros sanitários por meio da modelagem do fluxo difusivo ao longo do solo e da geomembrana. Foi usado o software *Wolfram Mathematica* em todo o processo de modelagem. Foram analisados os contaminantes: cádmio, cobre, cloreto, níquel e cromo. Os modelos de difusão em solos e na geomembrana foram validados com dados do Aterro Sanitário de Brasília. Foi encontrado que a geomembrana não foi capaz de evitar a passagem dos íons de cloreto e cromo durante o período de vida útil de um aterro simulado. O *liner* de solo compactado mostrou-se eficiente na contenção de todos os contaminantes testados. As faixas encontradas de coeficientes de difusão molecular, com sorção, no solo foram: cromo entre $1,5 \times 10^{-11}$ e $2,2 \times 10^{-12}$ m²/s; cobre entre $1,2 \times 10^{-12}$ e $6,8 \times 10^{-15}$ m²/s; cloreto igual a $5,0 \times 10^{-10}$ m²/s; cádmio entre $1,3 \times 10^{-12}$ e $5,7 \times 10^{-13}$ m²/s e níquel entre $2,6 \times 10^{-12}$ e $6,4 \times 10^{-12}$ m²/s. O estudo foi capaz de fornecer ferramentas de simulação do fluxo difusivo de alguns poluentes ao longo do tempo, que possibilita verificar o risco de contaminação e de desrespeito às normas de qualidade, além de auxiliar no dimensionamento de estruturas em aterros. Os resultados permitiram questionar a necessidade da geomembrana em empreendimentos de aterros sanitários, uma vez que o *liner* de solo se mostrou suficiente na contenção dos contaminantes.

Maria Beatriz de Paula Macedo

Avaliação da Eficiência da Camada de Impermeabilização de Aterros Sanitários.
[Distrito Federal]. Julho 2019

ORIENTADOR – Prof. André Luís Brasil Cavalcante

RESUMO

O biogás é uma fonte de energia renovável que pode substituir o uso de vários combustíveis fósseis que compõem a matriz energética nacional. Entretanto, a literatura demonstra que modelos *Landfill Gas Formation* (LFG) se mostram limitados na descrição dos reais processos que ocorrem nas células de resíduos de um aterro, sendo ainda menos representativos para os locais de disposição que não tiveram sua origem planejada, como é o caso do Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília/DF (ACJ). Nesse trabalho, foram feitas análises de estimativas teóricas e empíricas de metano e biogás para o ACJ. A fim de estimar o biogás gerado no ACJ no período de 1967 a 2018, foram utilizados os modelos de decaimento de primeira ordem do IPCC e do LandGEM da USEPA, através da variação da constante da taxa de geração (k) e do potencial de geração de metano (Lo), em relação a dois cenários de resíduos aterrados. Utilizou-se ainda a outra metodologia do IPCC que considera que todo o CH₄ seria liberado no ano de deposição dos resíduos. Por meio da aplicação desses modelos, foi possível obter uma faixa de valores prováveis para picos de emissão: 18,6 Gg/ano a 57,1 Gg/ano para metano e 75,4 Gg/ano a 231,2 Gg/ano para biogás total. Todos os queimadores existentes, no local, foram mapeados e, através de dados obtidos em campo, foram feitas interpolações IDW para prever o fluxo de biogás e a concentração de metano em regiões desconhecidas. Com isso, obteve-se um valor aproximado para a geração anual de biogás no ACJ, equivalente a 323.325.846,54 m³/ano. Realizou-se, ainda, um teste de validação para os resultados dos valores de concentração de metano, advindos da interpolação IDW, que indicou que poucos queimadores apresentavam concentrações reais de metano próximas aos intervalos obtidos pela interpolação e apenas um apresentou resultado compatível com o valor real.

Felipe Ribeiro de Toledo Camargo

Utilização de Aeronave Pilotada Remotamente (RPA) para Mapeamento do Aterros Controlado do Jockey Club de Brasília. Dezembro 2018

ORIENTADOR – Prof. André Luís Brasil Cavalcante

RESUMO

A busca pelo equilíbrio entre um modelo econômico capitalista e a preservação do meio ambiente é um grande desafio para a sociedade atual. O modelo atual de produção nitidamente não está de acordo com a resiliência dos biomas mundiais. Cada ano que passa a população cresce e com esse crescimento ocorre uma maior demanda energética. Além do aumento da demanda de energia, o crescimento da população causa um aumento na geração de resíduos, o que necessita de um maior cuidado com a disposição desses resíduos. A atual forma de produção segue uma tendência linear e isso foge de uma economia sustentável. Entendendo que os grandes problemas do mundo num futuro próximo serão a disponibilidade hídrica, armazenamento e geração de energia e disposição de resíduos, esse trabalho faz um estudo de caso do aterro controlado do Jockey que foi fechado em janeiro de 2018. Um aterro que recebeu resíduo de forma inadequada por quase 50 anos causando uma poluição das águas subterrâneas, além de outros impactos ambientais e sociais negativos. Diante desse passivo ambiental criando na capital do país, realizou-se um mapeamento aerofotográfico dos 170 hectares que receberam os resíduos da população do Distrito Federal e com o software *Arcgis* fez-se uma estimativa do volume de resíduo que se encontra atualmente no aterro. Esse mapeamento foi realizado com o auxílio de uma aeronave remotamente pilotada (RPA) e será gerado um modelo digital do terreno, um modelo digital da superfície,

curvas de nível respectivas ao modelo do terreno a ao de superfície e uma ortofoto georreferenciada com uma precisão de exatidão cartográfica classe A. Com o volume final estimado deseja-se propor possíveis cenários para a área de estudo. Cenários que abordem técnicas de remediação para a região que vise tratar a água subterrânea, tratar o biogás gerado, recuperar a área impactada e valorizar economicamente o resíduo. Dois cenários focaram no conceito de autorremediação e de sistemas híbridos de energia, enquanto o último cenário é a opção de apenas continuar aterrando a área e deixar o meio ambiente remediar a área.

INFORMES TÉCNICOS

Fábio Cordeiro de Lisboa, Carlos Alberto Gurgel Veras, Antônio Cesar Pinho Brasil Jr.

Estratégia de Conversão Termoquímica de Resíduos Sólidos Urbanos.

11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul

RESUMO

O artigo traz uma análise da coleta de resíduos sólidos no Distrito Federal, em particular o destinado ao aterro sanitário da Estrutural, já desativado. Com o objetivo de promover a remediação ambiental da área, são analisados diferentes processos termoquímicos para aproveitando o lixo minerado na conversão energética. Após uma criteriosa amostragem, a caracterização do material coletado é feita em duas estratégias: uma com o lixo sem nenhum tratamento térmico, a fim de medir o potencial energético e outra com as frações obtidas após pirólise, com o objetivo de entender a degradação térmica do material minerado. Observou-se que foram enterradas 19.724.915 toneladas de resíduos, em sua maior parte sem seleção prévia. Mediu-se um poder calorífico inferior base úmida ($PCI_{(bu)}$) de 2,3 MJ/kg, para uma umidade de 22,7%. Com este valor é possível a conversão de até 11.341 GWh em calor ou 2.520 GWh em eletricidade. O processamento por pirólise do resíduo minerado apresenta-se como uma possibilidade, usando a queima dos gases gerados como parte do combustível necessário para elevação da temperatura a cerca de 300°C, retornando o material inerte e descontaminado para o meio ambiente, reduzindo o impacto ambiental.

Jackson Costa da Silva, Carlos Alberto Gurgel Veras, Antônio Cesar Pinho Brasil Jr.

Simulation Tools for The Assessment of Advanced Thermal Treatment of MSW – Gasification Code,

11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul

ABSTRACT

The landfill near downtown Brasilia was shut down some years ago. The amount of waste that has been landfilled is in excess of 19,000,000 tons. Strategic studies are being carried out for the energetic utilization of the stored energy through landfill mining. Advanced conversions technologies for municipal solid waste are based on either, pyrolysis or gasification.

In this work we present a novel thermochemical equilibrium model to estimate gasification performance of MSW. In most instances, though, the producer gas has to be cleaned for particle matter and tar extraction. Based on that, we proposed a two-step conversion pathway, based on staged gasification in two stand-alone equipment. Carbonization of MSW in a pyrolysis reactor followed by gasification of the derived charcoal for low tar producer gas. Code predictions confirmed the improved quality of the syngas when charcoal is used as the feedstock. Low temperature steam gasification of the derived charcoal

further increased the quality of the syngas for Fisher-Tropsch synthesis and heat engine applications by virtue of its high content of hydrogen and carbon monoxide.

Antonio C. P. Brasil Junior e Marcela Cardoso Rodrigues

Identificação de Emissões Fugitivas em Aterros por Meio de Termografia por Infravermelho

11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul

RESUMO

O presente trabalho busca contribuir com metodologias existentes de quantificação de emissões fugitivas de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. Considerando que a produção do biogás se dá por meio de reação exotérmica, tal processo provoca um aumento de temperatura na superfície por onde o gás flui. O principal objetivo é demonstrar a relação entre anomalias superficiais de temperatura em solos de aterros e a presença de emissões fugitivas de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Campanhas de medições foram feitas no Aterro Controlado do Jockey Clube - Distrito Federal, e experimentos de transferência de calor em meio poroso permitiram uma identificação do fenômeno em laboratório. Imagens termográficas feitas com o uso de infravermelho térmico permitiram a visualização térmica das superfícies estudadas e o medidor portátil de gás GEM-5000 permitiu a identificação das diferentes concentrações dos gases, *in situ*. Os resultados mostram que 80% dos pontos aferidos em campo apresentam convergência entre temperatura e concentração de CH₄ e CO₂, o que comprova importante correlação entre as anomalias térmicas e pontos de escape de gases em aterros. A representação do escoamento do fluxo de ar quente através de descontinuidades no meio poroso na bancada experimental foi captada pela termografia, atribuindo maior acurácia ao processo de aferição. Com esses resultados qualitativos, consegue-se mostrar que a metodologia utilizada é potencialmente uma ferramenta complementar para a identificação de emissões fugitivas em aterros, consequentemente, contribuindo com práticas de remediação ambiental e uso energético do biogás.

Mario B. Siqueira, Arthur Monteiro Filho

Analysis of a hybrid LFG-Concentrated Solar Power concept for landfill energy recover
Journal of Cleaner Production - 2020

ABSTRACT

In the present study, new approaches for Landfill gas (LFG) energy recover from operating and decommissioning landfills were examined. LFG energy recover is already a reality in several developed and developing countries. Here, in order to improve energetic performance of the electricity generation, hybridization of LFG with other landfill-readily available energy sources, namely solar thermal and syngas from waste gasification, are explored. The arrangement tested comprised of Integrated Solar Combined Cycle System. Several scenarios were tested with different configurations and operational modes. Results have shown that hybridization LFG powered gas turbine (GT) with solar energy in combined cycle arrangement made possible to more than doubled system power rating when compared to GT alone. However, power generation would not raise proportionally if there is limitation to solar field size, which may be the case for landfills. The addition of a supplementary of landfill-readily available energy source, such as syngas from waste gasification, compensate for this drawback and might be best option for landfill power generation or combined heat and power.

Felipe Leite Nisiyama, André Luís Brasil Cavalcante, Luciano Soares da Cunha.
Desenvolvimento e Proposta de Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas.
GEOCENTRO. 24 A 25 de outubro de 2019. Brasília

RESUMO:

O risco à saúde humana é um aspecto central no gerenciamento de áreas contaminadas, uma vez que a partir do seu reconhecimento e quantificação é possível planejar e elaborar ações de remediação voltadas para proteger os indivíduos presentes nessas áreas. Dessa forma, o presente trabalho tem como principal objetivo apresentar o desenvolvimento e a proposta de uma ferramenta computacional que auxilie a realização de avaliações de risco em áreas contaminadas. A ferramenta possui quatro módulos principais implementados em interfaces gráficas, cujas funcionalidades permitem conduzir avaliações de risco à saúde humana – conforme a metodologia proposta pela USEPA (1989) – mediante a entrada de dados acerca da contaminação e do uso e ocupação das áreas onde existem indivíduos possivelmente expostos.

Moisés Antônio da Costa Lemos, André Luís Brasil Cavalcante, Luciano Soares da Cunha.

Abordagem analítica para obtenção de parâmetros relevantes do fluxo e transporte de gases em meio poroso não-saturado
GEOCENTRO. 24 a 25 de outubro de 2019. Brasília

RESUMO:

O fluxo em meios não saturados é de grande importância pela facilidade de encontrar solos nesse estado na natureza. Embora o fluxo de água seja amplamente estudado e possua diversas abordagens para o entendimento, faltam trabalhos que consigam prever parâmetros de gases presentes na fase gasosa. Dessa forma, este trabalho propõe uma abordagem analítica na obtenção de parâmetros relevantes para o entendimento e descrição do fluxo e transporte de gases em meios porosos não saturados.

Tais Avelar Guimarães, Luís Fernando Martins Ribeiro, Luciano Soares da Cunha André Luís Brasil Cavalcante.

Estudo da Influência do Tempo de Agitação na Adsorção de Cromo e Magnésio em Solo Laterítico
GEOCENTRO. 24 a 25 de outubro de 2019. Brasília

RESUMO:

O presente trabalho tem como objetivo avaliar, comparativamente, se existe diferença entre tempo de agitação e tempo de contato na adsorção de Cromo e Magnésio em amostras de solo laterítico de

Brasília/DF. Para tal, foram realizados ensaios do tipo BET (*Batch Equilibrium Test*), adotando um mesmo tempo de reação e diferentes tempos de agitação para cada contaminante e concentração. Os resultados de concentração final e adsorção encontrados se mostraram comparativamente bastante próximos, com erros percentuais, em sua maioria, abaixo de 4%. Assim, é razoável a adaptação do procedimento do ensaio tipo BET, a qual visa um tempo de agitação inferior ao de contato, para os contaminantes e solo estudado.

Ana Rafaela Sobrinho de Miranda, Marcela Cardoso Rodrigues, Hugo Mesquita Luciano Soares da Cunha, Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

Assessment of Methane Emission Using Infrared Thermography - A Case Study In the Jockey Club Controlled Landfil

25^o ABCM International Congress of Mechanical Engineering. 20 a 25 de outubro de 2019. Uberlândia MG

ABSTRACT:

Landfills are considered the third largest source of methane emissions in the world, it is a risk to the environment being flammable and a polluting gas. Focusing on atmospheric emissions of methane (CH₄) from landfills, this study directs efforts to verify CH₄ screening methods. Considering as a case study the Jockey Club Controlled Landfill (ACJ), once known as the largest landfill in Latin America. The goal is to prove a relationship between the surface thermographic indicators and methane emission. Two methods of analysis were applied: surface temperature measurement with Thermal Infrared (TIR) and determination of CH₄ emissions with a portable gas monitor (GEM-5000). Results provided both important information on the amount of main methane emission points emitted from the ACJ and the correlation between the thermal anomalies with methane emission points in landfills. The study proves a relation between surface temperature and methane emission, allowing a new control tool for methane emissions, environmental remediation and energy use in a landfill area.

