



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

JOELIA DE SOUZA RODRIGUES

**PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM ATERROS SANITÁRIOS: OPORTUNIDADES DE
PROMOÇÃO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

FORTALEZA

2019

JOELIA DE SOUZA RODRIGUES

PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM ATERROS SANITÁRIOS: OPORTUNIDADES DE
PROMOÇÃO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energias Renováveis do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Aguiar Freire

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R613p Rodrigues, Joelia de Souza.

Painéis fotovoltaicos em aterros sanitários : oportunidades de promoção de desenvolvimento sustentável / Joelia de Souza Rodrigues. – 2019.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

1. Aterros sanitários . 2. Aterro solar. 3. Desenvolvimento limpo . 4. Energia renovável . 5. Energia solar fotovoltaica . I. Título.

CDD 621.042

JOELIA DE SOUZA RODRIGUES

PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM ATERROS SANITÁRIOS: OPORTUNIDADES DE
PROMOÇÃO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Energias
Renováveis do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheira de
Energias Renováveis.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nivaldo Aguiar Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo da minha vida, não somente nestes anos como universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Gostaria de agradecer imensamente aos meus pais, Francisca e João, e ao meu irmão Francisco Joelândio, que tanto lutaram pela minha educação e nunca me deixaram perder a fé, sempre fazendo entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Gostaria de agradecer ao Lucca, grande incentivador, parceiro e namorado querido.

Sou grato a todos os professores que contribuíram com a minha trajetória acadêmica, especialmente ao Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire, responsável pela orientação do meu projeto.

Aos professores participantes da banca examinadora Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios e Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti pelo tempo, pelas valiosas colaborações e pelas sugestões.

À Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (Nutec), nas pessoas do Eng. Raimundo Montefusco e do Me. Eng. Eptácio Nascimento Filho, por terem me acolhido como estagiário de engenharia e me apresentarem o tema cujo é abordado neste trabalho, com preciosos conselhos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, meu muito obrigada.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

RESUMO

Os Aterros Sanitários foram definidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, como a solução adequada para a destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos. Além da questão do saneamento básico, também destaca-se nos grandes centros urbanos o desafio em suprir a crescente demanda energética. As energias renováveis são uma fonte promissora de energia, em especial, a energia solar fotovoltaica, por estar bem consolidada no mercado e por possuir a característica de geração distribuída. Nesse contexto, este trabalho busca propor a instalação de plantas solares fotovoltaicas em aterros encerrados, obtendo assim uma reutilização benéfica e produtiva de áreas degradadas. A metodologia utilizada no estudo incluiu uma pesquisa bibliográfica relativa aos aspectos legais, técnicos e financeiros para um projeto de aterro solar no Brasil. Além do uso das ferramentas computacionais "*Decision Tree Tool*" e o "*System Advisor Model-SAM*", para a identificação de locais para a adequação de instalações fotovoltaicas e para mensurar o desempenho desses sistemas. Por meio de um estudo de oportunidade no estado do Ceará, a saber, no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC, avaliou-se aspectos técnicos, como o recurso solar, a cobertura final e as diferentes tecnologias fotovoltaicas, para a implantação desse sistema inovador no Brasil. Verificou-se portanto, aspectos atrativos, como o sistema de compensação de energia, 5,59KWh/m²/dia de irradiação solar média na localidade estudada, a área útil de 78,47 hectares do aterro não representa um obstáculo à instalação de um sistema fotovoltaico, redução na emissão de gases de efeito estufa e, principalmente, uma oportunidade de desenvolvimento limpo para os municípios que destinam seus resíduos no ASMOC.

Palavras-chave: Aterros Sanitários. Aterro Solar. Desenvolvimento Limpo. Energia Renovável. Energia Solar Fotovoltaica

ABSTRACT

Landfills were defined by the National Solid Waste Policy, instituted by Law N° 12.305 / 2010, as the appropriate solution for the disposal of Urban Solid Waste. In addition to the issue of basic sanitation, the challenge of meeting growing energy demand is also highlighted in large urban centers. Renewable energies are a promising source of energy, especially photovoltaic solar energy, because it is well established in the market and because it has the characteristic of distributed generation. In this context, this work seeks to propose the installation of solar photovoltaic plants in enclosed landfills, thus obtaining a beneficial and productive reuse of degraded areas. The methodology used in the study included a bibliographical research on the legal, technical and financial aspects of a solar landfill project in Brazil. In addition to the use of the "Decision TreeTool" and the "System Advisor Model-SAM" computational tools, to identify locations for the adequacy of photovoltaic installations and to measure the performance of these systems. Through an opportunity study in the state of Ceará, namely, Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC, technical aspects were evaluated, such as solar resource, final cover and different photovoltaic technologies, for the implementation of this innovative system in Brazil. There were therefore attractive aspects, such as the energy compensation system, 5.59KWh /m²/day of average solar radiation in the locality studied, the landfill area of 78,47 hectares does not represent an obstacle to the installation of a photovoltaic system, reduction of greenhouse gas emissions and, above all, an opportunity for clean development for municipalities that dispose of their waste at ASMOC.

Keywords: Landfills. Solar landfill. Clean Development. Renewable energy. Photovoltaic Solar Energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável	16
Figura 2 – Esquema de um Lixão	18
Figura 3 – Esquema de um Aterro Controlado	19
Figura 4 – Esquema de um Aterro Sanitário	19
Figura 5 – Atlas solarimétrico mundial	25
Figura 6 – Projeto conceitual de sistema fotovoltaico instalado sobre área de aterro desativada	27
Figura 7 – Recalques total e anual em RSU	30
Figura 8 – Recalque em Aterro de RSU e recalque em Aterro de RSU com sistema fotovoltaico como um sistema integrado.	31
Figura 9 – Aterro sanitário de Hickory Ridge (EUA) com cobertura de geomenbrana solar	33
Figura 10 – Sistemas de ancoragem para instalações fotovoltaicas am aterros	35
Figura 11 – Instalação de painéis solares no aterro de Pennsauken	38
Figura 12 – Vista final do Aterro de Tessman Aterro Road	39
Figura 13 – Localização do ASMOC e área de ampliação.	41
Figura 14 – Interface do programa <i>Decision Tree Tool</i> da EPA.	43
Figura 15 – Tabela de resumo de resultados do SAM e gráficos	44
Figura 16 – Interface do programa <i>Decision Tree Tool</i> da EPA.	48
Figura 17 – Irradiação solar nas localidades próximas ao ASMOC	49
Figura 18 – Caso A - Geração mensal de energia	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potenciais Desafios e Soluções em Aterros Sanitários para Instalação de Painéis Solares.	28
Tabela 2 – Alguns casos de painéis solares em Aterros Sanitários nos EUA	37
Tabela 3 – Características dos módulos FV comparados.	46
Tabela 4 – Características dos inversores analisados.	47
Tabela 5 – Definição dos Casos de Estudo	47
Tabela 6 – Critérios relativos as Questões sobre contaminação e aterro	51
Tabela 7 – Caso A - Parâmetros de rendimento e produção	53
Tabela 8 – Caso B - Parâmetros de rendimento e produção	54
Tabela 9 – Caso C - Parâmetros de rendimento e produção	55
Tabela 10 – Caso D - Parâmetros de rendimento e produção	55
Tabela 11 – Análise comparativa dos Estudos de Caso	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrelpe	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia
CCEAR	Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRESEB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
FV	Fotovoltaica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PPLRE	<i>Pennsylvania Power and Light Renewable Energy</i>
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAM	<i>System Advisor Model</i>
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos Gerais</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
1.2	Justificativa	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Aterros Sanitários Modernos	17
<i>2.1.1</i>	<i>Disposição dos Resíduos Sólidos no Brasil</i>	<i>17</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Estado da disposição dos Resíduos Sólidos no Ceará</i>	<i>19</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Normalização e Regulamentação</i>	<i>20</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Uso futuro da área</i>	<i>22</i>
2.2	Usinas Fotovoltaicas Distribuídas	23
<i>2.2.1</i>	<i>Geração Distribuída</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Normalização e Regulação</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Aterros encerrados com Usinas Fotovoltaicas Distribuídas</i>	<i>26</i>
<i>2.2.3.1</i>	<i>Considerações de Projeto</i>	<i>29</i>
<i>2.2.3.1.1</i>	<i>Recalque</i>	<i>29</i>
<i>2.2.3.1.2</i>	<i>Inclinação e estabilidade</i>	<i>30</i>
<i>2.2.3.1.3</i>	<i>Cobertura final</i>	<i>32</i>
<i>2.2.3.1.4</i>	<i>Estruturas de suporte</i>	<i>33</i>
<i>2.2.3.2</i>	<i>Aterros Solares no mundo</i>	<i>36</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS: ESTUDO DE OPORTUNIDADE NO CE- ARÁ	41
3.1	O Estudo de Caso - Arquitetura da Usina Fotovoltaica Distribuída sobre Maciço ASMOC	41
3.2	Ferramenta Computacional Árvore de Decisão (<i>Decision Tree Tool</i>) da EPA	42
3.3	Modelagem Computacional Consultiva do Sistema (<i>System Advisor Mo- del-SAM</i>) do NREL	44
<i>3.3.1</i>	<i>Configuração do Sistema</i>	<i>45</i>

3.3.2	<i>Localização</i>	45
3.3.3	<i>Escolha do Equipamento</i>	46
3.3.3.1	<i>Escolha do Módulo</i>	46
3.3.3.2	<i>Escolha do Inversor</i>	46
3.3.4	<i>Definição dos Casos de Estudo</i>	47
4	RESULTADOS	48
4.1	Análise dos resultados obtidos com a Ferramenta Computacional Árvore de Decisão (<i>Decision Tree Tool</i>) da EPA	48
4.1.1	<i>Características do Local</i>	48
4.1.2	<i>Considerações sobre o Redesenvolvimento</i>	50
4.1.3	<i>Questões sobre contaminação e Aterro</i>	51
4.1.4	<i>Avaliação Financeira</i>	52
4.2	Análise dos resultados obtidos com a Modelagem Computacional do Sistema (<i>System Advisor Model-SAM</i>) do NREL	53
4.2.1	<i>Caso A: Módulos Trina Solar 320 W e Inversor Ingeteam</i>	53
4.2.2	<i>Caso B: Módulos Solar Word 340 W e Inversor ABB</i>	54
4.2.3	<i>Caso C: Módulos Canadian Solar 320 W e Inversor SMA</i>	54
4.2.4	<i>Caso D: Módulos T-Solar Global 370 W e Inversor Sungrow</i>	54
4.2.5	<i>Análise Comparativa</i>	55
5	CONCLUSÃO	57
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da população mundial, o rápido desenvolvimento global e as crescentes demandas de conforto e mobilidade, a demanda de energia está aumentando ano após ano (TYAGI *et al.*, 2013), assim como, a constante produção de resíduos.

Como a maior parte do atual suprimento de energia mundial tem origem fóssil, o sistema energético atual contribui para o aquecimento global e aumenta a poluição do ar, o que representa uma ameaça para o meio ambiente (SOLANGI *et al.*, 2011). Assim, espera-se que as fontes de energia renováveis desempenhem um papel fundamental nas iniciativas de crescimento e desenvolvimento sustentáveis nas próximas décadas (TANSEL, 2010).

A energia Solar Fotovoltaica (FV) é por muitos países vista como a tecnologia de energia renovável mais comercial e madura (TYAGI *et al.*, 2013). O Brasil possui uma série de características naturais favoráveis ao desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica, com destaque para os altos níveis de insolação (ROSA, 2016), variando em média entre 1.200 kWh/m²/ano e 2.400 kWh/m²/ano, (EPE, 2012).

No que concerne aos resíduos, com o advento da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil em 2010, instituída pela Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), e regulamentada pelo Decreto 7.404/2010, foi estabelecida uma legislação mais moderna e direcionada para gestão dos resíduos sólidos. Essa lei aborda novos conceitos que envolvem proteção à saúde pública, qualidade ambiental sustentável e principalmente, a adequada disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Na tentativa de combinar a produção de eletricidade renovável com o uso eficiente da terra, um conceito promissor chamado de aterros solares foi desenvolvido (SAMPSON, 2009). O conceito de aterro solar refere-se a sistemas fotovoltaicos solares instalados em aterros encerrados, gerando assim eletricidade renovável e utilizando terras frequentemente consideradas inutilizáveis.

No presente trabalho é analisado o conceito de instalação de sistema solares fotovoltaicos em aterros encerrados, assim como é avaliada a viabilidade técnica da instalação de um sistema solar fotovoltaico no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado na região metropolitana de Fortaleza, Ceará, fornecendo uma avaliação do potencial existente.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivos Gerais*

Este trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo sobre os Aterros Solares instalados em áreas de encerramento de operações de Aterros Sanitários, apresentando informações técnicas sobre as características, as vantagens e os desafios deste esquema alternativo. Propôs-se também uma iniciativa inovadora para o desenvolvimento tecnológico do estado do Ceará, como uma oportunidade de promoção de desenvolvimento sustentável.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar um estudo sobre a regulamentação atual do setor elétrico brasileiro que possibilite o desenvolvimento da tecnologia de Aterros Solares;
- Avaliar as condições técnicas necessárias para a instalação de painéis solares fotovoltaicos em áreas encerradas de aterros sanitários;
- Avaliar a viabilidade da instalação de usinas solares fotovoltaicas em áreas encerradas de aterros sanitários de RSU no Estado do Ceará.

1.2 Justificativa

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável é um plano de ação para as pessoas, para o planeta, e para a prosperidade. Sendo um conjunto de desafios globais e requisitos indispensáveis para o desenvolvimento sustentável. Como mostrado na Figura 1, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável lançados nesta agenda pela Organização das Nações Unidas (ONU) têm as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. Nesse cenário, projetos que promovam o uso de energias limpas, a recuperação de áreas degradadas e ações contra as mudanças do clima surgem como ideais.

A iniciativa de Aterros Sanitários Solares constituem uma solução tecnológica que causa um impacto positivo e reforça 3 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, sendo eles:

- **Objetivo 7 - Energia Acessível e Limpa** : Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos;
- **Objetivo 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis**: Tornar as cidades e os assentamen-

tos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;

- **Objetivo 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima:** Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos.

Figura 1 – Os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável



Fonte: ONU.

Segundo o *Energy Access Outlook 2017*, 1.1 bilhão de pessoas no mundo (14% da população global), não tem acesso a energia. É importante não apenas que todas as pessoas tenham acesso a energia, mas que a energia fornecida também seja limpa e barata. Nesse sentido, é importante expandir o uso de energias renováveis na matriz energética e modernizar a tecnologia para um fornecimento mais barato e sustentável.

De acordo com a ONU, até 2030, haverá em todo mundo 41 megalópoles com mais de 10 milhões de habitantes. No entanto, a pobreza extrema muitas vezes se concentra nestes espaços urbanos e em áreas de vulnerabilidade (zonas de risco, como o entorno de lixões e aterros, além de áreas que não possuem adequada destinação de resíduos sólidos), agravando os riscos à vida. Desta forma, temas intrinsecamente relacionados à urbanização, construção de cidades sustentáveis, gestão de resíduos sólidos e saneamento, estão incluídos nas metas.

Assim, frente a relevância e aos benefícios econômicos, sociais e ambientais, a implementação de Aterros Solares reforça uma tendência global de transição energética, além de corroborar com a articulação internacional para promover o desenvolvimento sustentável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aterros Sanitários Modernos

2.1.1 *Disposição dos Resíduos Sólidos no Brasil*

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), estabelece o aterro sanitário como a solução tecnológica para disposição final adequada dos rejeitos. No entanto, na maioria dos municípios brasileiros ainda utiliza-se métodos inapropriados para a disposição final de seus rejeitos, como os conhecidos lixões.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (Abrelpe), no relatório Panorama de Resíduos Sólidos 2016, ainda existem em operação no Brasil 3.331 lixões ou aterros controlados distribuídos em todos os estados, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos na saúde.

Desta forma, torna-se interessante compreender as diferenças entre os métodos de deposição final de resíduos sólidos encontrados no Brasil e suas possíveis consequências para o meio ambiente.

Lixões são grandes áreas a céu aberto, utilizadas como depósito de lixo, sem nenhum tipo de proteção ao solo. Neles também não se encontra nenhum sistema de captação e tratamento do chorume (produto gerado pela decomposição de resíduos sólidos orgânicos) que contamina a terra e os lençóis freáticos, e do biogás (composto por CO₂, metano e vapor d'água) que polui o ar. Ambos são provenientes da decomposição do lixo. Os resíduos sólidos dispostos a céu aberto também favorecem a proliferação de transmissores de doenças, como moscas, mosquitos, baratas e ratos, os quais são vetores de doenças ao homem, tais como dengue, febre amarela, febre tifóide, cólera e outras infecções. Além dos impactos ao meio ambiente, o acúmulo de resíduos sólidos traz impactos sociais. Muitas famílias de baixa renda retiram dos lixões seu sustento, correndo riscos de se ferirem com objetos cortantes, sofrer contaminação alimentar ou contrair doenças (LEMOS, 2012).