Maurício Simões Santanna, Priscilla Cardoso Villela, Tainara da Silva Costa

Aproveitamento Energético no Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília Através da Híbridação de Biogás e Energia Solar Fotovoltaica.

RESUMO.

Nos últimos tempos o ser humano tem produzido mais resíduos, levando a um grande problema para as metrópoles urbanas. O problema cresce a passos largos devido a fatores tais como o crescimento populacional, a falta de planejamento urbano e a não aplicação dos 3R's (Reduzir, Reciclar e Reutilizar), causando danos ao meio ambiente e a saúde da população, através das emissões provenientes da decomposição desse material. Os lixões são locais onde esse lixo vem sendo depositados e justamente pela falta de impermeabilização do solo agrava os problemas ao ecossistema local e mundial. Em 2010, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos estabeleceu o fim do lixão sendo o mesmo substituído por aterros controlados, onde há um preparo do solo para receber esses resíduos sólidos. Dentro desse contexto, a decomposição orgânica gera gases que podem ser bastante poluentes, mas ao mesmo tempo tem um elevado potencial energético, podendo assim ajudar na produção de energia para alimentar a rede elétrica e minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente. Contudo, ao passar os anos a produção desses gases reduz drasticamente, para que o investimento seja mais atrativo economicamente abre-se portas para a hibridização de fontes de geração. Para o estudo de caso em que envolve o Aterro Controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural) este artigo pretende analisar a aplicabilidade para a hibridização entre a produção de energia através do gás de aterro e da geração fotovoltaica, por estar, a caminho de um

desenvolvimento sustentável, do aproveitamento de algo com extremo potencial poluidor e pela grande incidência de raios solares na cidade de Brasília.

Ana Rafaela Sobrinho de Miranda Marcela Rodrigues

Emissões de Metano a Partir de Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos - Uma Revisão Bibliométrica

RESUMO.

Através de uma análise bibliométrica, uma revisão sistemática da literatura é feita usando ferramentas que fornecem formas otimizadas de se avaliar o estado da arte e os caminhos para os quais o tema científico está sendo direcionado, por meio de uma escala temporal. Este estudo tem como principal objetivo a avaliação da evolução temporal do desenvolvimento científico-tecnológico sobre fluxo de gás metano a partir de áreas degradadas por resíduos sólidos. A análise bibliométrica é feita utilizando a base de dados Scopus e o software SciMAT, no sentido de apontar a inserção de questões específicas sobre fluxo de metano, dentro de um cenário macro de abordagem de emissões a partir de aterros sanitários e/ou lixões. Importantes indicadores bibliométricos foram obtidos com esta análise. Identificou-se a aparição da abordagem sobre fluxo de metano entre os anos de 2005 a 2015, como um tema representativo e emergente da época. A partir de 2016, um escopo ambiental é abordado na tratativa da questão específica do fluxo de metano, apontando que a evolução tecnológica sobre o fluxo deste gás, nos quatro últimos anos, tem sido tratada dentro de um contexto de impactos ambientais.

5.4 – CONTRIBUIÇÕES E IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

O objetivo geral do projeto, foi direcionado para a análise de tecnologias de remediação ambiental para áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos a partir de desenvolvimento de um Sistema Híbrido de fontes de geração de energia que consiste na geração de eletricidade primária por fontes alternativas integradas a sistemas de recuperação energética do tipo Waste to Energy (WtE).

Contemplando ainda em suas metas: *O desenvolvimento de conhecimento associado à produção de energia com sistemas híbridos aplicados à remediação de áreas degradadas por resíduos sólidos.*

O projeto incluiu a questão ambiental no componente da Fase 6, cujo o escopo proposto foi:

*Identificar os possíveis **impactos ambientais das futuras intervenções**, considerando principalmente as plantas de geração de energia (resíduos sólidos urbanos, fotovoltaica e heliotérmica)*

Portanto, a questão ambiental, expressa na proposta do projeto, teve como objetivo analisar os impactos ambientais decorrente da instalação de fontes de geração de energia especificamente na área já degradada do aterro controlado do Jockey Clube de Brasília.

Entretanto, ao longo da realização das pesquisas, objetivando primordialmente o levantamento do potencial energético da área, foi possível quantificar diversos parâmetros que vão permitir ações próprias de remediação da área degradada, antes de que se possa iniciar a construção dos empreendimentos de geração visualizados.

Neste sentido, pode-se apresentar a questão ambiental em duas situações:

- Situação atual – apresentar metodologia utilizada e os resultados dos estudos realizados na área degradada que podem fornecer subsídios para as iniciativas de remediação da área, o que se constituiria no legado do projeto RAEESA para a questão ambiental da área existente.
- Situação Futura – apresentar e analisar os possíveis impactos ambientais positivos e negativos decorrentes da implantação futura de fontes de geração na área degradada

5.4.1 – Situação atual

As abordagens metodológicas associadas ao projeto direcionadas para a componente ambiental, que podem fornecer subsídios para a situação atual da área degradada foram:

a) Estabelecimento de volume de material aterrado:

O levantamento topográfico do maciço do aterro foi elaborado com base em diferentes metodologias, associadas ao trabalho de campo e ao processamento de dados geofísicos e geotécnicos. Inicialmente a reconstrução digital de terreno foi realizada através de sobrevoo de drone e com medições topográficas locais e imagens de satélite. Em uma segunda campanha de campo, um levantamento de subsolo via eletro resistência foi executado, onde um processamento final de informações encontra-se em fase (mapeamento 3D e confirmação por sondagens). O volume total do aterro é necessário para estabelecer uma estimativa final dos impactos positivos da mitigação através da mineração do lixo, bem como é um componente fundamental para a confirmação de recursos associados ao gás de aterro. Esses dados foram complementados e calibrados com dados da base do SLU que se encontram incompletos. Na atualidade, o projeto dispõe de uma informação indireta confiável sobre o volume total do maciço. Para a calibração dos dados geofísicos e determinação de teor de carbono orgânico na parte do maciço central foram executadas 02 sondagens atravessando toda a espessura do resíduo aterrado.

b) Sondagens de campo para os indicadores bioquímicos do lixiviado:

No presente projeto duas abordagens de sondagem do lixiviado foram executadas. Inicialmente uma avaliação de indicadores ambientais nos drenos

de lixiviado existentes em aterro foi realizada. Isso fez parte do escopo de uma dissertação de mestrado já defendida. Em segundo momento, dez poços na região do maciço foram instalados no sentido de verificar o estado de metanogênese no meio aquoso do subsolo, principalmente, para a estimativa de formação de gás de aterro. Esta informação é muito relevante também para o estabelecimento do estágio de contaminação do lixiviado. No projeto, este dado foi utilizado como condição de contorno para a simulação final da evolução da pluma de lixiviado.

c) Estimativa de emissões de gás de aterro:

Estimativas de emissões de gás de aterro foram conduzidas por meio da medição em campo de fluxos nos poços existentes com queima de gás, bem como em câmaras de fluxo estático nas emissões fugitivas pela cobertura. Uma pesquisa correlata associada à identificação de emissões por imagens infravermelho foi conduzida no contexto de uma dissertação de mestrado. Estes dados são importantes tanto para o levantamento de recurso energético como para a estimativa de emissões na atmosfera.

d) Modelos de emissão:

Diferentes modelos matemáticos de quantificação de emissões (gás de aterro e lixiviado) foram implementados com verificações em laboratório e em campo.

Em resumo, foi apresentado a seguinte visão dos legados do projeto para com o conhecimento ambiental da área, tendo em vista a experiência acumulada ao longo dos meses de desenvolvimento de pesquisa

- Reconstrução da morfologia 3D da área de estudo, estimando massas e qualificando a estrutura de subsolo. Nota-se que o aterro JCB foi fechado em 2018 e nenhum estudo mais abrangente havia sido, então, consolidado, envolvendo técnicas geotécnicas e geofísicas modernas. Os estudos ambientais contarão com um mapeamento digital inédito para continuidade de estudos futuros e tomada de decisão ambiental;
- Estimativa de fluxo de gás de aterro pela cobertura e pelos queimadores no maciço, corrigindo modelos de decaimento propostos na literatura;
- Estabelecimento de informações preliminares sobre contaminação de solo, disponibilizando uma infraestrutura de poços de monitoramento para acompanhamento de indicadores ambientais de contaminação. Uma atualização do conhecimento da evolução da contaminação através de simulação da pluma de água de subsolo será concluída, e utilizará como condições de contorno os dados de sondagem preliminar efetuado pelo projeto;
- Estimativa de impactos positivos sobre a redução de emissões gases de efeito estufa, através do uso do gás metano para conversão de energia;
- Estimativa de benefícios ambientais através da mitigação de processos associados ao aproveitamento energético, em particular da mineração de resíduos sólidos aterrados e do processamento térmico de chorume

utilizando rejeito energético de motores de combustão interna ou do uso da energia solar heliotérmica.

É importante ressaltar que embora o projeto RAEESA não tenha tido seu foco na questão ambiental, a integração com o tema permitiu apresentar alguns resultados que contribuem de forma relevante para a gestão ambiental da área do aterro JCB. Lembrando que no começo do projeto, as informações ambientais atualizadas no momento do fechamento da área para resíduos domésticos eram praticamente inexistentes. O projeto contribuiu com aspectos inéditos e conjunto de informações relevantes nesse componente.

Referência

- **Nota Técnica - Legado Ambiental do Projeto RAEESA.** (Antonio C.P. Brasil Junior)

Resumo

O objetivo da presente nota técnica é de esclarecer e qualificar os legados do Projeto CEB-RAEESA em seu componente ambiental. Ressalta-se aqui os pontos de desenvolvimento de conhecimento e do diálogo entre a temática central (sobre o aproveitamento energético) com os benefícios de impactos positivos associados à mitigação ambiental das áreas de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos encerrados. Para isso, a presente nota parte da proposta original e de uma consolidação sistêmica proposta para o desenvolvimento do projeto de P&D.

5.4.2 – Situação futura

Os estudos de impactos ambientais foram baseados na avaliação do empreendimento (ACJ) de acordo com cada tipo de unidade de aproveitamento energético que será possivelmente executada, dividido, assim, as análises em 3 partes, que são: energia fotovoltaica; energia proveniente do aproveitamento do biogás e energia proveniente da mineração de resíduos sólidos urbanos. Fazendo-se inicialmente a descrição de cada tecnologia baseada nas informações presentes na literatura para posteriormente avaliar o impacto de cada construção.

A metodologia empregada na Avaliação dos Impactos Ambientais Diretos de cada unidade foi a Matriz de Checklist, que constitui um levantamento dos potenciais impactos aos meios físico, biótico e socioeconômico com base em informações presentes na literatura. Por esta metodologia foram analisadas as fases de construção, operação e fechamento das usinas energéticas. Além disso, os impactos diretos foram classificados de acordo com sua duração (curta, longa ou permanente); sua abrangência (pontual, local ou regional); sua magnitude (baixa, média ou alta) e conforme a contribuição para o local (positiva ou negativa). A ponderação e a legenda empregadas para classificar cada impacto ambiental podem ser vistas nas tabelas abaixo.

LEGENDA
Impactos negativos
Impactos positivos
Duração

Abrangência
Magnitude

PESOS			
	Duração	Abrangência	Magnitude
0	Curta	Pontual	Baixa
1	Longa	Local	Média
2	Permanente	Regional	Alta

Já os impactos indiretos foram avaliados com uso da metodologia de rede de impactos, que associa cada impacto direto aos efeitos desencadeados por eles, estabelecendo uma relação de causa-consequência entre os impactos diretos e indiretos.

E neste contexto, procurou-se ampliar o conhecimento científico e prático, para cada uma das fontes de geração consideradas, com base nos seguintes aspectos, estabelecidos pela Aneel.

- Possibilidade de impactos ambientais (água, ar ou solo).
- Possibilidade de diversificação da matriz energética.
- Possibilidade de desenvolvimento de nova atividade socioeconômica (lazer, turismo, pesca, agricultura, etc.).
- Possibilidade de impactos na segurança ou na qualidade de vida da comunidade.

Os aspectos foram quantificados, considerando suas performances e qualificações, o grau em que os resultados impactam positivamente as dimensões social e ambiental, tendo em vista os seguintes parâmetros, igualmente pontuados pela Aneel.

- necessidade de ações regulatórias e de políticas públicas de priorização socioambiental;
- necessidade de minimização de riscos sociais e ambientais, permitindo que os mesmos sejam identificados, analisados, e, se pertinente, planos de contingência desenvolvidos;
- necessidade da aquisição de produtos e serviços sustentáveis, socialmente e ambientalmente.

a) Energia Fotovoltaica

As usinas solares atualmente licenciadas no âmbito nacional devem seguir o disposto nas diretrizes da Resolução nº 279 de 29 de junho de 2001, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), aplicável a todos os empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental. Nessa resolução, as usinas solares fotovoltaicas se enquadram na resolução como outras fontes alternativas de energia. A ausência de uma legislação específica voltada para esse tipo de empreendimento gera algumas lacunas e diferentes entendimentos no que diz respeito aos processos que precisam ser adotados. No caso do Distrito Federal, deve-se seguir o disposto pelo “Programa Brasília Solar”, regulamentado pelo Decreto nº 37717 de 19 de outubro de 2016 (Fonseca & Godoy, 2017).

b) Aproveitamento do Biogás

Dentre os impactos negativos da disposição de resíduos no solo, pode-se destacar a produção de biogás como sendo um dos principais problemas ambientais a serem solucionados. Segundo França Júnior (2008), o biogás pode ser definido como uma mistura gasosa combustível, geralmente incolor, inodoro e insolúvel em água, resultante da digestão anaeróbia de matéria orgânica através da ação de vários grupos microbianos. Esse gás é proveniente da decomposição de resíduos de diversas origens (rural, urbana ou industrial), como também pode ser produzido naturalmente em pântanos, mangues, lagos e rios.

O biogás emitido nos aterros é uma mistura de gases que contém principalmente metano e dióxido de carbono, num percentual acima de 90% (WILLUMSEN, 2001). Esses gases são relacionados na literatura como responsáveis pelo efeito estufa que provoca diversas mudanças climáticas no planeta.

Nos países industrializados, a recuperação do biogás produzido em aterros tornou-se uma tecnologia comum para recuperação de energia em virtude de questões ambientais e de segurança. Cerca de 1000 aterros em todo o mundo realizam a recuperação do biogás, a maioria deles nos Estados Unidos e na Europa (WILLUMSEN, 2003).