Os aterros controlados são um intermediário entre os lixões e os aterros sanitários. Recebem cobertura de terra diariamente, diminuindo assim o impacto visual, o mau cheiro e a proliferação de animais. Alguns ainda possuem sistema de drenagem do chorume, captação e queima do biogás. Porém, mesmo realizando essas melhorias não possui a estrutura completa necessária para evitar os impactos negativos ao meio ambiente. (ALBUQUERQUE, 2012)

Os aterros sanitários são a forma mais correta para a disposição dos resíduos. A NBR 8419:1992 define aterros sanitários como:

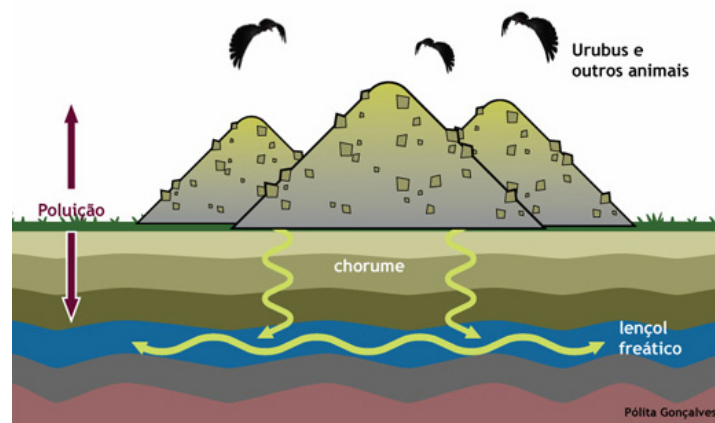
Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT NBR 8419, 1992, p. 1).

Além disso, nos aterros sanitários o terreno é impermeabilizado com argila e mantas, ainda uma drenagem e tratamento do chorume são realizados. São instaladas também tubulações para a captação do biogás que é queimado e pode ser aproveitado para gerar energia (ABNT, 1992).

No caso dos Estados Unidos, por exemplo, os regulamentos para aterros de resíduos sólidos urbanos da USEPA geralmente estabelecem que por 30 anos após o fechamento do aterro, o proprietário/operador é responsável por conduzir cuidados pós-encerramento (USEPA & NREL, 2013).

Nas ilustrações a seguir, figuras 2, 3 e 4, estão representadas algumas das diferenças entre lixões, aterros controlados e aterros sanitário.

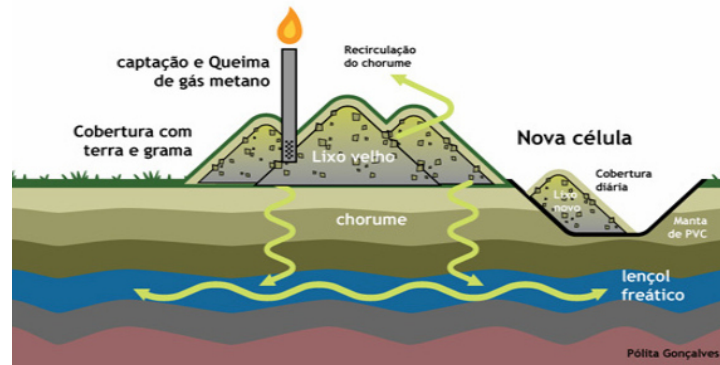
Figura 2 – Esquema de um Lixão



Fonte: Pólitá Gonçalves, Hyperverde.

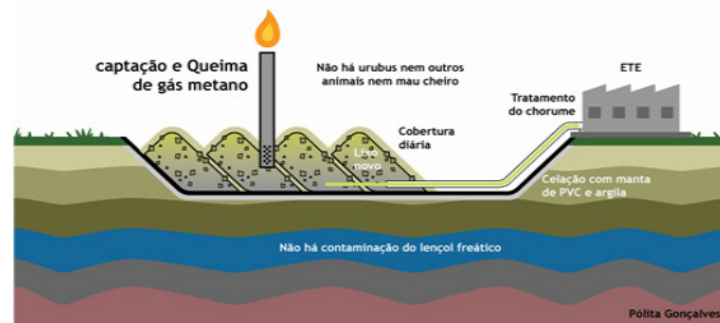
De acordo com a ABRELPE (2016) mais de 29,7 milhões de toneladas de resíduos, correspondentes a 41,6% do coletado em 2016, foram destinados para lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

Figura 3 – Esquema de um Aterro Controlado



Fonte: Pólita Gonçalves, Hyperverde.

Figura 4 – Esquema de um Aterro Sanitário



Fonte: Pólita Gonçalves, Hyperverde.

2.1.2 Estado da disposição dos Resíduos Sólidos no Ceará

Uma pesquisa realizada pela empresa GAIA ENGENHARIA AMBIENTAL LTDA em 2013, junto aos órgãos e/ou empresas responsáveis pela operação dos sistemas de manejo de resíduos sólidos nos municípios do Estado do Ceará diagnosticou a situação da coleta e destino final em todos os municípios do Estado. Segundo este levantamento, quanto à gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, destacam-se os seguintes aspectos (SEMA, 2015):

- 156 (85%) municípios destinam seus resíduos em lixões a céu aberto;
- Em 120 (65%) municípios, os pontos de eliminação de resíduos encontram-se a uma distância da área urbana, menor ou igual a um quilômetro e em 48 (26%) dos municípios, os pontos de eliminação de resíduos encontram-se a uma distância dos recursos hídricos menor ou igual a um quilômetro, o que provoca um grave risco à saúde da população;
- Falta de recursos financeiros e de recursos humanos capacitados para a gestão e operação dos serviços;
- Nenhum município faz cobrança pelos serviços;

- Faltam sistemas de coleta seletiva e unidades de triagem de resíduos recicláveis;
- Ausência de separação de resíduos perigosos.

No Estado do Ceará ainda é maioria a existência de lixões como destino final dos resíduos sólidos urbanos. Excetuam-se desta prática os seis municípios que dispõem de cinco aterros sanitários, localizados em Aquiraz, Caucaia e Maracanaú. Em Sobral e Horizonte são utilizadas áreas de disposição final com algumas características de aterro sanitário, porém sem atenderem a todas as condições necessárias de tratamento e proteção ao meio ambiente (SEMA, 2015).

Em contrapartida, a Secretaria das Cidades (SCIDADES), criada pela Lei Estadual Nº. 13.875, de 7 de fevereiro de 2007, vem associando desenvolvimento regional e saneamento básico, realizando uma série de ações para melhorar as condições ambientais e sociais dos municípios relacionadas à gestão adequada de resíduos sólidos, sendo este um dos maiores desafios para o desenvolvimento regional cearense (SCIDADES, 2018b).

A Lei Nº 13.103/2001, instituiu a Política de Resíduos Sólidos do Estado do Ceará, um incentivo à gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos, mediante a cooperação entre municípios com adoção de soluções conjuntas, em planos regionais, por meio de consórcios.

Em resumo, tem-se que dos 184 municípios existentes no estado, 168 encontram-se consorciados (143 por iniciativa do estado e 25 por iniciativa dos municípios), 6 não se associaram em consórcio por existir acordos bilaterais na região metropolitana de Fortaleza, 4 decidiram não aderir ao modelo de consórcio e 6 não puderam se consorciar (SCIDADES, 2018a).

2.1.3 Normalização e Regulamentação

Todo projeto de aterro sanitário deve ser elaborado segundo as normas preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). No caso dos aterros sanitários de resíduos não perigosos, a norma a ser seguida é a de número NBR 8.419/1992, que descreve as diretrizes técnicas dos elementos essenciais aos projetos de aterros, tais como impermeabilização da base e impermeabilização superior, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de lixiviados e de gases, exigência de células especiais para resíduos de serviços de saúde, apresentação do manual de operação do aterro e definição de qual será o uso futuro da área do aterro após o encerramento das atividades (ELK, 2007).

De acordo com a Norma NBR 8.419/1992, o projeto de um aterro sanitário deve

ser obrigatoriamente constituído das seguintes partes: memorial descritivo, memorial técnico, apresentação da estimativa de custos e do cronograma, plantas e desenhos técnicos.

A ABNT NBR 13.896/1997 (ABNT, 1997), fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas.

Assim como os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos têm normas específicas, outros tipos de aterros, como os de resíduos perigosos, também devem ser elaborados seguindo os princípios técnicos estabelecidos pelas respectivas normas (ELK, 2007). A seguir, algumas normas técnicas relativas a disposição, tratamento, transporte e classificação dos resíduos sólidos no Brasil:

- NBR 8418 - Apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos – Procedimento;
- NBR 10.157 - Apresentação de projetos de aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação ;
- NBR 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação;
- NBR 10.005 - Lixiviação de Resíduos;
- NBR 10.006 - Solubilização de Resíduos;
- NBR 10.007 - Amostragem de Resíduos;
- NBR 12.988 - Líquidos Livres - Verificação em Amostra de Resíduo;
- NBR 13.895 - Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem;
- NBR 12.235 - Armazenamento de Resíduos Sólidos Perigosos (antiga NB-1183);
- NBR 12.980 - Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos;
- NBR 11.174 - Armazenamento de Resíduos Classe II - Não Inertes e III - Inertes (antiga NB-1264);
- NBR 13.221 - Transporte de Resíduos;
- NBR 13.463 - Coleta de resíduos sólidos;
- NBR 15112 - Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas para transbordo e triagem;
- NBR 15113 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros;
- NBR 15849 - Projetos de Aterros Sanitários de Pequeno Porte - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.

Todo aterro, antes de ser implementado, deve obter as licenças exigidas pelos órgãos ambientais, municipais, estaduais ou federal. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regula, em nível nacional, o licenciamento desse tipo de atividade através das seguintes resoluções (ELK, 2007):

- Resolução CONAMA 01/1986 – define responsabilidades e critérios para a Avaliação de Impacto Ambiental e define atividades que necessitam do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), bem como do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).
- Resolução CONAMA 237/1997 – dispõe sobre o sistema de Licenciamento Ambiental, a regulamentação dos seus aspectos como estabelecidos pela Política Nacional do Meio Ambiente.
- Resolução CONAMA 404 /2008 – estabelece as diretrizes do Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte.

2.1.4 Uso futuro da área

Segundo a norma NBR 8.419/NB 843, em um projeto de aterro sanitário deve estar previsto também o reaproveitamento da área após o encerramento de suas atividades ou o final de sua vida útil. É comum, nesse tipo de área, a construção de parques de lazer para a comunidade, centros de treinamento/capacitação de trabalhadores, edificações de pequeno porte, novas urbanizações etc (ELK, 2007).

O local pode ser usado tanto para o lazer quanto para a geração de empregos e renda para a comunidade, através de atividades ambientalmente corretas. O importante é propiciar algum tipo de benefício às comunidades próximas ao aterro sanitário, que antes sofreram com a passagem dos caminhões e o cheiro dos gases (ELK, 2007).

Para construir em área de aterro sanitário, é preciso um cuidado especial. Devido à composição fortemente heterogênea dos resíduos, por maiores que tenham sido os cuidados tomados na operação, é possível a ocorrência de recalques elevados, o que pode dificultar e onerar as construções nesses locais. Um aterro sanitário pode sofrer recalques durante décadas (ELK, 2007).

Ressaltam-se também, entre as dificuldades, as mudanças das características de resistência e compressibilidade que ocorrem com a massa de resíduos, ao longo do tempo, devido aos processos de degradação química e biológica.

No planejamento para a implantação de aterros, geralmente não se tem considerado, o potencial energético destas áreas como uma das opções válidas para o uso futuro da área. Os aterros também poderiam ser aproveitados como verdadeiras fontes de energia alternativa. Um aterro sanitário poderia fornecer as seguintes fontes de energia (MACHADO, 2007):

- Compostos Orgânicos – matéria orgânica que, uma vez compostada, poderá gerar insumos para a agricultura ou cultivos vegetais diversos que por sua vez participam dos processos de armazenamentos de energia pelos vegetais, como fontes primárias na manutenção das cadeias alimentares, dentre as quais o ser humano encontra-se inserido.
- Materiais Sólidos com alto poder calorífico – Alguns materiais sólidos que não foram degradados dentro do maciço de resíduos após alguns anos de confinamento, possuem grande potencial calorífico.
- Biogás – Este é o produto de maior relevância referente ao aproveitamento do potencial energético de um aterro, pois mesmo depois de encerrado um aterro continuará produzindo gás por cerca de 30 anos.
- Aterro Solar – Requalificação da área de aterro para instalação de uma usina solar fotovoltaica, combinando a produção de eletricidade renovável com o uso eficiente da terra.

2.2 Usinas Fotovoltaicas Distribuídas

2.2.1 Geração Distribuída

Segundo a General Electric, o mundo está passando por um processo de descentralização que está impactando todas as facetas da vida e a inovação tecnológica é a força motriz por trás dessa tendência, por consequência, os sistemas de energia elétrica estão aproveitando a onda de descentralização para promover a implantação e uso de tecnologias de energia distribuída.

A geração distribuída é caracterizada pela produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras, que utilizam fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica e conectadas à rede de distribuição (ANEEL, 2016).

O conjunto atual de tecnologias de energia distribuída inclui motores alternativos movidos a gás natural e a diesel, turbinas a gás, células de combustível, painéis solares e turbinas eólicas. Eles são altamente flexíveis e adequados em diversas aplicações, incluindo energia

elétrica, energia mecânica e propulsão. Essas tecnologias são configuradas e personalizadas para atender as necessidades específicas do cliente, incluindo o fornecimento de electricidade, calor, vapor, propulsão ou potência mecânica (GE, 2014).

A ascensão da geração de energia distribuída está sendo impulsionada pelas tecnologias de energia distribuída que estão mais amplamente disponíveis, menores, mais eficientes e menos dispendiosas hoje do que há apenas uma década. Embora a tendência para descentralização da produção de energia esteja hoje crescente, essa tendência progressiva não significa o fim das centrais de energia. Uma vez que com o aumento da urbanização e o crescimento das economias emergentes, a necessidade de centrais elétricas continua contínua em muitos locais. Assim, a ascensão da energia distribuída está ocorrendo no contexto de uma continuação do desenvolvimento de produção de energia centralizada. Nesta paisagem emergente, centrais de energia e sistemas de energia distribuída serão integrados a fim de fornecer um variedade de serviços que não poderiam ser fornecidos por um só (GE, 2014).

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, dentre os quais se destacam a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada e a diversificação da matriz energética.

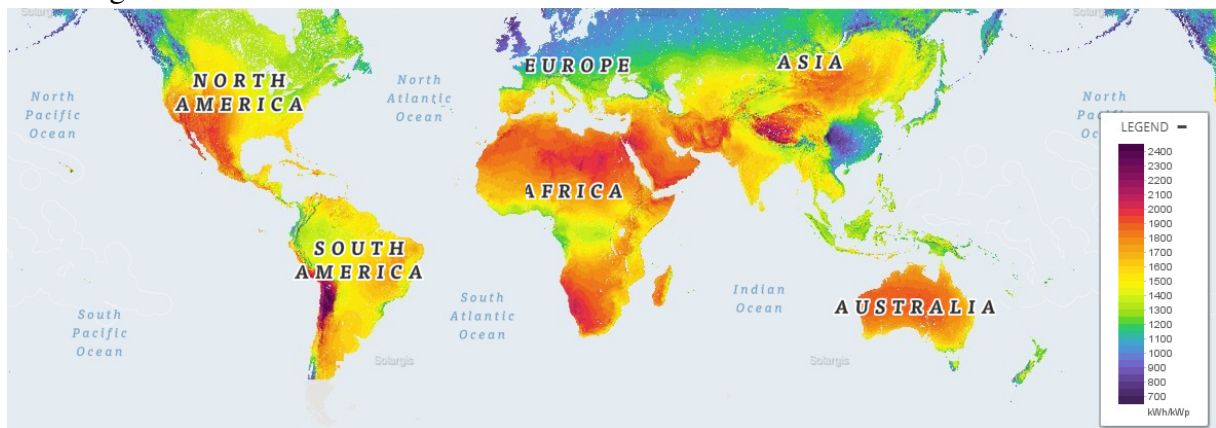
A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia que merece destaque dentro deste cenário, pois de fato, ela é freqüentemente usada na geração distribuída dada a sua capacidade de fornecer electricidade no ponto de uso (GE, 2014). Na figura 5 é ilustrado o atlas solarimétrico mundial, desenvolvido pelo Banco Mundial. Nele é possível observar em detalhes os recursos de energia solar no mundo.