De acordo com o Manual para aproveitamento de Biogás (2009), no Brasil, a maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos abertos que apresenta baixa eficiência quanto à destruição pela queima, cerca de 20%, sendo que o restante do gás é simplesmente emitido para atmosfera causando danos irremediáveis à sociedade. Frente a essa temática, diversos autores como Zanette (2009) e Araújo (2017) visualizam a produção de energia através do biogás, como uma forma de geração de renda e de mitigação dos impactos causados pela disposição de resíduos, bastante viável e promissora.

c) Mineração de Resíduos

A técnica de mineração de aterros sanitários consiste na extração dos resíduos sólidos aterrados para fins de remediação ambiental e reutilização da área. Entretanto, com a busca por fontes energéticas alternativas, a técnica começou a ser utilizada para fins de aproveitamento energético e produção de novos materiais de valor econômico, passando a ser denominada de “mineração aprimorada de aterros”. Existem inúmeras maneiras de realizar a mineração dos resíduos, a depender do tipo de resíduo, sua gravimetria, seu teor de finos, de metais pesados, seu volume e o local disponível para instalação. No Brasil, há uma grande escassez de estudos e projetos que tenham aplicado a mineração aprimorada de resíduos, assim como não há leis específicas de licenciamento ambiental voltadas para essa atividade. Entretanto, é notável que os riscos geotécnicos e impactos ambientais desse tipo de processo são significativos, mesmo sendo uma técnica que objetiva trazer benefícios para o meio ambiente.

Assim como a mineração tradicional a céu aberto, a mineração de resíduos engloba a extração do material, conhecida como lavra; a separação das frações de interesse; o aproveitamento do Combustível Derivado do Resíduo - CDR e o descarte dos rejeitos e das cinzas. Em relação ao plano de lavra, esse depende de fatores geomorfológicos, econômicos e estruturais. A etapa de separação ou triagem visa extrair frações de menor interesse econômico (como finos, metais e materiais de menor potencial calorífico) dos

materiais de maior valor, como, por exemplo, o plástico PET. O CDR representa o produto, de alto potencial calorífico, que será convertido em energia elétrica por meio da sua queima. Os principais materiais que serão descartados do processo de mineração são as cinzas produzidas na queima dos resíduos e os compostos separados por não apresentarem valor econômico. Esses deverão ser destinados para aterramento em aterros sanitários adequados.

Dito isso, o ACJ representa um local muito promissor para a aplicação da mineração das 45 milhões de toneladas de resíduos aterrados ao longo dos quase 70 anos de disposição. Entretanto, por ser uma atividade que envolve movimentação de material potencialmente contaminado, que libera biogás e lixiviado, maquinário pesado e a instalação de uma unidade para aproveitamento energético, envolve riscos ao meio ambiente.

O plano de lavra da mineração dos resíduos foi determinado traçando paralelos com a mineração tradicional de metais e a partir do panorama do local onde se encontra o ACJ. Foi realizada uma visita técnica em setembro de 2019 com intuito de coletar informações a respeito do planejamento e da definição do tipo de lavra comumente empregado em mineradoras a céu aberto. A proposta de plano de lavra foi delimitada como uma sugestão de cada etapa da mineração de resíduos do ACJ e do equipamento necessário, propõe-se que a operação da mineração ocorra apenas no período noturno. O número de cada equipamento dependerá do tempo previsto para exploração dos resíduos.

Poderão ser necessárias mais etapas, como de caracterização periódica dos resíduos, trituração ou outros tipos de pré-tratamento que dependerão das propriedades de cada montante extraído. Pela heterogeneidade dos resíduos dispostos (de diversas tipologias); pelo extenso tempo de disposição (que muda o estágio de degradação dos materiais) e pela escassez de informações prévias, já que não houve nenhum controle durante a operação do antigo lixão, é imperativo que haja estudos mais aprofundados do local. Ademais, o monitoramento ambiental das águas superficiais, subterrâneas, do lixiviado e atmosférica deverá ser conduzido constantemente durante e após a operação das atividades.

Dito isso, diante da proposta de plano de lavra, faz-se necessário que sejam conduzidos ensaios de caracterização dos resíduos sólidos locais, de sua gravimetria, do potencial calorífico de cada fração e a caracterização química dos potenciais contaminantes. A viabilidade do empreendimento deverá ser concluída a partir desses estudos e do benefício gerado pela produção de energia elétrica, na etapa de “Waste-to-energy” e com a venda dos recicláveis, representada por “Waste-to-material”.

- **Referência**

Relatório - Impactos Ambientais do Sistema Híbrido de Recuperação Energética (Luciano Cunha)

Resumo

O Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), apresenta um resumo dos prováveis impactos da construção e operação de fontes de energias renováveis que estão sendo analisadas para emprego no Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília (ACJ), sendo essas fontes: placas

fotovoltaicas, mineração de resíduos e exploração de gás. O documento em questão transcreve em uma linguagem acessível e objetiva o assunto, visando uma análise prévia dos impactos dessas tecnologias e um direcionamento para a construção do documento final RIMA das tecnologias a serem implantadas. Tal proposta é composta de uma descrição sucinta do local nos quais as tecnologias serão implantadas, das principais características de cada fonte de energia renovável e da indicação de seus prováveis impactos ambientais frente ao encontrado na literatura e, finalmente, as conclusões sobre a viabilidade ambiental de cada tecnologia.

Capítulo 6 – RESULTADOS FINAIS DO PROJETO

6.1 – FASES do PROJETO

Apresenta-se a seguir as Fases de desenvolvimento do projeto, com a definição dos objetivos e a indicação se os mesmos foram alcançados.

FASE 1 - Elaborar o Estado da Arte

Avaliação de tecnologias disponíveis apresentadas no mercado privado, projetos de pesquisas, teses acadêmicas e informes apresentados nos diversos seminários tanto em âmbito nacional como internacional.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes capítulos do livro:

- Capítulo 05 - Aproveitamento do recurso solar em áreas de lixões desativados – Tecnologias, Desafios e Oportunidades.
- Capítulo 06 - Processos de Conversão Termoquímicos
- Capítulo 07 - Abordagens *in situ* para o estudo do potencial de geração de biogás: modelos do tipo WtE pautados na utilização de ensaios em campo e em diferentes metodologias – Uma revisão do estado da arte.
- Capítulo 08 - Emissões de metano a partir de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Uma revisão bibliométrica
- Capítulo 09 - Mineração aprimorada de aterros – Uma revisão do estado da arte
- Capítulo 10 - Aplicação de investigações geofísicas e geotécnicas para a caracterização de maciços de resíduos. Uma revisão do estado da arte.

FASE 02 – Analisar os Marcos Regulatórios em Âmbito Nacional

Esta fase tem o objetivo de identificar quais os requisitos regulatórios que são exigidos pelos órgãos reguladores, analisando os possíveis impactos sobre as alternativas a serem consideradas.

O objetivo foi alcançado e documentado no seguinte capítulo do livro;

Capítulo 03

Marcos Regulatórios Relacionados à Conversão Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos.

Resumo

Neste capítulo introduz-se uma visão geral sobre os marcos regulatórios federais, estaduais e municipais, voltados para a geração até a destinação final dos resíduos sólidos urbanos. A partir deste arcabouço legal constituído de leis, decretos, normas e resoluções etc., procurou-se identificar aqueles relacionados à conversão energética dos resíduos sólidos urbanos.

FASE 03 – Formar e Manter a Base de Conhecimento

Formar a partir do Estado da Arte a árvore do conhecimento. Esta árvore constitui-se no índice para a formação da base do conhecimento sobre o assunto. Esta base será disponibilizada para os participantes do projeto, de maneira permitir o acesso e a inserção de contribuições a qualquer tempo.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios técnicos;

RELATÓRIO - fevereiro 2019

Gestão do Conhecimento - Arvore do Conhecimento (fevereiro 2019)

Tiago José de M. Cardoso

Resumo

O relatório apresenta o processo de criação da árvore do conhecimento inicial que é usada como primeira forma de organização visual do projeto, dividindo-o em áreas do conhecimento de acordo com as prioridades estabelecidas em seus objetivos. A árvore do conhecimento pode ser entendida como uma espécie de diagrama visual que estabelece desde a origem até as várias ramificações das áreas de estudo prioritárias do projeto. Dessa forma, pode-se dizer que a origem da árvore é o próprio projeto, de onde começam a surgir ramificações conforme as suas diferentes propostas. Conforme a estrutura de desenvolvimento estabelecida anteriormente na concepção do projeto RAEESA, foram divididos 4 eixos principais de onde surgem os galhos da árvore do conhecimento, por assim dizer. Dessa forma, os 4 eixos estabelecidos são geotecnia, conversão térmica, energia solar e integração.

RELATÓRIO – outubro 2019

Gestão do Conhecimento - Plataformas de Armazenamento em Nuvem

Tiago José de M. Cardoso

Resumo

O relatório expõe uma comparação entre algumas das plataformas de armazenamento em nuvem mais utilizadas no mercado. Esse tipo de serviço pode ser pensado como um espaço virtual onde é possível guardar diversos tipos de arquivos, sejam textos, vídeos ou fotos. Por meio de uma dessas plataformas, é possível ter acesso aos arquivos armazenados em qualquer lugar, desde que se tenha acesso a um computador ou mesmo um celular e conexão à internet. Inicialmente, foram apontados alguns critérios que deveriam ser atendidos pela plataforma de armazenamento em nuvem escolhida, considerando a segurança das informações armazenadas, capacidade de armazenamento, preço cobrado para a utilização do serviço, dentre outras características. Com base nos critérios elencados, são selecionados os melhores serviços disponíveis no mercado e sugerido aquele que melhor atende às condições do projeto.

RELATÓRIO – janeiro 2021

Gestão do Conhecimento – Formar e Manter a Base do Conhecimento

Tiago José de M. Cardoso

Resumo

Objetivo deste relatório é apresentar as premissas utilizadas para a seleção da plataforma computacional com capacidade de armazenar e organizar os documentos utilizados e produzidos no âmbito do projeto, oferecendo a todos os membros participantes fácil acesso ao conhecimento adquirido no decorrer do mesmo. A base de conhecimento foi desenhada a partir da formulação da árvore do conhecimento com os temas pertinentes ao projeto apresentados no estado da arte. A alimentação da base foi realizada por pesquisadores credenciados durante a execução do projeto e encontra-se disponível para consulta

FASE 04 – Caracterizar o Potencial Energético

Caracterizar todas as possibilidades energéticas da área. Identificando as possibilidades tecnológicas.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios técnicos;

RELATÓRIO - janeiro 2020

Potencial Energético do Biogás – Seção A

Luciano Cunha

Resumo

Para a definição do potencial energético do biogás do ACJC foram utilizados dados originais que foram produzidos pelo projeto e dados secundários (pré-existent). Os originais contemplam a planimetria recente, determinação de concentração de biogás, fluxo de biogás, potencial calorífico, distribuição espacial dos resíduos, espessura do maciço principal, gravimetria de material aterrado e histórico de deposição por imagens aéreas. Os dados secundários são compostos por fotografias aéreas, planimetria antiga, gravimetria e relatórios do Serviço de Limpeza Urbana (SLU).

RELATÓRIO - janeiro 2020

Potencial Energético Solar. Recursos de Energia Solar – Seção B – Parte 1

Mario B. B Siqueira, Rafael Shayani e Antonio C. P. Brasil Junior

Resumo

O presente trabalho explora os conceitos básicos e as metodologias para a estimativa de potencial de energia solar. As abordagens aqui discutidas centram-se na utilização de dados estatísticos da radiação solar obtidos pela medição em estações em solo ou por estimativas de dados por sensoriamento remoto por satélites. Estes registros de séries temporais são disponibilizados em bases de dados, que compõem um importante acervo para a avaliação energética de sistemas de conversão solar. A estimativa dos níveis de energia incidente no solo permite a modelagem da operação de usinas solares e sua consequente conversão da energia radiante em eletricidade (sistemas fotovoltaicos) ou em calor (sistemas termosolares e heliotérmicos). A abordagem para o desenvolvimento e uso de modelos de estimativas do recurso solar, complementada pelas metodologias de medição em solo de componentes global, direta e difusa da radiação incidente, são apresentadas sistematicamente no presente documento. Estudos de caso para as estimativas de recursos para a região de Brasília são discutidos.

RELATÓRIO – janeiro 2020

Potencial Energético Solar. Modelagem e Simulação de Recursos de Energia Solar – Seção B – Parte 2

Mario B. B Siqueira, Rafael Shayani e Antonio C. P. Brasil Junior

Resumo

O presente trabalho discute a formulação e implementação numérica de modelos matemáticos para a simulação do potencial de energia solar incidente em nível do solo para uma dada localidade. Os modelos desenvolvidos consideram o comportamento estatístico de séries temporais que contém registros de radiação global. A partir dos registros históricos, modelos estocásticos para irradiação diária e horária são desenvolvidos, compondo assim séries sintéticas anuais (ano solarimétrico típico) ou ainda prognósticos para tendências futuras em curto intervalo de tempo. As metodologias aqui desenvolvidas são aplicadas ao caso da cidade de Brasília-DF, proporcionando ferramentas de estimativa de recurso solar para posterior utilização em modelos de simulação de sistemas de conversão fotovoltaicos e heliotérmicos.

RELATÓRIO – janeiro 2020

Potencial Energético Solar. Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área – Seção B – Parte 3

Rafael A. Shayani

Resumo

O presente trabalho realiza uma simulação da produção de energia de um sistema fotovoltaico fixo que poderia ser instalado no Aterro. A modelagem matemática é apresentada e, com o auxílio de ferramentas computacionais MATLAB e biblioteca PVLIB do PVPMC, a produção de energia e o histograma de potência do lado de corrente contínua são calculados. A produção de energia por área é obtida, e o histograma de potência é uma informação importante para compatibilizar o sistema fotovoltaico com os demais sistemas energéticos da multi hibridização.