2.2.2 Normalização e Regulação

A resolução 482/2012 da ANEEL foi o marco regulatório que permitiu aos consumidores realizar a troca da energia gerada com a da rede elétrica, estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

A resolução Normativa 687/2015 da ANEEL veio com o intuito de aprimorar o que foi estabelecido na resolução 482 de 2012, tornando possível ao consumidor instalar pequenas usinas geradoras, como as microturbinas eólicas, geradores de biomassa e de energia solar

Figura 5 – Atlas solarimétrico mundial



Fonte: Banco Mundial: <http://globalsolaratlas.info> (2018)

fotovoltaica (ANEEL, 2015).

A nova resolução trouxe consideráveis melhorias, sobretudo para o desenvolvimento da geração de energia solar no Brasil. De acordo com as novas regras, é considerada como microgeração a instalação de geradores com potência de até 75kW. Acima dessa potência, com valor de até 5MW, já é possível considerar como minigeração (MINAS ENERGIA, 2016).

Além disso, quando a quantidade de energia gerada for superior à quantidade de energia consumida, serão gerados créditos que poderão ser compensados pelo prazo de até 60 meses. Caso o consumidor possua uma outra instalação em seu CPF, ele poderá utilizar os créditos excedentes para compensar nessa outra unidade consumidora. Essa modalidade de compensação é denominada “autoconsumo remoto” (MINAS ENERGIA, 2016).

A ENEL, descreve outras normas de referência para geração distribuída, entre elas (ENEL, 2016):

- Resolução Normativa N° 414 - Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica (com atualização da Res.670 de 2016)
- PRODIST Módulo 3 - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição;
- ANEEL PRODIST Módulo 1 - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 1 – Introdução;
- ANEEL Portaria N° 004/2016 - Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica (com atualização das portarias 357, 271 e 17);
- Norma Técnica Coelce NT br 010 - Conexão de micro e minigeração distribuída ao sistema elétrico da Ampla/Coelce;

- Resolução Coema 03/2016 - Critérios e Procedimentos simplificados para implantação de sistemas de Micro e Mini Geração Distribuída.

2.2.3 Aterros encerrados com Usinas Fotovoltaicas Distribuídas

Aterros de RSU e outras áreas utilizadas para deposição de resíduos, como aterros industriais, aterros de entulhos de construção civil e também locais de mineração são candidatos a receberem instalações solares fotovoltaicas (USEPA & NREL, 2013).

Há uma série de benefícios quanto a instalações fotovoltaicas nas áreas de deposição de resíduos (USEPA & NREL, 2013):

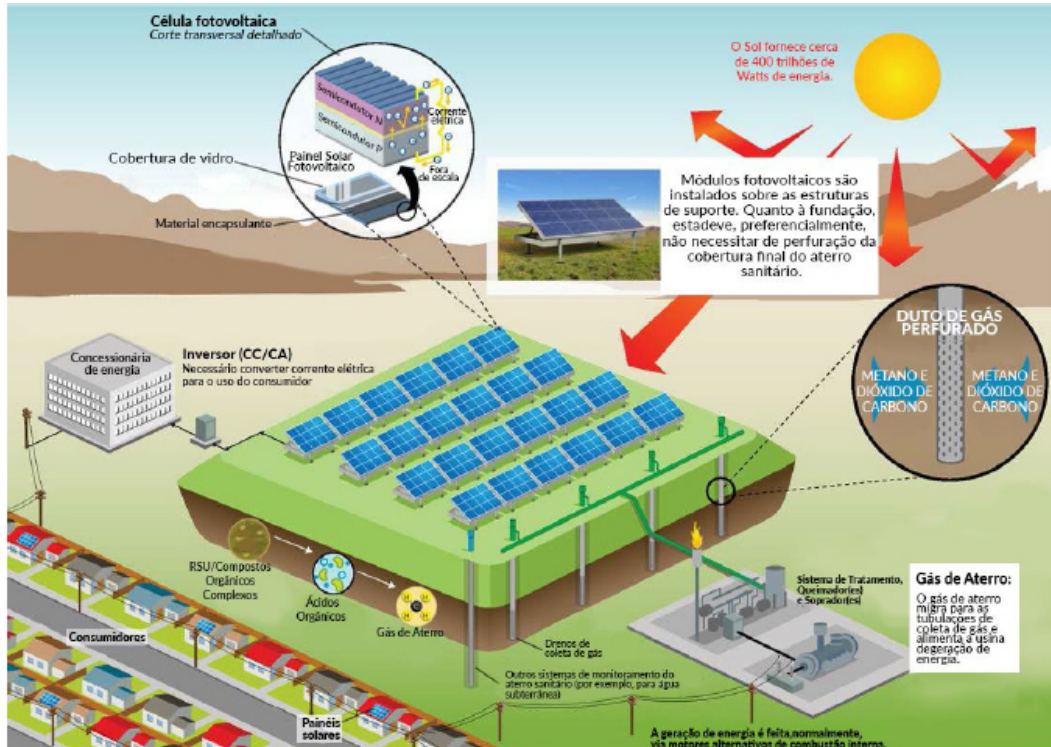
- podem fornecer um reuso economicamente viável para locais que podem apresentar custos significantes de limpeza ou baixa demanda de desenvolvimento pelos governos; podem apresentar condições ambientais que não sejam adequadas para o redensolvimento comercial ou residencial;
- podem ser desenvolvidas em locais com espaço aberto limitado, preservando a terra como sumidouro de carbono e/ou para outros serviços do ecossistema;
- geralmente estão localizadas próximas a estradas e infraestrutura de transmissão e distribuição de energia;
- podem ser adequadamente definidas como zonas para energia renovável;
- podem fornecer oportunidades de emprego em comunidades urbanas e rurais;
- podem servir como locais para avançar tecnologias limpas e tecnologias mais rentáveis;
- podem reduzir impactos ambientais de sistemas energéticos (por exemplo, reduzir emissões de gases do efeito estufa).

Algumas vantagens para instalações solares em aterros de RSU incluem ainda o fato de estarem geralmente localizados próximos a áreas com alta demanda de energia (por exemplo, grandes áreas urbanas); de serem construídos normalmente com grandes áreas de declividade baixa; de oferecerem baixos custos de terras quando comparadas a áreas abertas; e de serem capazes de receberem projetos maiores (*utility scale projects*) e de usarem de um sistema de compensação energética (*net metering*) (USEPA & NREL, 2013).

Algumas desvantagens também existem, como o fato de que pode haver restrições de legislação, problemas com recalques, restrições da cobertura final, limites de peso/carga, dificuldades no projeto do sistema, topografia e declividade e também problemas quanto à distância ao ponto de interconexão em alguns casos (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF

ENERGY RESOURCES, 2017). A figura 6 ilustra uma representação esquemática de uma instalação solar fotovoltaica em aterro sanitário fechado.

Figura 6 – Projeto conceitual de sistema fotovoltaico instalado sobre área de aterro desativada



Fonte: Modificado de PV Navigator citado por USEPA & NREL, 2013.

Para avaliar a viabilidade da instalação de painéis fotovoltaicos em aterros sanitários é aconselhável uma coleta de informações sobre o cenário geral do projeto, como as características do aterro, as tecnologias fotovoltaicas apropriadas e dos requisitos regulatórios para determinar se um projeto merece um investimento mais sério do tempo e dos recursos exigidos pela natureza do projeto. Uma visão geral dos principais fatores que impactam a viabilidade do projeto em aterros sanitários inclui a idade do aterro, área utilizável, declividade e estabilidade, cobertura final, composição dos resíduos, sistema de coleta de lixiviados e gás e sistemas de tratamento, controle de águas pluviais, recalques, controle de erosão, requisitos de manutenção do aterro, recurso solar, distância para as linhas de transmissão/distribuição e sistemas de engenharia existentes (USEPA & NREL, 2013).

Estes tipos de instalações podem ser realizadas em aterros já encerrados, ou em aterros ainda em operação, utilizando as células que se encontrem encerradas. Os painéis fotovoltaicos podem ser instalados tanto na área do topo quanto nos taludes do aterro. Quando o aterro ainda não foi encerrado, existe a oportunidade de elaborar o projeto de energia fotovoltaica como um componente integrado do projeto geral de encerramento do aterro (USEPA & NREL,

Tabela 1 – Potenciais Desafios e Soluções em Aterros Sanitários para Instalação de Painéis Solares.

Complicação	Desafios	Solução potencial	Exemplo
Encosta lateral íngreme	<ul style="list-style-type: none"> • Ancoragem de painéis solares • Águas pluviais • Erosão • Neve e vento 	<ul style="list-style-type: none"> • Lâminas FV flexíveis • Sistema solar leve que fornece fundações seguras • Re-classificação e alteração do solo 	<p>Aterro de Tessman Road</p> <p>Estudo de caso do aterro de Pennsauken</p>
Cobertura fixa em aterros sanitário	Perfuração da cobertura do aterro	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de prateleiras com balastro sem penetração no solo • Conduto acima do solo com bermas cruzamentos 	Estudo de caso do Fort Carson Army Base
Recalques	<ul style="list-style-type: none"> • Depressões • Infiltração • Fundações do sistema • Tubulação de gás e chorume • utilitários subterrâneos 	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturas fixas de montagem inclinada • Mitigação de pré-encerramento • Reforço com geogrelha • Deposição seletiva (resíduos mais anti-gos, resíduos de construção e demolição) 	<p>Aterro de Pennsauken</p> <p>Estudo de caso do aterro de Holmes Road</p>
Cargas de vento e neve	<ul style="list-style-type: none"> • Conexões do sistema • Estabilidade da fundação • Painel removido pelo vento 	<ul style="list-style-type: none"> • Painéis solares e estruturas de montagem com alta capacidade de carga mecânica 	Aterro de Milliken
Manutenção de rotina da cobertura	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento de recalques • Atividades de extração de gás • Inspeções de erosão • Gerenciamento da vegetação 	<ul style="list-style-type: none"> • Posicionamento do arranjo solar ao redor do monitoramento • Altura do painel permitindo práticas de rotina de paisagismo • Estradas de acesso permanentes existentes 	Aterro de Milliken

Fonte: PV Navigator, 2017.

2013).

Proprietários e operadores de aterros normalmente iniciam as análises com uma avaliação do local e as características do aterro, e então buscam uma tecnologia fotovoltaica compatível com suas características. Ao invés de tentar encontrar uma solução em relação à tecnologia para um aterro com atributos mais complicados, o desenvolvedor deve procurar por um local que combine com a tecnologia ou estrutura de suporte preferidas (USEPA & NREL, 2013).

A tabela 1 resume os possíveis desafios e soluções em aterros sanitários para a instalação de painéis solares. Por exemplo, o aterro da Tessman Road utilizou lâminas FV flexíveis em um declínio de 18 graus, fixadas diretamente à geomembrana exposta. O uso de um design de cobertura alternativo com os laminados flexíveis permitiu que o projeto da Tessman Road superasse algumas das complicações de engenharia de uma instalação de declive lateral íngreme (SAMPSON, 2009).

Quanto à energia gerada, seu uso no próprio aterro é de maneira geral financeiramente mais benéfica, mas os benefícios de enviar parte ou toda a energia gerada para a rede devem ser

considerados na fase de análise de viabilidade do projeto solar (TOWNSEND *et al.*, 2015) .

2.2.3.1 Considerações de Projeto

2.2.3.1.1 Recalque

Uma consideração especial ao projetar uma instalação solar em um aterro sanitário é o recalque, definido como a deformação coletiva uniforme e não uniforme do terreno, causada por alterações físico-químicas, processos bioquímicos e mecânicos, além de aplicação de cargas externas ou de seu próprio peso que alteram as propriedades dos resíduos enterrados ao longo do tempo (SAMPSON, 2009). O recalque total é descrito como uma baixa geral em todo o aterro. Recalque diferencial é descrito como baixa ou depressão localizada que resulta de heterogeneidades entre detritos residuais no aterro. Especificamente, o recalque pode ocorrer em aterros através de qualquer um dos cinco processos (SAMPSON, 2009):

1. consolidação mecânica;
2. degradação bioquímica;
3. Alteração físico-química;
4. Migração de refugo fino para os vazios de grandes resíduos (esmigalhamento);
5. Qualquer combinação de 1-4 acima.

Os principais fatores que influenciam nos recalques em aterros incluem (SIMÕES; CATAPRETA, 2013):

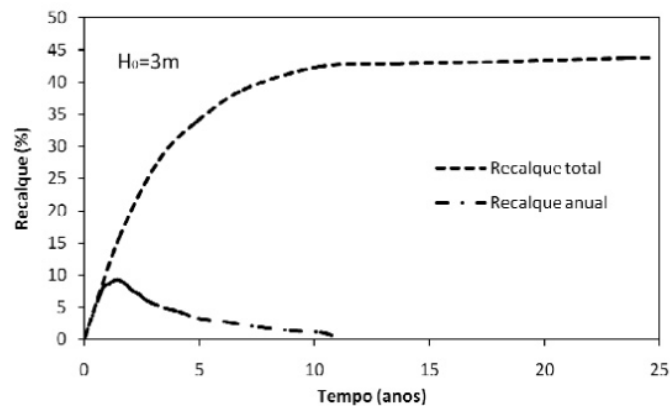
1. composição dos resíduos;
2. peso unitário inicial;
3. índice de vazios e teor de umidade;
4. dimensões do aterro;
5. métodos de compactação;
6. sequência de preenchimento
7. pré-tratamento dos resíduos (incineração, compostagem, e outros);
8. níveis de lixiviados, flutuações e recirculação;
9. temperatura e clima;
10. existência de sistemas de coleta e extração de gases;
11. características da cobertura final.

Do ponto de vista da engenharia geotécnica o recalque diferencial é geralmente o

que traz mais preocupação a integridade de estruturas colocadas nas coberturas dos aterros, como estruturas fotovoltaicas, se tornando um problema de engenharia substancial, ainda que comum, tanto para os cuidados pós-encerramento a longo prazo do aterro como para os componentes do sistema de uma exploração de energia solar (SAMPSON, 2009).

Como defendem Grisolia e Napoleoni (1996), citados por Shuler (2010), os depósitos de RSU recalcam cerca de 10 a 30% somente sobre a ação de seu próprio peso, e cerca de 90% dos recalques totais esperados ocorrem nos dez primeiros anos após o fechamento do aterro. Gandolla et al (1994) apud Schuler (2010) observaram comportamento similar, com recalques tendendo à estabilidade próximos aos dez anos, como pode ser observado na figura 7.

Figura 7 – Recalques total e anual em RSU



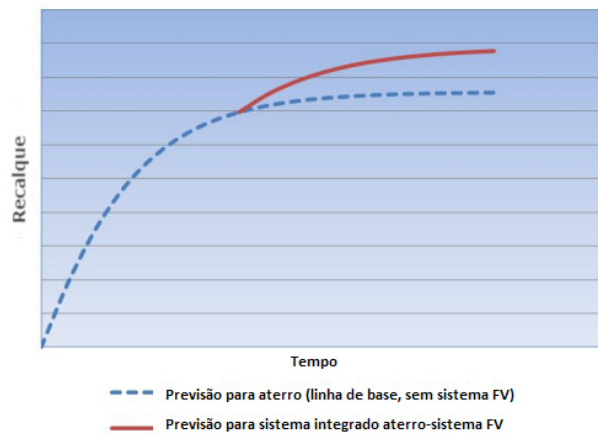
Fonte: Gandolla et al (1994) citados por Schuler (2010)

O peso do painel solar também deve ser considerado no que diz respeito ao possível recalque em aterros. As tecnologias solares variam muito em termos de peso dos painéis solares e estruturas de montagem. Os projetistas devem projetar um sistema de energia solar para ser flexível o suficiente para contabilizar os impactos que uma instalação de energia solar terá no assentamento do aterro e vice-versa (SAMPSON, 2009). Como mostrado na figura 8, a instalação de um sistema FV, pode afetar a taxa ou padrão de recalque ao longo do tempo, devido ao peso da estrutura.

2.2.3.1.2 Inclinação e estabilidade

A coleta e análise das características de inclinação e da estabilidade do solo de uma propriedade de aterro é um elemento crítico para a avaliação da viabilidade de projetos de aterros com instalações fotovoltaicas. Estas características desempenham um papel significativo na seleção dos componentes do arranjo fotovoltaico e na disposição do conjunto fotovoltaico.

Figura 8 – Recalque em Aterro de RSU e recalque em Aterro de RSU com sistema fotovoltaico como um sistema integrado.



Fonte: Adaptado de USEPA & NREL, 2013.