RELATÓRIO – janeiro 2020

Potencial Energético da Gaseificação – Seção C

Fabio C de Lisboa

Resumo

Os principais processos termoquímicos para tratar o RSU são: Gaseificação, pirólise e queima direta (combustão completa). Segundo Coelho et. al (2006), a gaseificação, combustão e pirólise podem ser diferenciadas por dois aspectos: quantidade de oxidante utilizada no processo e pelos produtos gerados. Na pirólise não ocorre a presença de oxidante, já a combustão e a gaseificação sim. Porém o primeiro com excesso e o segundo com medidas de oxidantes inferiores as estequiométricas teóricas para combustão em razão da quantidade de carbono presente nas reações. Em relação aos produtos desejados, a pirólise gera mais compostos líquidos. A combustão visa o aproveitamento de calor, gerando subprodutos gasosos, essencialmente gás carbônico (CO₂) e vapor de água. Já a gaseificação, como o próprio nome sugere, visa à obtenção de compostos gasosos com relevante poder calorífico. No o tratamento de RSU não existe apenas um processo que possa ser escolhido e usado para todo resíduo do aterro. É necessário a junção de vários processos, para que cada um extraia uma fração de interesse no resíduo e consiga-se obter um processo global sustentável e rentável, direcionando as conversões energéticas para a redução da matéria orgânica a CO₂ e H₂O. Um exemplo é o caso da combustão, quando usada isoladamente, queima-se os resíduos de forma direta e além de gerar perdas energéticas de produtos não extraídos é um processo poluidor. Atualmente, com a simbiose de mais de um processo, consegue-se compensar os pontos fracos de um com outros complementares. Considerando a grande quantidade de material depositada no aterro estudado, onde a área se encontra como um problema ambiental potencial, dada a proximidade aos mananciais de água do Distrito Federal. Estudar a destinação energética deste material e seus consequentes subprodutos, encaminha propostas de remediação ambiental da área associada a uma solução ambientalmente viável. O objetivo deste trabalho é caracterizar energeticamente o aterro da estrutural e indicar os processos térmicos que atenderiam a conversão energética.

FASE 05 – Modelar o Potencial Energético

Com base nas possibilidades identificadas na Fase 4, analisar as ferramentas computacionais para a simulação das diversas alternativas de hibridização das fontes de geração.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios técnicos;

RELATÓRIO – março 2020

Hibridização de Fontes de Geração

Sergio de Oliveira Frontin

Resumo

Para o projeto RAEESA, se visualiza a hibridização de usina fotovoltaica com usina térmica. A usina térmica utilizando como combustível a queima do gás metano e queima dos resíduos sólidos urbanos. Podendo complementarmente ser utilizada a usina heliotérmica para a produção de vapor. Para iniciar a discussão sobre o tema, a Aneel apresentou a Nota Técnica nº 051/2019-SRG-SCG-SRD-SRT/ANEEL de 17/06/2019, e posteriormente no período de 19/06 a 03/08/2019, instaurou a Consulta Pública 014/2019 visando colher subsídios para elaboração de proposta de normativo sobre o estabelecimento de usinas híbridas e/ou associadas. O relatório apresenta aspectos relacionados à hibridização de fontes de geração, com foco na aplicação no Projeto RAEESA.

RELATÓRIO – janeiro 2020

Plataforma Coralina – Sistema para Avaliação Integrada de Sistemas Híbridos para Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos

Antônio C. P. Brasil Junior

Resumo

Neste relatório apresenta-se o conceito do sistema integrado para avaliação energética, econômica e ambiental para o aproveitamento de recursos energéticos em áreas de aterro de resíduos sólidos urbanos. Trata-se de uma visão geral do sistema e de seu detalhamento com a estratégia de implementação em ambiente digital. Este sistema (Plataforma Coralina©) integra de forma quantitativa os diferentes eixos de desenvolvimento do projeto de pesquisa, e permitirá uma visão geral do potencial de geração e aproveitamento sustentável de recursos energéticos.

FASE 06 – Identificar Impactos Ambientais

Identificar os possíveis impactos ambientais das futuras intervenções, considerando principalmente as plantas de geração de energia (resíduos sólidos urbanos, fotovoltaica e heliotérmica)

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios técnicos;

RELATÓRIO – janeiro 2020

Impactos Ambientais do Sistema Híbrido de Recuperação Energética

Luciano Cunha

Resumo

O Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), apresenta um resumo dos prováveis impactos da construção e operação de fontes de energias renováveis que estão sendo analisadas para emprego no Aterro Controlado do Jôquei Clube de Brasília (ACJ), sendo essas fontes: placas fotovoltaicas, mineração de resíduos e exploração de gás. O documento em questão transcreve em uma linguagem acessível e objetiva o assunto, visando uma análise prévia dos impactos dessas tecnologias e um direcionamento para a construção do documento final RIMA das tecnologias a serem implantadas. Tal proposta é composta de uma descrição sucinta do local nos quais as tecnologias serão implantadas, das principais características de cada fonte de energia renovável e da indicação de seus prováveis impactos ambientais frente ao encontrado na literatura e, finalmente, as conclusões sobre a viabilidade ambiental de cada tecnologia.

RELATÓRIO – junho 2020

Legado Ambiental do Projeto RAEESA.

Antonio C.P. Brasil Junior

Resumo

O objetivo da presente nota técnica é de esclarecer e qualificar os legados do Projeto CEB-RAEESA em seu componente ambiental. Ressalta-se aqui os pontos de desenvolvimento de conhecimento e do diálogo entre a temática central (sobre o aproveitamento energético) com os benefícios de impactos positivos associados à mitigação ambiental das áreas de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos encerrados. Para isso, a presente nota parte da proposta original e de uma consolidação sistêmica proposta para o desenvolvimento do projeto de P&D. Ressalta-se então as metodologias e resultados que serão consolidados até a data final de conclusão do projeto (prevista inicialmente para setembro de 2020).

FASE 07 – Expandir o Laboratório de Energia Ambiente

A expansão do Laboratório de Energia e Ambiente vai integrar em um espaço multi e interdisciplinar de todas as pesquisas e projetos de P&D na área de geração de energia elétrica por fontes alternativas, remediação de áreas degradadas por RSU, educação ambiental para escolas da rede pública e privada dos níveis fundamental e médio, além de atender a todos os segmentos que são o alicerce da UnB que são a graduação, pesquisa e extensão.

O objetivo foi alcançado e documentado no seguinte relatório técnico;

RELATÓRIO – janeiro 2020

Expansão de Infraestrutura do Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília

Ana Rafaela S. Miranda, Marcela Rodrigues e Antônio C. P. Brasil Junior

Resumo

O presente documento relata os investimentos de infraestrutura feitos no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Universidade de Brasília – UnB, para desenvolvimento de pesquisas científicas relacionadas ao Projeto RAEESA. Desde o ano de 2018, uma expansão em infraestrutura e materiais vem sendo feita no LEA, onde instalações como sala de pesquisadores, computadores, televisão, Laboratório de Combustão, Estação Solarimétrica e importantes equipamentos de medição têm corroborado com o desenvolvimento científico-tecnológico do Projeto RAEESA. O principal objetivo deste relatório é descrever a expansão sofrida pelo LEA em função do Projeto, de forma a transmitir a informação a cerca das evoluções que têm colaborado com o êxito de seu desenvolvimento.

FASE 8: Possibilidades de Implantação de Planta de Recuperação Energética na Área.

Com base nos resultados das Etapas I e III serão definidos os requisitos funcionais objetivando analisar as possibilidades futuras de implantação de uma planta a partir da gaseificação do resíduo remanescente já enterrado e queima do gás de aterro existente no local.

O objetivo foi alcançado e documentado no seguinte relatório técnico;

RELATÓRIO – janeiro 2021

Componente de Recuperação Energética

Luciano Soares da Cunha

Resumo

O aproveitamento energético de rejeitos descartados em aterros próximos a grandes cidades é um grande desafio que deve ser enfrentado utilizando soluções ambientalmente sustentáveis. Para isso ser efetivado, deve-se inicialmente ser elaborado um adequado esboço do componente de recuperação energética de tal forma a serem conhecidas as principais rotas tecnológicas para o aproveitamento dos rejeitos/resíduos.

FASE 9: Possibilidades de Implantação de Planta Heliotérmica na Área

Com base nas Etapas I e III serão definidos os requisitos funcionais objetivando analisar as possibilidades futuras de implantação de uma planta heliotérmica na área. Será analisada a tecnologia (torre, calha, fresnel, disco) mais adequada para a formação de um sistema híbrido com a planta térmica estabelecida na etapa 8.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios técnicos;

RELATÓRIO – março 2020

Modelo Simplificado de Estimativa de Calor absorvido em Sistema Heliotérmico

Mario Siqueira

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo simplificado de sistema heliotérmico para estimativas de total de calor fornecido a um FTC por sistemas de foco linear, a saber, Calha Parabólica ou Linear Fresnel. O modelo tem a intenção de integração a uma ferramenta de apoio à tomada de decisão de quais tecnologias são adequadas para aproveitamento energético de aterros sanitários. Para facilitar a sua utilização, o modelo foi concebido com o menor número de entradas possíveis para o cálculo. Portanto, na medida do possível, configurações típicas desses sistemas foram implementadas diretamente no modelo, deixando o usuário somente com entradas que necessitam de dados locais. Os dados de entrada que o usuário deve possuir para sua utilização são, latitude e longitude do local de interesse, valores horários de DNI (ou no mínimo GHI), velocidade do vento e temperatura ambiente para um ano meteorológico típico do local e temperaturas de entrada e saída do FTC. Os valores de temperatura de entrada e saída do FTC foram deixados a cargo do usuário para que possa estudar o uso de sistemas para aproveitamento de calor de processo. Vale ressaltar, no entanto, que para geração de energia elétrica em sistemas padrões, valores típicos já estão bem estabelecidos e ficam em torno de 290°C na entrada do laço e 395°C na saída. Por fim, o modelo foi testado para Brasília. De maneira geral pode se dizer que a tecnologia de Calha Parabólica possui uma melhor eficiência na conversão de radiação solar em energia térmica (vide Tabela 3). No entanto, o sistema Fresnel Linear, por ser um sistema mais simples, em que os espelhos são fixados em uma estrutura horizontal e tubo absorvedor é fixo possuem custos de instalações menores. Além disso, o sistema Fresnel Linear requer estruturas de fundação menos exigentes, o que pode ser relevante para implantação em áreas degradadas. Sendo assim, sua utilização não deve ser descartada numa avaliação de aproveitamento de energia solar em aterros sanitários.

RELATÓRIO – novembro 2020

Possibilidades de Implantação de Planta Heliotérmica na Área

Mario Siqueira

Resumo

O presente trabalho realiza um estudo sobre as possibilidades de instalação de sistema heliotérmico no Aterro Controlado do Jockey de Brasília, considerando a área disponível, tecnologias e arranjos. Foi verificado que o melhor aproveitamento heliotérmico seria a hibridização com outras fontes térmicas para geração de energia. Ganhos importantes de energia podem ser obtidos com a combinação de diversas fontes disponíveis em aterros. No entanto, os altos custos do sistema heliotérmico pode ser um entrave a sua instalação nestas condições.

FASE 10: Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área

Com base nas medições solarimétrica e estudos do solo serão elaborados os requisitos funcionais objetivando analisar as possibilidades futuras para a implantação de uma planta fotovoltaica na área. Será analisada a tecnologia mais adequada em termos de painéis solares e sistema de rastreamento. Será considerada a Multi hibridização com a planta térmica e planta heliotérmica estabelecida nos itens anteriores.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios técnicos;

RELATÓRIO – março 2019

Impactos da Integração de Plantas Fotovoltaicas na Rede Elétrica de Distribuição do Alimentador Gr02 da CEB

Anésio Leles Ferreira

Resumo

Os objetivos deste relatório são: i) apresentar os impactos nas tensões, perdas e pico de demanda decorrentes da integração de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) na rede elétrica de distribuição de média tensão (MT) do alimentador GR02 da CEB, e ainda, ii) identificar a sua capacidade de hospedagem. Cabe destacar que este alimentador abastece as unidades consumidoras do Guará e da Estrutural, região onde localiza-se o antigo lixão do Distrito Federal. A capacidade de hospedagem (Hosting Capacity) de um determinado alimentador corresponde à máxima potência de GDFV que se pode instalar sem que haja violações de alguns limites pré-estabelecidos. Neste estudo, quando da identificação da capacidade de hospedagem do citado alimentador, são abordadas as seguintes grandezas: capacidade térmica dos condutores, sobretensão, desequilíbrio de tensão (VUF) e sobrecarga do transformador.

RELATÓRIO – junho 2019

Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área - Fase 10 (Relatório Parcial)

Rafael A. Shayani

Resumo

O presente trabalho realiza uma simulação da produção de energia de um sistema fotovoltaico fixo que poderia ser instalado no Aterro. A modelagem matemática é apresentada e, com o auxílio de ferramentas computacionais MATLAB e biblioteca PVLIB do PVPMC, a produção de energia e o histograma de potência do lado de corrente contínua são calculados. A produção de energia por área é obtida, e o histograma de potência é uma informação importante para compatibilizar o sistema fotovoltaico com os demais sistemas energéticos da multi hibridização.

RELATÓRIO – junho 2020

Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área - Parcial

Rafael A. Shayani

Resumo

A utilização de um sistema fotovoltaico em uma usina Waste-to-Energy em aterros apresenta diversas vantagens. Pode-se citar, inicialmente, a possibilidade de sua instalação como primeiro componente energético a ser implementado, para que a produção de energia limpa no aterro comece rapidamente.

Tal característica apresenta um benefício social importante, pois contribui para mudar a visão do aterro desativado perante a sociedade, visto que rapidamente começou a produção de energia limpa.

O sistema solar fotovoltaico apresenta atrativo econômico, visto o baixo custo da energia gerada, a qual fornece recursos que podem ser reinvestidos para auxiliar na remediação da área degradada. Tal sistema necessita de elevado capital inicial para sua instalação, mas, após superada essa barreira por meio de financiamento adequado, o sistema apresenta viabilidade econômica. Além disso, um dos benefícios da geração de energia solar é a redução da emissão de gases de efeito estufa quando comparado com o gás natural, por exemplo, que é uma fonte energética de destaque na matriz energética brasileira.

RELATÓRIO – outubro 2020

Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área – Final

Rafael A. Shayani

Resumo

O presente trabalho realiza um estudo sobre as possibilidades de instalação de sistema fotovoltaico no Aterro Controlado do Jockey, considerando a área disponível, a inclinação do solo, o uso de seguidores de sol, as possibilidades de replicabilidade em outros aterros brasileiros, além de levantar aspectos econômicos e ambientais.

FASE 11: Promover Fórum de Debates

Promover apresentações por parte de fornecedores de soluções de geração através de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), fotovoltaica e Heliotérmica.

Não foi possível realizar presencialmente os fóruns de debate devido a pandemia do Covid-19. Entretanto, contatos mantidos com fornecedores de soluções e as visitas realizadas anteriormente permitiram visualizar a aplicação na prática das soluções tecnológicas em análise no projeto.

FASE 12: Visitas às instalações existentes e tecnologias inovadoras

Identificar e visitar as instalações existentes e fornecedores de soluções inovadoras pertinentes aos assuntos em pauta.

O objetivo foi alcançado e documentado nos seguintes relatórios de visitas técnicas realizadas nos meses de abril, maio e setembro de 2019, conforme resumo apresentado a seguir

**Visita técnica ao Aterro Bandeirantes (São Paulo), Usina Biogás Energia Ambiental (São Paulo) e Central de Tratamento e Valorização Ambiental - CTVA (Caieiras).
Abril 2019**

Visita realizada pelo Prof. Mario Siqueira e dois bolsistas - doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília - Ana Rafaela Sobrinho de Miranda e Hugo Mesquita, com duração de três dias (do dia 23/04/2019 ao dia 26/04/2019).