Mapas topográficos, análises locais, projetos técnicos de engenharia, e estudos de engenharia dos solos tipicamente contêm as informações necessárias para elaborar uma análise de declividade e estabilidade (USEPA & NREL, 2013).

A instalação de sistemas solares em locais com declividades maiores que 5 graus torna-se complicada por efeitos de sombras e a necessidade de sistemas mais complexos para controle de erosão e águas pluviais (SAMPSON, 2009). Os aterros que têm graus mínimos são frequentemente os melhores candidatos para o desenvolvimento de instalações fotovoltaicas, pois simplificam os requisitos de projeto de um sistema FV, minimizam as atividades e os custos de preparação do local e podem reduzir os custos da fundação do sistema fotovoltaico e dos componentes estruturais (USEPA & NREL, 2013).

Por outro lado, taludes de aterros voltados para o norte geográfico (no hemisfério sul), ou para o sul geográfico (no caso de locais no hemisfério norte), estão idealmente situados por maximizar a exposição ao Sol em altitudes maiores quando o sombreamento é levado em consideração. Assim, um balanço deve ser encontrado entre otimizar a produção de energia e garantir uma solução tecnicamente adequada à instalação do sistema fotovoltaico. Como regra geral, declives mais acentuados requerem conjuntos solares mais leves e fundações mais fortes (SAMPSON, 2009).

A estabilidade do solo de áreas inclinadas é outra consideração de engenharia relevante, e recomenda-se incluir uma revisão de estudos apropriados de engenharia e dados geotécnicos relativos ao material de cobertura durante a avaliação de viabilidade. Também é de

particular importância a escolha da cobertura para suportar tanto a construção quanto a operação de longo prazo do sistema fotovoltaico. A instalação de painéis solares em declives íngremes pode ser particularmente desafiadora, pois o peso do sistema coloca força adicional na cobertura em comparação com sistemas que são montados em superfícies planas e pode resultar em falhas se o sistema não for adequadamente projetado (USEPA & NREL, 2013).

2.2.3.1.3 Cobertura final

Para analisar a viabilidade de um projeto solar e avaliar projetos alternativos, é necessário entender a natureza da cobertura final e funcionalidades esperadas desta cobertura e seus componentes. Limitações quanto à penetração da cobertura e recalques guiarão a seleção e projeto do sistema de montagem e fundação (USEPA & NREL, 2013).

A camada de cobertura final, é uma medida de proteção ambiental constituída de multicamadas que serve para reduzir a infiltração de água para o lixo depositado e para minimizar emissões de gás do aterro para a atmosfera (TRAVAR et al, 2015), além de reduzir a ocorrência de outros inconvenientes como odores e vetores de doenças. Segundo a NBR 13896/97 a concepção de uma camada de cobertura final de um aterro exige pouca manutenção e deve ser prevista no plano de encerramento do aterro, de forma minimizar a infiltração de água na célula, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro (ABNT, 1997).

Quando adequadamente projetados, as coberturas dos aterros podem fornecer oportunidades significativas para hospedar empreendimentos econômicos, como a produção de energia a partir de energia solar e eólica.

Durante o processo de planejamento de um sistema solar em um aterro de RSU, a profundidade final da cobertura do aterro deve ser determinada para confirmar a capacidade de suportar o peso de todo o sistema solar. Alguns fabricantes recomendam superfícies niveladas para estabilidade adequada do sistema, o que pode requerer mover solos de áreas mais profundas para as áreas mais rasas, ou acrescentar solo adicional (SAMPSON, 2009).

A EPA, agência de proteção ambiental americana, recomenda que os projetos para solares em aterros encerrados e devidamente cobertos considerem aspectos técnicos como peso de equipamentos fotovoltaicos, espessura da cobertura do aterro, assentamento de resíduos, carregamento de vento e requisitos de manutenção da cobertura.

Outra opção é o uso de uma cobertura geomembrana solar, como na figura 9, que

Figura 9 – Aterro sanitário de Hickory Ridge (EUA) com cobertura de geomembrana solar



Fonte: (USEPA & NREL, 2013).

pode atender aos requisitos de capas alternativas, ao converter energia solar em energia utilizável. Uma cobertura de geomembrana solar também pode ser integrada a um sistema de recuperação de gás para maximizar a produção de gás natural a partir de recursos renováveis (EPA, 2011).

2.2.3.1.4 Estruturas de suporte

Os sistemas de energia solar fotovoltaica têm vários atributos distintos que são relevantes na hora de escolher a tecnologia disponível mais apropriada para a instalação em um aterro sanitário, incluindo características de peso, diferentes tipos de células e componentes de suporte disponíveis (SAMPSON, 2009). Cada sistema fotovoltaico integrado (módulos, sistema de montagem e fundações) é avaliado em relação à compatibilidade com as condições do local (USEPA & NREL, 2013).

A escolha do sistema de ancoragem é um dos passos mais críticos já que se trata da interface entre o sistema fotovoltaico e a cobertura do aterro, e deve ser realizada levando em consideração as características específicas de aterros. Com base nas informações coletadas e nas decisões iniciais tomadas na avaliação de viabilidade, a seleção e o projeto final do sistema de ancoragem envolve o balanceamento de vários fatores de projeto específicos para aterros, incluindo requisitos de peso do sistema, recalque diferencial e carga de vento. Cinco tipos de sistemas de ancoragem são comumente usados para suportar sistemas fotovoltaicos em aplicações de aterros sanitários (USEPA & NREL, 2013):

1. ***Bases rasas de concreto vertido e bases de concreto pré-fabricadas:***

Podem ser construídas no local, no primeiro caso, ou pré-fabricadas, no segundo. As bases de concreto são colocadas em buracos rasos na cobertura do aterro, mantêm o sistema de montagem no lugar e suportam a carga do sistema fotovoltaico. Bases de concreto tendem a ser mais pesadas que outros sistemas de ancoragem, mas em comparação com outros sistemas de ancoragem podem fornecer maior estabilidade para os declives mais íngremes (USEPA & NREL, 2013).

2. ***Lajes de concreto:***

As lajes são construídas sobre a cobertura do aterro ao longo da área onde o sistema de montagem será colocado. Uma vez que o concreto se encontre curado, o sistema é parafusado à laje. Essa configuração permite uma distribuição melhor do peso do sistema fotovoltaico pela cobertura do aterro, mas pode resultar em uma carga de peso muito maior do que as bases de concreto. Além disso, as lajes são propensas a fissuras devidas aos recalques uniforme e diferencial, prejudicando, por exemplo, o alinhamento dos conjuntos fotovoltaicos e perda da distribuição uniforme da carga de peso do sistema (USEPA & NREL, 2013).

3. ***Fundação helicoidal:***

Suas vantagens incluem rápida instalação, alta estabilidade e suporte estrutural, e baixo custo. A desvantagem está em que há a penetração na cobertura do aterro, e apresenta o risco de perfurá-la com o risco de alcançar a camada de resíduos se forem encontradas áreas com cobertura final de pouca espessura. Contudo, uma vez instalada, é menos provável que afunde com o tempo. Este tipo de ancoragem é mais aplicável em aterros com coberturas mais espessas e conhecidas, e em aplicações nos taludes laterais, onde estabilidade e suporte adicional são necessários; em casos em que o aterro ainda não foi encerrado, recomenda-se usar de uma cobertura mais espessa (USEPA & NREL, 2013).

4. ***Sistemas autobalastrados:***

Este é o sistema de ancoragem mais utilizado para sistemas fotovoltaicos em aterros, pois é recomendado para instalações onde penetração no solo não é aconselhada ou permitida. Um sistema de lastro é normalmente composto por uma bandeja plana ou um grande bloco de concreto que é colocado na superfície do aterro, sem penetração, com a estrutura de suporte do conjunto fotovoltaico anexada à bandeja ou bloco de concreto. Vantagens incluem: não penetração na cobertura final do aterro, mínima preparação do local ou distúrbios à vegetação de cobertura, instalação rápida, e fornecimento de bom suporte

estrutural ao conjunto fotovoltaico. Este tipo de sistema de ancoragem pode se tratar de bom candidato para superfícies planas dos aterros, mas se tornam mais difíceis de instalar quando a declividade da superfície do aterro aumenta (USEPA & NREL, 2013).