O Aterro Sanitários Bandeirantes, localizado no km 26 da Rodovia dos Bandeirantes, na zona norte, foi construído em 1976 e iniciou suas operações como um “lixão”, porém em 1979 foi transformado em um aterro sanitário com a principal finalidade de disposição de resíduos sólidos, particularmente lixo domiciliar.

Em maio de 2017, foi inaugurada a Central de Tratamento de Resíduos de Serviços de Saúde Marcus Silva Araújo (CTRSS), que é a maior operação desse modelo na América Latina a usar a tecnologia de autoclaves. A unidade tem a capacidade de receber e processar até duas mil toneladas de resíduos de saúde por mês. A central, localizada dentro do aterro Bandeirantes é voltada para a destinação adequada de resíduos hospitalares por tecnologia de autoclave, que expõe o lixo a um tratamento térmico, combinando temperatura, pressão, tempo de residência ou tratamento, além do contato ou penetração do vapor na massa de resíduo.

A CTVA Caieiras, localizada no município de Caieiras-SP, teve sua construção iniciada em 2000, após todo o trâmite de licenciamento ambiental ser deferido pelos órgãos responsáveis, com inauguração e início de operação em 2002. O Estudo de Impacto Ambiental (EIA), aprovado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), foi um dos últimos processos antes da emissão da Licença Prévia para início das obras.

Propriedade da Essencis, empresa do grupo Solvi, a CTVA Caieiras é uma unidade de valorização ambiental sustentável a partir de unidades de tratamento e de destinação de resíduos. As unidades de destinação são locais destinados à disposição de resíduos domiciliares e industriais.

Visita técnica a planta térmica e participação em Congresso Proteger na cidade de Hannover (Alemanha). Maio de 2019

Visita realizada pelos professores Luciano Soares da Cunha e André B. Cavalcante da faculdade de Geotecnia da Universidade de Brasília no período de 10/05 a 20/05/2019.

A viagem teve muitos ganhos técnicos para o projeto, onde foi possível:

- Conhecer de perto o gerenciamento dos resíduos sólidos com alta participação de recuperação energética nas plantas de tratamento.
- Conhecer participantes do Projeto Alemanha-Brasil PROTEGEER que tem por objetivo transferir conhecimento e experiência alemã nessa área a parceiros governamentais e universidades.
- Conhecer representantes comerciais de tecnologias alemãs para produção de CDR e outros equipamentos utilizados no processo de MTB.

Visita técnica a Terra Goyana Mineradora (TGM) Barros Alto (Goiás). Setembro de 2019

Visita realizada pelo Professor Luciano Soares Cunha e os bolsistas do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília: Camilla Turon Baran; Johanna Augusta Arend dos Santos e Mariana dos Santos Diniz, realizada no dia 13.09.2019.

O principal objetivo da visita técnica foi conhecer a fundo as etapas da mineração de bauxita para estabelecer um paralelo com a mineração de resíduos sólidos que tem sido estudada para o Aterro Controlado do Jôquei Clube. Foi escolhida a Terra Goyana Mineradora, pelas seguintes razões:

- A extração da bauxita é realizada à céu aberto;
- Não são usados explosivos, a lavra é feita apenas por retroescavadeiras;
- O solo do local é predominantemente argiloso;
- A bauxita é leve;
- O minério não se encontra a grandes profundidades e possui afloramentos de grandes extensões;

- O beneficiamento não ocorre no local;
- São gerados vários tipos de subprodutos, pela heterogeneidade do minério, que possui diferentes teores ao longo do maciço;
- O empreendimento é de grande porte.

Todos esses fatores contribuem para que a mineração de bauxita possa ser análoga à mineração de resíduos sólidos, o que facilita a aplicação das técnicas, dos equipamentos e da logística aprendidos. Em resumo, foi confirmado o grande potencial de aplicabilidade da mineração dos resíduos do ACJ, uma vez que a lavra da bauxita se assemelha em vários aspectos ao que seria executado no aterro. Ainda assim, questões como a drenagem de lixiviado, a maior umidade dos resíduos, as diferentes frações gravimétricas que deverão ser separadas e a maior quantidade de contaminante e rejeitos produzidos deverão ser analisados com maior atenção no aterro. Além disso, todas as condicionantes deverão ser custeadas para que haja viabilidade não só técnica, mas econômica também. Foram obtidos dados importantes sobre os equipamentos empregados na lavra, os custos de produção, as estratégias e as dificuldades enfrentadas pela atividade. Por fim, a visita foi de extrema importância para definição dos próximos passos para caracterização do resíduo, levantamento de custos e variáveis a serem observadas durante o planejamento da mineração do aterro.

Fase 13: Curso de Capacitação

Realizar cursos de aperfeiçoamento sobre os temas em pauta neste projeto.

Não foi possível realizar este curso durante a realização do projeto, devido a pandemia do Covid-19. Entretanto, o mesmo será programado pela Universidade de Brasília e ofertado para os técnicos das empresas patrocinadoras e seus parceiros. Será considerado a programa previamente acordada conforme apresentado a seguir:

Curso de capacitação modular – Energia & Ambiente.

Objetivo: fornecer uma visão sistêmica e integrada dos modernos conceitos de produção de energia atualmente indissociados aos conceitos meio ambiente, bem como um aprofundamento em áreas de conhecimento que interessa a profissionais que possuem uma graduação e/ou graduação em áreas afins.

Justificativa: devido à elevada procura por cursos de capacitação EAD e presenciais com essa integração de temas, identifica-se uma carência de cursos modulares de pós-graduação. Este curso está estruturado para fornecer uma visão abrangente para que os participantes possam continuar a exercer sua profissão de origem, mas, com uma base sólida de conhecimentos imprescindíveis para terem um bom desempenho nesta área, assim, O curso foi concebido de forma modular com a experiência de profissionais com grande experiência acadêmica e prática.

Perfil dos estudantes: com proposta inovadora este curso destina-se a profissionais com uma grande diversidade de formação profissional que contemplam as áreas de: engenharias, direito, geociências, economia e ciências ambientais.

Organização: o programa do curso está organizado em 12 módulos independentes com carga horária individual de 30h, totalizando 360h. Esse curso com uma carga horária total de 360h, acrescido da obrigação de elaboração e defesa pública de uma monografia, poderá tramitar internamente na UnB ao longo de 2021, como uma proposta de um Curso de Pós-Graduação Lato Sensu (Curso de Especialização). O curso contempla a seguinte estrutura curricular:

Tabela - Estrutura Curricular – Componente Curricular/Carga Horária

	Módulo	Carga Horária (h)	Professor
01	Módulo I– Energia e Sociedade.	30	Antonio C. P. Brasil Júnior
02	Módulo II – Hidroeletricidade.	30	Antonio C. P. Brasil Júnior
03	Módulo III – Energia Solar.	30	Rafael Amaral Shayani
04	Módulo IV - Energia Eólica.	30	Mario B. B. Siqueira
05	Módulo V - Recuperação energética de resíduos sólidos.	30	Carlos Gurgel Veras
06	Módulo VI - Biomassa e biocombustível.	30	Augusto C. M. Brasil
07	Módulo VII - Aspectos econômicos de sistemas energéticos.	30	Ivan Camargo
08	Módulo IX - O sistema elétrico brasileiro e sua regulação.	30	Sergio Frontin
09	Módulo X - Eficiência energética.	30	Loana Nunes Velasco
10	Módulo XI - Aspectos Ambientais de sistemas energéticos.	30	Antonio C. P. Brasil Júnior
11	Módulo XII – Revisão Sistemática de Literatura.	30	Luciano Soares da Cunha
12	Módulo XIII – Seminários.	30	Antonio C. P. Brasil Júnior
Total		360	

Fase 14: Seminário

Preparar e realizar um seminário antes da finalização do relatório final de maneira a poder incorporar outras possíveis contribuições e transferência de conhecimento. Este seminário deverá ser feito com os pesquisadores envolvidos no Projeto e analisada a possibilidade de participação dos técnicos internacionais especialistas no assunto.

Atividade que não foi possível realizar devido a pandemia do Covid-19. Mas será contemplada no curso de capacitação indicado para a fase 13.

Fase 15: Elaborar Relatório Final – Publicação do livro

Consolidar os relatórios parciais elaborados nas etapas anteriores. Apresentar sugestões de alternativas tecnológicas para a remediação do caso exemplo (Lixão estrutural), considerando os aspectos de meio ambiente e a hibridização de possíveis fontes de geração de energia.

O objetivo foi alcançado com a publicação do relatório final e livro do projeto. Com relação ao livro do projeto, apresenta-se a seguir o índice e o resumo dos capítulos

LIVRO do PROJETO

HIBRIDIZAÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ÁREAS DEGRADADAS POR RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Estudo de Caso: Aterro Controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural, Brasília-DF)

ÍNDICE

PARTE I – CONTEXTUALIZAÇÃO

Capítulo 01 - Contextualização sobre a conversão energética de resíduos sólidos urbanos

Capítulo 02 - Conceito de Hub Energético Sustentável (HUBeS) para unidades de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.

Capítulo 03 - Marcos regulatórios relacionados à conversão energética dos resíduos sólidos urbanos.

Capítulo 04 - Histórico do antigo aterro controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural, Brasília-DF)

PARTE II – ESTADO DA ARTE

Capítulo 05 - Aproveitamento do recurso solar em áreas de lixões desativados – Tecnologias, Desafios e Oportunidades.

Capítulo 06 - Processos de Conversão Termoquímicos

Capítulo 07 - Análise Bibliométrica sobre a Evolução Científica do Fluxo de Metano de Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos

Capítulo 08 - Aplicação de investigações geofísicas e geotécnicas para a caracterização de maciços de resíduos – Uma revisão do estado da arte.

PARTE III – POTENCIAL ENERGÉTICO

Capítulo 09 – Aproveitamento energético do gás metano e mineração

Capítulo 10 - Aproveitamento energético de combustíveis minerados de aterro sanitário.

Capítulo 11 - Possibilidades de aplicação de tecnologias heliotérmicas em aterros sanitários, um estudo de caso

Capítulo 12 - Potencial de geração de energia fotovoltaica em lixões no Brasil

PARTE IV – MEIO AMBIENTE

Capítulo 13 - Avaliação ambiental com isótopos estáveis de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Estudo de caso do antigo Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília.

PARTE V – VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Capítulo 14 - Implantação de sistemas energéticos híbridos em aterros encerrados.

RESUMOS DE CAPÍTULOS

PARTE I – CONTEXTUALIZAÇÃO

Capítulo 1

Contextualização sobre a conversão energética de resíduos sólidos urbanos

Neste capítulo introduz-se uma visão geral sobre as abordagens tecnológicas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos. Inicialmente, é apresentada uma discussão sobre a contextualização do problema ambiental em face dos problemas urbanos contemporâneos, ressaltando-se a construção de soluções sustentáveis e o papel do aproveitamento energético. A inserção de unidades de recuperação energética de resíduos sólidos é discutida como uma solução integrada às iniciativas de gestão ambiental que podem proporcionar sustentabilidade no ambiente de cidades.

Capítulo 2

Conceito de Hub Energético Sustentável (HUBes) para unidades de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.

O conceito de *hub* energético é explorado no presente capítulo, com ênfase em sua aplicabilidade em unidades de conversão energética de resíduos sólidos urbanos. Expande-se o conceito no sentido de proporcionar uma avaliação sistêmica mais ampla, utilizando a denominação de *Hub Energético Sustentável*. Dessa forma, pretende-se incorporar uma quantificação de benefícios dos processos de recuperação de energia em termos de indicadores de sustentabilidade.

Capítulo 3

Marcos regulatórios relacionados à conversão energética dos resíduos sólidos urbanos.

Este capítulo tem como objetivo identificar quais os requisitos regulatórios que são exigidos pelos órgãos reguladores, analisando os possíveis impactos sobre as alternativas de geração de energia elétrica. São analisados os aspectos relacionados à remediação ambiental do solo, água e ar, recuperação energética por meio de gás de aterro e resíduos sólidos urbanos, geração de energia solar fotovoltaica e heliotérmica. Neste sentido introduz-se uma visão geral sobre os marcos regulatórios federais, estaduais e municipais, voltados para a geração até a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (RSU). A partir deste arcabouço legal constituído de leis, decretos, normas e resoluções etc., procurou-se identificar aqueles relacionados à conversão energética dos resíduos sólidos urbanos.

Capítulo 4

Histórico do antigo aterro controlado do Jockey Clube (Lixão da Estrutural, Brasília-DF)

Neste capítulo é apresentado um histórico de ocupação e operação do antigo Aterro Controlado do Jockey Clube e sua situação após o fechamento em 2018. Os registros de ocupação da área são escassos com relação à deposição de resíduos, mas, como é comum em áreas de lixões, a operação ocorreu de forma não planejada ao longo das décadas. Mas, um bom registro da evolução dessa ocupação foi identificada por meio de processamento digital de imagens de satélite em alguns dos trabalhos acadêmicos desenvolvidos no Projeto Raeesa (UnB-CEB Geração SA-CEB Lajeado SA) e associado a pesquisas acadêmicas desenvolvidas anteriormente na área. A partir da década de 70, duas áreas, próximas ao Jockey Club e escolhidas informalmente, passaram a concentrar a disposição de resíduos urbanos. A área que permaneceu ativa foi utilizada irrestritamente como lixão até a metade da década de 90, passando a operar como um aterro controlado até ser encerrado no início de 2018.

PARTE II – ESTADO DA ARTE

Capítulo 5

Aproveitamento do recurso solar em áreas de lixões desativados – Tecnologias, Desafios e Oportunidades.

A geração de energia renovável por meio de sistemas solares fotovoltaicos em aterros de Resíduos Sólidos Urbanos apresenta diversas vantagens, visto que há uma complementaridade entre eles. Entretanto, considerando as características típicas de aterros, devem-se analisar as restrições que são impostas ao projeto do sistema fotovoltaico, além dos impactos que esse sistema de geração de energia pode causar no próprio aterro. As tecnologias híbridas de geração de eletricidade, com a associação de tecnologias heliotérmicas com gás de aterro e/ou Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) pode ser uma alternativa interessante para o aproveitamento do recurso energético de lixões desativados. No entanto, esse conceito, apesar da existência de instalações comerciais e de diversos artigos de hibridização na literatura comprovando a sua viabilidade, ainda necessita de estudos aplicados à utilização do contexto *WtE* (*Waste to Energy*). Novas ferramentas de análise econômica do aproveitamento do recurso energético de lixões desativados devem ser aplicadas, além do custo nivelado de energia, métrica mais utilizada para estudos de viabilidade econômica de tecnologias de geração de energia elétrica. Análises de risco, indicadores econômicos e ambientes de comercialização de eletricidade específicos da realidade brasileira devem ser considerados.

Capítulo 6

Processos de Conversão Termoquímicos

A conversão termoquímica de resíduo sólido urbano (RSU) é abordado neste capítulo mostrando as tecnologias disponíveis para esta conversão e seus mecanismos. Serão descritos os processos de queima direta (ou incineração), de pirólise e gaseificação de resíduos, buscando um cenário contemporâneo do uso destas tecnologias. Tipos diferentes de equipamentos são apresentados e técnicas de limpeza e caracterização dos gases e do próprio RSU são explorados. O texto traz ainda, uma análise da coleta de resíduos sólidos no Distrito Federal, em particular o aquele destinado ao aterro sanitário da Estrutural, já desativado. Após uma criteriosa amostragem, a caracterização do material coletado foi feita em duas estratégias: uma com o rejeito sem nenhum tratamento térmico, a fim de medir o potencial energético e outra com as frações obtidas após exposição ao calor em forno mufla.

Capítulo 7

Análise Bibliométrica sobre a Evolução Científica do Fluxo de Metano de Áreas de Disposição de Resíduos Sólidos

Emissões atmosféricas de metano (CH₄) a partir de áreas de disposição de resíduos sólidos (Solid Waste Disposal Sites - SWDS), têm sido tema de interesse sob a atual perspectiva global de impactos ambientais. Este capítulo avalia a inserção deste tema na literatura e sua evolução científica, por meio de uma revisão sistemática em escala temporal. Uma coleção de 635 artigos científicos publicados entre 1985 e 2019, obtidos pela base de dados *Scopus*, permitiu a construção dos indicadores bibliométricos com o *software SciMAT*. Os principais indicadores apontaram que, entre 1985 e 2004, a abordagem do fluxo de metano se deu inserida em um contexto macro de caracterização das áreas de disposição de resíduos (lixões, aterros controlados e aterros sanitários). A década de 2005-2015 foi marcada pela discussão sobre alternativas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos, onde o fluxo de metano começa a ser abordado dentro do cenário de redução de emissões de biogás. De 2016 a 2019, um escopo ambiental predomina a discussão sobre o fluxo de metano, apontando novas tecnologias e novos métodos de quantificação das emissões, dentro de um contexto de mitigação de impactos ambientais. Com tais apontamentos, este estudo fornece uma visão geral da evolução científica do fluxo de metano, almejando promover contribuições para o mapeamento de novas rotas tecnológicas e novas tendências a respeito do tema.

Capítulo 8

Aplicação de investigações geofísicas e geotécnicas para a caracterização de maciços de resíduos – Uma revisão do estado da arte.

Neste capítulo é apresentada uma revisão do Estado da Arte acerca da aplicação de investigações geofísicas e geotécnicas para a caracterização de maciços de resíduos. O enfoque foi dado às características destes que são determinantes para a adoção de estratégias de aproveitamento dos materiais nestes contidos ou a geração energética a partir destes. Para esse fim, ambos os métodos de investigação mostraram ampla aplicabilidade, e se caracterizam por serem complementares entre si.

PARTE III – POTENCIAL ENERGÉTICO

Capítulo 9

Aproveitamento energético do gás metano e mineração

Para o aproveitamento energético do gás metano oriundo de aterros de resíduos urbanos em usinas é necessário o tratamento do gás antes de sua conversão energética. Embora o gás de aterro seja composto majoritariamente de carbono e metano, o gás de aterro possui traços de outros compostos que podem prejudicar o ambiente e também o processo de conversão energética, além de altos teores de umidade e de dióxido de carbono. Dessa forma, é mostrado no capítulo alternativas para o pré-processamento do gás de aterro, bem como seus custos e benefícios para adequação do mesmo para processamento. Dependendo do estado do gás de aterro, diversas soluções de tratamento são possíveis ou mesmo o gás pode estar em um estado pobre (baixo teor de metano) que torne a conversão energética inviável financeiramente, a composição do biogás e o conteúdo energético também afetarão a escolha do equipamento para a utilização do biogás.

Assim como existem diversas opções para o tratamento do gás de aterro, existem diversas alternativas para o aproveitamento energético do gás. Para definir qual o modelo mais apropriado para a situação, as propriedades de biogás terão um impacto significativo na seleção de tecnologia para conversão em calor ou eletricidade. A composição do gás pode limitar ou excluir diversos tipos de tecnologias, como o custo de manutenção para motores recíprocos aumenta com o aumento da concentração de H₂S, motores a gás e microturbinas são mais resistentes aos compostos de enxofre e aos menores óxidos de nitrogênio e em células a combustível a limpeza extensiva do biogás é necessária. A opção por determinada tecnologia de conversão se dá através de estudos da composição do gás e das alternativas locais econômicas de cada processo. Seja por caldeiras, que é a maneira mais comum e simples de usar o biogás, por motor de combustão interna, cogeração CHP, motores Stirling, células de combustível, turbinas a gás ou microturbinas não há uma tecnologia claramente superior às outras em todas as situações. A diversidade das necessidades dos usuários de biogás significará que um mercado para cada tecnologia será provável.

Capítulo 10

Aproveitamento energético de combustíveis minerados de aterro sanitário

Em todo o Brasil, os aterros sanitários, aterros controlados e lixões são a principal destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos. No entanto, essa atividade do setor de saneamento, por muitos anos, foi vista meramente como uma política sem potencial de gerar lucro e produtos que poderiam ser reinseridos no mercado. Com as dificuldades enfrentadas pela escassez de recursos no setor energético, as legislações locais brasileiras que exigem o fechamento dos lixões e as políticas de conscientização de reutilização e reciclagem de resíduos, começou a se pensar no aproveitamento dos resíduos sólidos já aterrados. A proposta de utilização dos resíduos para geração de energia elétrica e extração de materiais de valor agregado contribui para a Economia Circular e constitui um grande avanço na recuperação e remediação ambiental. Esse fenômeno global já gerou na Europa, por exemplo, uma transição do setor de recursos para o uso de resíduos como a principal fonte de matéria-prima na economia, conforme proposição política do bloco econômico local.

É nesse contexto que surge a Mineração Abrangente de Aterros, conceito cujo idioma original é *Enhanced Landfill Mining* (ELFM), que objetiva maximizar a valorização dos materiais aterrados, utilizando-os para fabricação de novos materiais (WtM) e, também, para produção energética (WtE), sobretudo com os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR). Esse novo campo tem recebido grande atenção, de tal modo que, nos últimos 10 anos, observa-se um número crescente de estudos relacionados à mineração de aterros para aproveitamento energético. Por ser uma técnica recente, que envolve um sistema heterogêneo, de alto risco de impacto ambiental e de elevada complexidade, são necessários diversos estudos para a caracterização, definição da estratégia de mineração e de viabilidade econômica, de modo a estimar o potencial de aplicação da ELFM.

Capítulo 11

Possibilidades de aplicação de tecnologias heliotérmicas em aterros sanitários, um estudo de caso

No presente Capítulo é apresentado um estudo sobre as possibilidades de instalação de sistema heliotérmico em Aterros Controlados de grande porte em operação e em encerramento como

remediação ambiental de sua operação e ou desativação. Como a viabilidade de tal empreendimento é fortemente dependente do recurso solar local, algumas considerações sobre determinação de potencial solar são brevemente discutidas. A seguir, tecnologias heliotérmicas passíveis de utilização em aterros são apresentadas. Não existem atualmente instalações neste contexto. No entanto, há trabalhos na literatura explorando essa possibilidade, indicando que existe interesse na aplicação. Foi verificado que o melhor aproveitamento heliotérmico seria a hibridização com outras fontes térmicas para geração de energia. Um estudo de caso foi realizado para uma instalação heliotérmica no Jockey Club de Brasília, considerando a área disponível. Ganhos importantes de energia podem ser obtidos com a combinação de diversas fontes disponíveis em aterros. No entanto, os altos custos do sistema heliotérmico pode ser um entrave a sua instalação nestas condições.

Capítulo 12

Potencial de geração de energia fotovoltaica em lixões no Brasil

Este capítulo apresenta um estudo estimativo de potencial de geração solar fotovoltaica em lixões brasileiros. Primeiramente, foi estimada a quantidade de municípios que lançam seus resíduos em lixões ou aterros controlados no próprio município. Em seguida, foi determinada uma amostra representativa dos lixões e aterros, os quais tiveram suas áreas visualmente medidas com o auxílio do Google Earth, para que uma área média pudesse ser obtida. Determinou-se, então, a potência e a energia que um sistema fotovoltaico, ocupando diversos percentuais da área média, seria capaz de fornecer com os valores de irradiância e latitude das capitais do Brasil. Os dados foram extrapolados para as Unidades da Federação e, por fim, para o país todo.

PARTE IV – MEIO AMBIENTE

Capítulo 13

Avaliação ambiental com isótopos estáveis de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Estudo de caso do antigo Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília.

O planejamento de futuros projetos de remediação de áreas degradadas por Resíduos Sólidos Urbanos em áreas de lixões ou aterros controlados é precedido de avaliações ambientais que identifiquem qual o estágio de decomposição da matéria orgânica. Os principais problemas ambientais da deposição de Resíduos Sólidos Urbanos são o lixiviado (chorume) e a emissão de gases de efeito estufa. A composição físico-química complexa do chorume (lixiviado) e a natureza composicional dos gases emitidos está diretamente relacionada ao estágio de decomposição da matéria orgânica. A utilização conjunta de parâmetros físico-químicos convencionais, concentrações de metais pesados e íons inorgânicos dissolvidos, pH, oxigênio dissolvido (OD) deve ser incrementada por uso de traçadores isotópicos, particularmente isótopos estáveis, com o objetivo de definir com maior precisão as fontes de contaminação e, também, do estágio de estabilidade biológica de aterros. As razões isotópicas do carbono são particularmente interessantes devido à relação direta deste parâmetro com as etapas de degradação da matéria orgânica. As medições das concentrações de CO₂ e CH₄ nos queimadores indicam que a maioria da área do aterro já atingiu um estágio metanogênico. A correlação linear entre CO₂ e CH₄, bem como a proporção próxima de 1:1 para essas espécies de gás, apontam para a fermentação do CH₃COOH como o principal processo metanogênico no aterro. Dados isotópicos de amostras de lixiviado também sugerem que a maior parte do ACJC está ligado à fase metanogênica estável.

PARTE V – VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Capítulo 14

Implantação de sistemas energéticos híbridos em aterros encerrados.

Neste capítulo discute-se um arranjo operacional integrado para a remediação dos impactos ambientais de áreas de aterro associado à implantação de um sistema híbrido de geração de eletricidade, que utiliza potenciais energéticos dos resíduos sólidos associados ao aproveitamento de energia solar. Este sistema compõe assim um hub energético sustentável, que pode proporcionar benefícios amplos, no processo de recuperação de uma área de aterro fechado. Um estudo de casos para o aterro do Jockey club de Brasília é apresentado

6.2 – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

O projeto foi desenvolvido de acordo com o seguinte cronograma de execução

Etapas – ANO 1	Ano 1 (Mês 01: setembro 2019)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fase 01 – Estado da Arte.												
Fase 02 – Marcos Regulatórios												
Fase 03 – Base do Conhecimento												
Fase 04 – Caracterizar o Potencial Energético												
Fase 05 – Modelar o Potencial Energético												
Fase 06 – Identificar Impactos Ambientais												
Fase 07 – Expandir o Lab. Energia e Ambiente												
Fase 08 – Componente Recuperação Energética												
Fase 09 – Componente Heliotérmica												
Fase 10 – Componente Fotovoltaica												
Fase 11 – Fórum de Debates												
Fase 12 – Visitas												
Fase 13 – Curso de Capacitação.												

Etapas – ANO 2	Ano 2											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fase 03 – Base do Conhecimento												
Fase 04 – Caracterizar o Potencial Energético												
Fase 05 – Modelar o Potencial Energético												
Fase 06 – Identificar Impactos Ambientais												
Fase 07 – Expandir o Lab. de Energia e Ambiente												
Fase 08 – Componente Recuperação Energética												
Fase 09 – Componente Heliotérmica												
Fase 10 – Componente Fotovoltaica												
Fase 11 – Fórum de Debates												
Fase 12 – Visitas												
Fase 13 – Curso de Capacitação.												
Fase 14 – Seminário.												
Fase 15 – Livro - Relatório Final.												

Etapas - PRORROGAÇÃO 6 MESES	25 Out (1)	26 Nov (2)	27 Dez (3)	28 Jan (4)	29 Fev. (5)	30 Mar (6)
Fase 03 – Base Conhecimento						
Fase 08 – Componente Recuperação Energética						
Fase 09 – Componente Heliotérmica						
Fase 10 – Componente Fotovoltaica						
Fase 11 – Fórum de Debates						
Fase 12 - Visitas						
Fase 13 – Curso de Capacitação						
Fase 14 – Seminário						
Fase 15 – Publicação de Livro e Relatório Final						

6.3 – RECURSOS EMPREGADOS E JUSTIFICATIVAS

Os recursos do projeto foram empregados nas rubricas: Recursos Humanos, Equipamentos Permanentes, Viagens e Diárias, Serviços de Terceiros e Outros.

Em relação a rubrica de Materiais Permanente, foi dada ênfase na aquisição de equipamentos de informática e licenças de software para a expansão do Laboratório de Energia e Ambiente e equipamentos para realização de testes no Aterro do Jockey Club.

A expansão do Laboratório de Energia e Ambiente vai integrar em um espaço multi e interdisciplinar de todas as pesquisas e projetos de P&D na área de geração de energia elétrica por fontes alternativas, remediação de áreas degradadas por RSU, educação ambiental para escolas da rede pública e privada dos níveis fundamental e médio, além de atender a todos os segmentos que são o alicerce da UnB que são a graduação, pesquisa e extensão.

Neste laboratório haverá também um laboratório digital com estrutura e equipamentos compatível em atender a atual demanda de capacitação nos temas de fontes alternativas e técnicas de remediação em áreas degradadas por RSU.

Com os materiais permanentes o laboratório objetivo a instalação da plataforma de simulação (simulador virtual) para o estudo das diversas alternativas de operação dos sistemas RSU, PV e CSP com ou sem hibridização. Também está prevista a aquisição, instalação de aplicativos, calibração de equipamentos para consolidar as atividades do laboratório com vistas à ampliação da capacidade de definição da geometria 2D e 3D dos aquíferos, análises de parâmetros hidrodinâmicos, do modelamento do fluxo superficial e subterrâneo de contaminantes, além da avaliação tecnológica de técnicas de remediação.

Nessa estrutura o laboratório contará com telas que simulam o ambiente de usina e imagens de síntese para proporcionar um ambiente de virtualização e interação sistêmica. A sala será localizada no atual prédio do Laboratório de Energia e Ambiente (LEA-UnB) onde será possível contar com equipamentos e instrumentos já existentes.

A tabela a seguir apresenta os equipamentos de informática e licença de software que foram adquiridos para o Laboratório

Equipamentos de Informática	Data	Valor
------------------------------------	-------------	--------------

Três Micro computadores DELL ALL IN ONE INSPIRON 24 CORE I5 RAM 8GB HD 1TB WIND 10 HOME NS: 20L44W2	26/03/2019	15.000,00
Dois Aparelhos de Televisão SAMSUNG LED 49 polegadas ULTRA HD 4K NS: Y2VF3X5M202415E	20/03/2019	5.000,00
Impressora Multifuncional Color Epson L4150 NS: X59D130777	23/01/2019	1.085,21
Impressora Epson Tanque De Tinta 6 L1800 NS: UBGY008300	23/01/2019	3.200,00
TOTAL		24.285,21

Licenças de Software	Data	Valor
Visual ModFlow Pro Flex	02/07/2020	39.500,00
Hydro Geo Analyst	02/07/2020	59.500,00
Acquachem	02/07/2020	16.000,00
GeoModeller	02/07/2020	12.000,00
Mat Lab e Curve Fitting Toolbox	16/04/2020	6.424,46
Flir Research IR 4.0 Analysis	17/04/2020	9.220,94
TOTAL		142.645,40

Os softwares adquiridos foram utilizados no projeto, essencialmente para o desenvolvimento das seguintes aplicações:

Visual ModFlow Pro Flex: Software foi utilizado para determinação das condições de recarga/infiltração efetiva por meio da geração de um modelo de fluxo subterrâneo 3D da área e definição do quantitativo potencial de geração de lixiviado (chorume). Com essa informação foi possível conhecer o percentual desse lixiviado que poderá ser pré-tratado na planta de recuperação energética hibridizada.

Hydro Geo Analyst: Software foi utilizado para gerenciar e visualizar em ambiente 3D as informações geotécnicas obtidas durante as etapas de levantamento de campo.

GeoModeler: software de modelamento 3D de dados geofísicos. Os dados geoeletrico e sísmicos foram obtidos na área do maciço principal do Lixão da Estrutural. Esses dados modelados e integrados no Geomodeller foram exportados em um grid específico para softwares de modelamento de fluxo, por exemplo, Visual ModFlow Pro Flex. Tem interface de exportação de dados para softwares de modelamento de fluxo, por exemplo, Visual ModFlow Pro Flex.

Acquachem: software foi utilizado para o tratamento de dados físico-químicos relativos a definição do estágio de decomposição da matéria orgânica no lixão e fundamental para a caracterização do potencial energético do biogás na área do projeto.

FLIR Research IR 4.0 Analysis: Software for Research & Science proporcionou uma análise mais acurada das imagens termográficas realizadas para este fim, pois permite que quem o manipula elimine interferências externas nos resultados identificando, por exemplo, a ação de sol e vento, análise o efeito em que cada fator provoca no corpo

receptor, além de gerar relatórios de análise mais acurados que os softwares tradicionais. Traz diversas outras ferramentas como a geolocalização da imagem, a regulação da emissividade do corpo emissor, entre outros critérios técnicos.

A tabela a seguir apresenta os equipamentos que foram adquiridos para realização de testes no aterro:

Equipamentos para Teste em Campo	Data	Valor
KIT Amostrador de Água Subterrânea	01/07/2019	30.739,05
Monitor GEM 5000 de Extração de Gases NS: G505925	18/12/2018	76.014,89
TOTAL		106.753,94

Veículo	Data	Valor
FORD RANGER XLSCD 4X4, PLACA PBP 5966 CHASSI 8AFAR23N1KJ126399	24/01/2019	130.769,00
TOTAL		130.769,00

Os equipamentos adquiridos para realização de testes no aterro e um veículo, foram utilizados nas seguintes atividades:

KIT Amostrador de Água Subterrânea:

Esse equipamento foi utilizado para amostrar água subterrânea com a técnica de micropurga de forma a não interferir nas condições físico-químicas in situ. Assim, as análises de isótopos de carbono orgânico e inorgânico utilizados para definir o estágio da decomposição da matéria orgânica na área do projeto serão representativas das condições locais. Esses resultados são utilizados com os dados na definição do potencial energético associado ao biogás.

A amostragem por baixa vazão, também conhecida por low flow sampling ou micropurga, é um método utilizado para amostrar águas subterrâneas e pode ser considerado um dos meios mais seguros para analisar este recurso (NBR 15.847).

O procedimento é geralmente requerido em projetos de gestão ambiental de empresas e indústrias, tendo em vista a importância do controle de substâncias polidoras nos recursos hídricos para a preservação do meio ambiente e a manutenção da saúde do ser humano.

A coleta de amostragem por baixa vazão deve ser realizada de acordo com a norma NBR 15.847, que estabelece regras para coleta de amostras em poços de monitoramento. Esse método é o mais utilizado para o controle da qualidade de águas subterrâneas pois apresenta maior confiabilidade analítica e precisão nos resultados.

O conjunto de equipamentos utilizados, denominado no Projeto Raeesa de kit amostrador, é considerado pelas normas técnicas e periciais como a melhor maneira para coletar uma amostra representativa para análise, pois retira a água do poço de forma lenta e gradual. Entre as vantagens desse procedimento destacam-se

(<https://www.venturoanalises.com.br/amostragem-baixa-vazao>):

- Uso de bombas específicas com vazão controlada, para reduzir a agitação da água subterrânea;
- Monitoramento de alguns característicos da água (como pH, OD e condução elétrica) durante o procedimento;
- Após esses parâmetros estarem estabilizados, a água é coletada para a realização de análises.

Outros métodos de coleta menos eficientes do que a amostragem por baixa vazão podem comprometer os processos de monitoramento ambiental em casos de contaminação comprovada. Água subterrânea amostrada com a técnica de micropurga não interfere nas condições físico-químicas in situ.

Assim, as análises de isótopos de carbono orgânico e inorgânico utilizados para definir o estágio da decomposição da matéria orgânica na área do projeto serão representativas das condições físico-químicas locais.

Os resultados obtidos com os isótopos de carbono associados com os dados de concentrações do biogás são imprescindíveis para a definição do potencial energético associado ao biogás.

Para saber mais:

<https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1745-6592.2009.01222.x>

<https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1002/rcm.7957>

<https://doi.org/10.5066/F7CR5RJS>.

<https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02198.x>

J Environ Monit. 2003 Dec;5(6):896-901. doi: 10.1039/b310351j.

Monitor GEM 5000 de Extração de Gases:

Esse equipamento foi utilizado para medir concentração do biogás em campo nos queimadores de metano na área do projeto. Fundamental para determinação do potencial de geração de metano.

O Monitor GEM5000 de extração de gases de aterro para a medição de CH₄, CO₂ e O₂ é um analisador fácil de usar, projetado para auxiliar no equilíbrio do campo de gases, maximizar a produção de energia e, finalmente, maximizar o rendimento a partir da extração de CH₄. As características do equipamento incluem:

- Certificado: ATEX, IECEx, CSA, MCERTS e calibração UKAS(ISO17025)
- Mede a % de CH₄, CO₂, O₂Registra a pressão estática e diferencial
- Escolha de configurações do usuário e função de leitura de gás simples

- Calcula o fluxo de gás (m³/h) e o valor calorífico (KW ou BTU) (são necessários o dispositivo de fluxo externo e o software Gas Analyser Manager)
- Precisão de ±0.5% dos gases CH₄ e CO₂ após a calibração
- Modular e atualizável
- 3 anos de garantia
- Design robusto para a confiabilidade do mercado
- Função de registro de dados e de perfil
- Monitoramento de até 6 gases

Suas especificações gerais também incluem:

- Ajuda a equilibrar o campo de gases
- Podem ser feitos ajustes em tempo real
- Maximiza a potência de saída do local
- Fácil de ler
- Sem necessidade de auto-certificação do anemômetro
- Maximiza rendimento a partir do CH₄
- Otimização do campo de gases de aterro
- Cálculo da energia dos gases do aterro
- Estimativa da produção de 'Flare'/ motor

Como acessórios pode incluir:

- H₂ compensado por CO
- Escolha de outros gases incluindo o H₂S a 10.000ppm
- Navegador de campo / GPS
- Software Gas Analyser Manager para transferência de dados
- Dispositivos de fluxo de gases externos: anemômetro (ATEX) / tubos Pitot

Ou seja, como um dos objetivos do Projeto RAEESA incluiu a definição do potencial energético do biogás, fez-se necessário a utilização de um equipamento apto a medir a concentração do biogás em campo nos queimadores de metano na área do projeto.

Veículo Ford Ranger XLSCD 4X4:

Veículo foi utilizado durante todas as atividades de campo para acesso à área que possui cobertura de resíduos da construção civil, utilizado para transporte da equipe de campo e transporte de equipamento das pesquisas auxiliares como equipamentos de geofísica com volume e pesos expressivos, além dos tradicionais equipamentos de ensaios geotécnicos.

O lixão é a forma inadequada de dispor os resíduos sólidos urbanos sobre o solo. Sem nenhuma impermeabilização, sem sistema de drenagem de lixiviados e de gases e sem cobertura diária do lixo. Exatamente por esses motivos, acabam causando impactos à saúde pública e ao meio ambiente. É comum encontrar nos lixões vetores de doenças e outros animais. As condições in loco de desenvolvimento do projeto são precárias, insalubres e perigosas. Há um elevado número de entradas pontuais, não autorizadas, por pessoas em busca de algo de valor na área do projeto.

Em várias atividades do projeto foram previstas aquisições de dados de campo que demandam ficar horas em pontos ermos do lixão sem proteção e segurança.

Também várias dessas atividades incluíram a utilização de equipamentos que em certos momentos são de volumes acentuados, por exemplo, campânula para medição do biogás nos queimadores e em certos momentos são equipamentos de grande peso, por exemplo, o conjunto de tomografia elétrica com peso de cerca de 700 kg.

Ou seja, o veículo foi utilizado durante todas as atividades de campo para acesso à área que possui cobertura de resíduos da construção civil, utilizado para transporte da equipe de campo e transporte de equipamento das pesquisas auxiliares como equipamentos de geofísica com volume e pesos expressivos, além dos tradicionais equipamentos de ensaios geotécnicos.

6.4 – ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A Lei 12.305/2010 que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabeleceu em seu Artigo 54, o prazo de 2.08.2014, para os estados e municípios, estabeleçam planos e metas para a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, de modo evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos, até a coleta seletiva.

Neste sentido, ações de remediações devem ser consideradas e dentre elas pode-se citar a geração de energia por meio de incineração ou queima do gás de aterro. Estudos indicam que o Brasil poderia produzir um terço da energia da Usina de Itaipu com estas fontes.

Por outro lado, estudos vêm demonstrando que o investimento para a utilização desta fonte de energia é cerca de 30 a 40 % mais barata que outras fontes renováveis de energia. Por exemplo, para a implantação de uma usina de 1 MW, utilizando gás de aterro custaria R\$ 2,5 milhões contra R\$ 3,0 milhões para uma PCH, R\$ 4,5 milhões para uma usina eólica e R\$ 5,0 milhões para uma usina solar.

Caso a área total do Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília, de 180 ha, fosse uma área plana, estável e sem sombreamento, pode-se estimar um valor de 180 MW de potência fotovoltaica que poderia ser instalada na área, considerando as seguintes premissas:

- Considerando irradiância padrão de 1.000 W/m², painéis de silício cristalino de 20% de rendimento produzirão 200 W/m².
- Considerando um espaçamento entre as placas igual à própria placa, para poder transitar entre as fileiras e evitar sombreamento, a área útil para instalação dos painéis é aproximadamente metade da área total.

Entretanto tal estimativa deve ser revisada para considerar o espaço necessário pelos demais componentes da usina WtE (usinas heliotérmica, térmica a gás e a combustível derivado de resíduos) além das peculiaridades do solo, em especial nas áreas inclinadas.

Neste sentido, recomenda-se que o sistema solar fotovoltaico seja instalado, inicialmente, em uma área plana, para obter os benefícios sociais, ambientais e econômicos, e uma segunda etapa de menor porte, em área inclinada do tipo talude, para que possa gerar

experiência, a qual poderá ser utilizada em diversos aterros menores, que não disponham de grandes áreas planas disponíveis.

No caso específico do Aterro do Jockey, deve-se notar que existe uma área embargada de 300 metros de distância do Parque Nacional, representando uma área de 0,7 km² que pode ser utilizada para instalação do sistema fotovoltaico. Caso 100% desta área seja utilizada, resultaria em uma usina solar de 70 MW, considerando painéis cristalinos de 20% de eficiência. Entretanto, ao considerar um espaçamento maior entre os módulos, para questão de manutenção do solo, e uma área livre ao redor da usina, recomenda-se um sistema fotovoltaico inicial de 30 MW, ou dez módulos de 3 MW.

Os estudos de viabilidade técnica e econômica realizados para o Aterro do Jockey, considerados esta componente fotovoltaica, utilizou as seguintes premissas:

- Potência considerada: 3 MWp, composta por 7.505 painéis de 400 Wp cada e eficiência de 18,11%.
- Custo de instalação da usina: 3,66 R\$/Wp
- Investimento inicial: R\$ 10.987.320,00
- Taxa de juros de longo prazo: 6,26% aa
- Operação e Manutenção: 1% aa sob o investimento inicial
- Energia gerada no 1º ano de funcionamento: 5.348 MWh
- Degradação da energia produzida pelos painéis: 0,8% aa
- Substituição do inversor: 10º e 20º ano
- Vida útil do empreendimento: 25 anos

Considerando o método de comercialização: compensação de energia de acordo com a Resolução ANEEL 482 e tarifa de distribuição a ser compensada: 0,798 R\$/kWh (B3), os principais resultados obtidos foram:

- Valor presente líquido: R\$ 35.107.671,94
- Taxa interna de retorno: 36,6%
- Payback descontado: 3 anos

Tais resultados demonstram uma elevada atratividade do investimento. Porém ele é válido apenas para a compensação de energia. Para o caso de compra direta da energia, foi calculado o Custo Nivelado de Energia (LCOE), resultando em R\$ 219,30 R\$/MWh, o qual é um valor intermediário entre o custo da energia de hidrelétricas (R\$ 149,99 R\$/MWh) e térmicas (272,36 R\$/MWh).

De posse dos indicadores econômicos, e considerando que o sistema fotovoltaico é modular, o resultado financeiro de uma usina de 30 MW, em termos percentuais, é o mesmo de uma usina de 3 MW.

Considerando a influência dessa área para a população do DF, ao otimizar a recuperação energética com a remediação ambiental, os ganhos em tratamentos das águas, ganhos em saúde, ganhos territoriais e ganhos ambientais certamente terão ordem de grandeza de centenas de milhões de reais. Ainda mais que não foram valorados os seguintes aspectos:

- A área é degradada, não sendo adequada a residências, comércios e agricultura, por exemplo. A área é um ativo do Governo, que pode ser valorada com uma indústria de geração de energia;
- O lixo urbano é um problema de várias cidades, gerando impactos negativos no Parque Nacional e na Cidade da Estrutural.
- A localização da área é eletricamente central no Distrito Federal, contribuindo para menores perdas e maior confiabilidade na Rede de Distribuição.
- O Sistema Interligado Nacional é caracterizado por possuir os grandes centros de consumo (grandes cidades) distantes dos grandes parques geradores. Esse tipo de geração dentro de um grande centro urbano diminui as perdas nas Redes de Transmissão.

Diante destes valores e ainda considerando os benefícios decorrentes da geração e obtenção de conhecimentos que poderão ser empregados em outros empreendimentos, pode-se inferir que o investimento deste projeto de P&D se mostrou altamente compensador.

Capítulo 7 - PEDIDOS DE CESSÃO E DOAÇÃO DE BENS

7.1 – PEDIDOS de DOAÇÃO de BENS

Solicita-se que sejam doados para a Universidade de Brasília, os equipamentos de informática e licenças de softwares que foram adquiridos para a expansão do Laboratório de Energia e Ambiente e dos equipamentos que foram adquiridos para a realização de testes no Aterro do Jockey Clube, conforme descritos a seguir:

Equipamentos de Informática	Data	Valor
Três Micro computadores DELL ALL IN ONE INSPIRON 24 CORE I5 RAM 8GB HD 1TB WIND 10 HOME NS: 20L44W2	26/03/2019	15.000,00
Dois Aparelhos de Televisão SAMSUNG LED 49 polegadas ULTRA HD 4K NS: Y2VF3X5M202415E	20/03/2019	5.000,00
Impressora Multifuncional Color Epson L4150 NS: X59D130777	23/01/2019	1.085,21
Impressora Epson Tanque De Tinta 6 L1800 NS: UBGY008300	23/01/2019	3.200,00
TOTAL		24.285,21

Licenças de Software	Data	Valor
Visual ModFlow Pro Flex	02/07/2020	39.500,00
Hydro Geo Analyst	02/07/2020	59.500,00

Acquachem	02/07/2020	16.000,00
GeoModeller	02/07/2020	12.000,00
Mat Lab e Curve Fitting Toolbox	16/04/2020	6.424,46
Flir Research IR 4.0 Analysis	17/04/2020	9.220,94
TOTAL		142.645,40

Equipamentos para Teste em Campo	Data	Valor
KIT Amostrador de Água Subterrânea	01/07/2019	30.739,05
Monitor GEM 5000 de Extração de Gases NS: G505925	18/12/2018	76.014,89
TOTAL		106.753,94

7.2 – PERMANÊNCIA NO ATIVO DA CEB GERAÇÃO S.A.

O veículo abaixo discriminado, adquirido com recursos do projeto, permanecerá como bem da CEB Geração S.A.

Veículo	Data	Valor
FORD RANGER XLSCD 4X4, PLACA PBP 5966 CHASSI 8AFAR23N1KJ126399	24/01/2019	130.769,00
TOTAL		130.769,00

ANEXOS

ANEXO I – RELATÓRIOS TÉCNICOS

ANEXO 2 – TRABALHOS ACADÊMICOS

ANEXO 3 – INFORMES TÉCNICOS

ANEXO 4 – CAPÍTULOS DO LIVRO

ANEXO I – RELATÓRIOS TÉCNICOS (24)

[1] Marcos Regulatórios Relacionados a Conversão Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos. (março 2019)

Antonio C. P. Brasil Junior, Luciano Cunha e Sergio Frontin

[2] Gestão do Conhecimento - Arvore do Conhecimento (fevereiro 2019)

Tiago José de M. Cardoso

[3] Gestão do Conhecimento - Plataformas de Armazenamento em Nuvem. (outubro 2019)

Tiago José de M. Cardoso

[4] Gestão do Conhecimento – Formar e Manter a Base do Conhecimento (janeiro 2021)

Tiago José de M. Cardoso

[5] Potencial Energético do Biogás – Seção A. (janeiro 2020)

Luciano Cunha

[6] Componente de Recuperação Energética (janeiro 2021)

Luciano Soares da Cunha

[7] Potencial Energético Solar. Recursos de Energia Solar – Seção B – Parte 1. (janeiro 2020)

Mario B. B Siqueira, Rafael Shayani e Antonio C. P. Brasil Junior

[8] Potencial Energético Solar. Modelagem e Simulação de Recursos de Energia Solar – Seção B – Parte 2. (janeiro 2020)

Mario B. B Siqueira, Rafael Shayani e Antonio C. P. Brasil Junior

[9] Potencial Energético Solar. Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área – Seção B – Parte 3. (janeiro 2020)

Rafael A. Shayani

[10] Potencial Energético da Gaseificação – Seção C. (janeiro 2020)

Fabio C de Lisboa

[11] Hibridização de Fontes de Geração. (março 2020)

Sergio de Oliveira Frontin

[12] Plataforma Coralina – Sistema para Avaliação Integrada de Sistemas Híbridos para Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. (janeiro 2020)

Antônio C. P. Brasil Junior

[13] Impactos Ambientais do Sistema Híbrido de Recuperação Energética. (janeiro 2020)

Luciano Cunha

[14] Legado Ambiental do Projeto RAEESA. (junho 2020)

Antonio C.P. Brasil Junior

[15] Expansão de Infraestrutura do Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília. (janeiro 2020)

Ana Rafaela S. Miranda, Marcela Rodrigues e Antônio C. P. Brasil Junior

[16] Modelo Simplificado de Estimativa de Calor absorvido em Sistema Heliotérmico. (março 2020)

Mario Siqueira

[17] Possibilidades de Implantação de Planta Heliotérmica na Área (novembro 2020)

Mario Siqueira

[18] Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área - Fase 10 (Relatório Parcial). (junho 2019)

Rafael A. Shayani

[19] Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área. (junho 2020)

Rafael A. Shayani

[20] Possibilidades de Implantação de Planta Fotovoltaica na Área – Final (outubro 2020)

Rafael A. Shayani

[21] Impactos da Integração de Plantas Fotovoltaicas na Rede Elétrica de Distribuição do Alimentador Gr02 da CEB. (março 2019)

Anésio Leles Ferreira

[22] Visita técnica ao Aterro Bandeirantes (São Paulo), Usina Biogás Energia Ambiental (São Paulo) e Central de Tratamento e Valorização Ambiental - CTVA (Caieiras). (abril 2019)

[23] **Visita técnica a planta térmica e participação em Congresso Proteger na cidade de Hannover (Alemanha). (maio 2019)**

[24] **Visita técnica a Terra Goyana Mineradora (TGM) Barros Alto (Goiás). (setembro 2019)**

ANEXO 2 – TRABALHOS ACADÊMICOS (10)

DISSERTAÇÕES DE MESTRADO (3)

[1] Arthur Monteiro Filho.

Hibridização de Gás Confinado em Depósitos de Resíduos Sólido Urbano com Heliotérmica para Geração de Energia. O Caso do Lixão da Estrutural no DF. Janeiro 2018

[2] Mariana dos Santos Diniz

Modelagem Regional do Fluxo de Contaminantes Inorgânicos sob as Condições não Saturada e Transiente Aplicada ao Aterro Controlado do Jóquei Clube De Brasília/ DF. Julho 2019.

[3] Felipe Leite Nisiyama

Ferramenta Computacional para Avaliação de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas – Caso de Estudo: Aterro Controlado do Jóquei Clube de Brasília/ DF. Julho 2019.

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (7)

[1] Gabriel Micussi Lima Batista

Análise Técnico-Econômica De Um Sistema Fotovoltaico e de sua Hibridização com uma Usina Waste-to-Energy no Lixão da Estrutural. Dezembro 2019

[2] Gabriel Neiva Pereira (TCC2).

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica para Instalação de Usina Solar Fotovoltaica os 5 principais Aterros do Brasil. Julho 2019

[3] Ana Luísa Arduini Folster (TCC1).

Análise Técnica da Instalação de Sistemas Fotovoltaicos em Aterros. Dezembro 2019.

[4] Ana Carolina de Lima Veloso (TCC1).

Análise de Sensibilidade da Geração de Energia em Usinas Fotovoltaicas Localizadas em Aterros Brasileiros em Função do Recalque Diferencial do Solo. Dezembro 2019

[5] Camilla Turon Baran

Avaliação do Potencial de Geração de Biogás no Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília/DF. Julho 2019

[6] Maria Beatriz de Paula Macedo

Avaliação da Eficiência da Camada de Impermeabilização de Aterros Sanitários. [Distrito Federal]. Julho 2019

[7] Felipe Ribeiro de Toledo Camargo

Utilização de Aeronave Pilotada Remotamente (RPA) para Mapeamento do Aterros Controlado do Jockey Club de Brasília. Dezembro 2018

ANEXO 3 – INFORMES TÉCNICOS (10)

[1] Fabio Cordeiro de Lisboa, Carlos Alberto Gurgel Veras, Antonio Cesar P. Brasil Jr.

Estratégia de Conversão Termoquímica de Resíduos Sólidos Urbanos. 11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul

[2] Jackson Costa da Silva, Carlos Alberto Gurgel Veras, Antônio C. P. Brasil Jr.

Simulation Tools for The Assessment of Advanced Thermal Treatment of MSW – Gasification Code. 11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul

[3] Antonio C. P. Brasil Junior e Marcela Cardoso Rodrigues

Identificação de Emissões Fugitivas em Aterros por Meio de Termografia por Infravermelho. 11^o Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. 8 a 10 de Junho de 2020 – Rio Grande do Sul

[4] Mario B. Siqueira, Arthur Monteiro Filho

Analysis of a hybrid LFG-Concentrated Solar Power concept for landfill energy recover Journal of Cleaner Production – 2020

[5] Felipe Leite Nisiyama, André Luís Brasil Cavalcante, Luciano Soares da Cunha.

Desenvolvimento e Proposta de Ferramenta Computacional para Avaliações de Risco à Saúde Humana em Áreas Contaminadas. GEOCENTRO. 24 A 25 de outubro 2019. Brasília

[6] Moisés Antônio da Costa Lemos, André Luís Brasil Cavalcante, Luciano Soares da Cunha.

Abordagem analítica para obtenção de parâmetros relevantes do fluxo e transporte de gases em meio poroso não-saturado. GEOCENTRO. 24 A 25 de outubro 2019. Brasília

[7] Tais Avelar Guimarães, Luís Fernando Martins Ribeiro, Luciano Soares da Cunha, André Luís Brasil Cavalcante.

Estudo da Influência do Tempo de Agitação na Adsorção de Cromo e Magnésio em Solo Laterítico. GEOCENTRO. 24 A 25 de outubro 2019. Brasília

[8] Ana Rafaela Sobrinho de Miranda, Marcela Cardoso Rodrigues, Hugo Mesquita, Luciano Soares da Cunha, Antonio Cesar Pinho Brasil Junior
Assessment of Methane Emission Using Infrared Thermography - A Case Study In the Jockey Club Controlled Landfil. 25^o ABCM International Congress of Mechanical Engineering. 20 a 25 outubro. Uberlândia MG

[9] Maurício Simões Santanna, Priscilla Cardoso Villela, Tainara da Silva Costa
Aproveitamento Energético No Aterro Controlado do Jockey Club de Brasília Através da Hibridização de Biogás e Energia Solar Fotovoltaica.

[10] Ana Rafaela Sobrinho de Miranda Marcela Rodrigues
Emissões de Metano a Partir de Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos - Uma Revisão Bibliométrica.

ANEXO 4 – CAPÍTULOS DO LIVRO (15)

Capítulo 1

Contextualização sobre a conversão energética de resíduos sólidos urbanos.

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, Luciano Soares da Cunha e Sergio de Oliveira Frontin

Capítulo 2

Conceito de Hub Energético Sustentável (HUBeS) para unidades de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos. Hibridização de fontes de geração.

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

Capítulo 3

Marcos regulatórios relacionados ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos.

Sergio de Oliveira Frontin, Luciano Soares da Cunha e Luiz Eduardo Sá Roriz

Capítulo 4

Histórico do antigo aterro controlado do Jockey Clube de Brasília (Lixão da Estrutural, Brasília-DF).

Luciano Soares da Cunha, Welitom Rodrigues Borges e Luiz Eduardo Sá Roriz

Capítulo 5

Aproveitamento do recurso solar em áreas de lixões desativados. Tecnologias, Desafios e Oportunidades.

Ana Rafaela S. de Miranda, Anésio de Leles Ferreira Filho, Mario Benjamin Baptista Siqueira, Rafael Amaral Shayani, Sergio de Oliveira Frontin

Capítulo 6

Processos de Conversão Termoquímicos.

Fábio Cordeiro de Lisboa, Vitor Rodrigues Rossi, Marcos Paulo Ribeiro Garcia

Capítulo 7

Análise bibliométrica do fluxo de metano a partir de áreas de disposição de resíduos sólidos.

Ana Rafaela Sobrinho de Miranda, Marcela Cardoso Rodrigues

Capítulo 8

Aplicação de investigações geofísicas e geotécnicas para a caracterização de maciços de resíduos. Uma revisão do estado da arte.

Felipe Leite Nisiyama, Johanna Augusta Arend dos Santos, Welitom Rodrigues Borges,

Capítulo 9

Aproveitamento energético do gás metano e mineração.

Hugo Mesquita e Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

Capítulo 10

Aproveitamento energético de combustíveis minerados de aterro sanitário.

Carlos Alberto Gurgel Veras, Fabio Cordeiro de Lisboa

Capítulo 11.

Possibilidades de aplicação de tecnologias heliotérmicas em aterros sanitários. Um estudo de caso.

Mario Benjamin Baptista Siqueira, Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, Arthur Monteiro Filho

Capítulo 12

Potencial de geração de energia fotovoltaica em lixões no Brasil.

Ana Luísa Arduini Folster, Rafael Amaral Shayani

Capítulo 13

Avaliação ambiental com isótopos estáveis de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Estudo de caso do antigo Aterro Controlado do Jockey Clube de Brasília.

Giovanna Orletti Del Rey, Luciano Soares da Cunha, Roberto Ventura Santos, Priscila Trifiletti Crespo, Gabriela Silva Ferreira.

Capítulo 14

Implantação de sistemas energéticos híbridos em aterros encerrados.

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

Capítulo 15 - Conclusões

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, Luciano Soares da Cunha, Sergio de Oliveira Frontin