5. *Geomembranas integradas ao sistema FV:*

A geomembrana integrada é uma cobertura de aterro, que tipicamente composta de um material de poliolefina termoplástica (TPO), que pode ser usado em lugar de uma cobertura final vegetativa ou outra cobertura selecionada para o aterro. São usualmente consideradas apenas antes do início do processo de encerramento do aterro, já que poderia ser redundante sua colocação sobre uma cobertura final já disposta, e/ou pode requerer modificação nos planos de encerramento e/ou pós-encerramento. O custo deste tipo de sistema é similar ao custo relativo à cobertura final tradicional, com o benefício de produzir energia. Pesa menos que os outros sistemas de ancoragem e não está sujeito às restrições de carga dos mesmos. Em comparação com a cobertura final tradicional, a geomembrana fornece boa estabilidade da cobertura, reduz os custos de manutenção e diminui a infiltração de água na cobertura do aterro além de reduzir os riscos de erosão (USEPA & NREL, 2013).

Na figura 10 temos exemplos dos cinco tipo de sistemas de ancoragem comumente usados para instalações fotovoltaicas em aterros.

Figura 10 – Sistemas de ancoragem para instalações fotovoltaicas em aterros



a) Base de concreto pré-fabricadas; b) Laje de concreto; c) Fundação helicoidal; d) Sistema autobalastrado e e) Geomembranas integradas a sistema FV.

Fonte: (USEPA & NREL, 2013) e Premier Fencing.

Seguida a escolha da estrutura de ancoragem, as opções para o sistema de montagem

e a orientação da matriz são avaliadas. Existem estruturas de montagem de rastreamento solar de inclinação fixa e de eixo simples e duplo estão disponíveis para instalações terrestres fotovoltaicas. As estruturas de montagem de inclinação fixa consistem em painéis instalados em um ângulo permanente que maximiza o recebimento de radiação solar ao longo do ano, com base na latitude do local. Normalmente, os sistemas de montagem com inclinação fixa são selecionados para aplicações em aterros sanitários. Sistemas de inclinação fixa são normalmente orientados para o sul (hemisfério norte) ou para o norte (hemisfério sul) e intitulados em um ângulo igual a o menor que a latitude do local do site (SAMPSON, 2009) (USEPA & NREL, 2013).

O segundo tipo de estrutura de montagem atualmente disponível é a configuração FV de rastreamento de azimute (*suntracking*), que fornece o ajuste automatizado dos painéis em um eixo simples ou duplo correspondente à posição do sol em relação ao painel fotovoltaico. Os rastreadores de eixo duplo e de eixo único têm maior eficiência em relação às configurações de inclinação fixa. No entanto, os rastreadores de eixo duplo exigem mais espaço do que os rastreadores de eixo único, devido à dificuldade em evitar o sombreamento entre os painéis (SAMPSON, 2009). Conforme Kurokawa (2003) apud Sampson (2009), uma segunda desvantagem do rastreador de eixo duplo é o tempo de operação e manutenção, o custo e a energia parasítica necessária para manter e alimentar os dois motores que acionam os eixos.

2.2.3.2 Aterros Solares no mundo

Sistemas solares fotovoltaicos em aterros sanitários são um exemplo do aproveitamento de áreas degradadas através de um processo de reabilitação, além de introduzir uma nova atividade produtiva no local. A tabela 2 mostra uma visão geral de algumas instalações existentes nos Estados Unidos, bem como onde esses projetos ocorreram, o tamanho do sistema em energia e terra e quando o sistema começou a operar. Um recurso importante a ser observado na Tabela 2 são as datas em que esses projetos começaram a operar. Nenhum desses projetos começou a funcionar antes de 2007. Isso mostra como as novas instalações de painéis solares em aterros encerrados estão nos Estados Unidos.

A Tabela 2 mostra o fato de que os preços dos módulos fotovoltaicos têm caído a incríveis taxas. Comparando o custo dos sistemas Sarasota e Hickory Ridge, o custo de construir o sistema dois anos depois diminuiu o custo do sistema equivalente em US \$ 2 milhões (ROSS, 2011).

Nos EUA, tomado como o principal país de exemplo para análises deste trabalho em

Tabela 2 – Alguns casos de painéis solares em Aterros Sanitários nos EUA

Localização	Criado por:	Dimensão	Potência	Custo estimado do sistema	Início de operação
Fort Carson, Colorado	Fort Carson	12 acres	2MW	\$ 13 milhões	2008
Houston, Texas	Cidade de Houston	150 acres	10 MW	\$ 55 milhões	Em construção
Las Vegas, Nevada	Air Force	140 acres	14 MW	\$ 100 + milhões	2007
San Antonio, Texas	CSP Energy em parceria com Republic Services, Inc.	5.6 acres	1.35 MW	\$ 11 milhões	2009
Pennsauken, New Jersey	New Jersey	10 acres	5.5 MW	\$ 44 milhões	2008
Sarasota, Florida	Florida Power e Light	28,000 ft	250 kW	\$ 2 milhões	2008
Conley, Georgia	Investimento federal	10 acres	1MW	\$ 6 milhões	2011

Fonte: (ROSS, 2011)

relação ao reuso de áreas de aterros, a EPA está encorajando por meio do programa *RE-Powering America's Land Initiative*, o desenvolvimento de energias renováveis em áreas contaminadas, aterros de resíduos, e em locais de mineração (USEPA & NREL, 2013).

Apresentamos a seguir dois projetos resultados da simbiose industrial dos setores de eletricidade e gestão de resíduos.

Aterro Pennsauken

O Aterro Sanitário de Pennsauken é um aterro sanitário municipal localizado em Pennsauken, Nova Jersey. É de propriedade e operado pela Autoridade de Financiamento do Controle de Poluição do Condado de Camden (PCFACC). O aterro ainda está aberto, com a maioria dos resíduos sendo volumosos e resíduos de construção e demolição. O aterro consiste em três células distintas, um sistema de 5,5 MW foi construído em uma área de 10 hectares. Para o aterro de Pennsauken, as subvenções do Estado contribuíram para o custo de capital (TANSEL, 2010).

A instalação do painel solar foi feita pela *Pennsylvania Power and Light Renewable Energy* (PPLRE). Os painéis foram colocados nas áreas que foram aterradas de 1960 a 1990. Os primeiros painéis foram colocados há cerca de 16 anos depois que o aterro encerrou as atividades nessas áreas. Os futuros planos de uso do local incluem o uso de células solares de filme fino, o que requer cerca de 6 a 7 acres / MW (TANSEL, 2010).

Descrição do sistema solar: Os sistemas de energia solar foram instalados na área-A e na área-D, com a área-A composto de painéis fotovoltaicos instalados nas encostas laterais e na área superior (Figura 11), enquanto os sistemas na área-D consistem em painéis fotovoltaicos instalados apenas na área superior. Painéis perdem cerca de 0,6% de eficiência a cada ano

(TANSEL, 2010).

Figura 11 – Instalação de painéis solares no aterro de Pennsauken



Fonte: (TANSEL, 2010).

- Painéis Utilizados: Fotovoltaico Cristalino;
- Sistemas de montagem (superfícies superiores): Sistemas de lastro
- Sistemas de montagem (encostas laterais): Fundação de concreto pré-moldado
- Ângulo de inclinação: O ângulo de inclinação é igual à latitude do local para os painéis localizados no topo do aterro. Os painéis foram colocados voltados para o sudoeste em vez do sul. Os painéis colocados nas encostas são geralmente colocados no mesmo ângulo e na direção da inclinação, com os painéis voltados para a direção sul-oeste.
- Capacidade de energia solar: capacidade de 5,5MW. Painéis foram instalados durante 2006-2008.
- Geração de Eletricidade: Durante o ano de 2008, 2605 MW de eletricidade foram produzidos. Durante 2009, 2.156 MW foi gerado até 31 de outubro. A produção mensal em 2009 variou de 141 MW em Janeiro a 276 MW em julho. A produção mensal em 2008 variou de 111 MW em dezembro para 305 MW em junho.

Aterro de Tessman Road

O local é um aterro sanitário municipal localizado em San Antonio, Texas, de propriedade e operado pela *Republic Services, Inc.* O aterro recebeu quantidades de resíduos entre 2500-5000 toneladas / dia. A cobertura inovadora de geomembrana, também conhecida como *Solar Energy Cover (SEC)* foi usada para cobrir o local (5,6 acres) com inclinação sul de 18 graus em 2008. A cobertura de geomembrana serve como cobertura final para o aterro, bem como superfície de montagem para colocação de painéis fotovoltaicos flexíveis (TANSEL, 2010).

A cobertura de energia solar é capaz de (TANSEL, 2010):

- Reduzir a infiltração;
- Proteger o solo contra o vento e a erosão;
- Proteger a superfície contra perfurações;
- Proteger a superfície contra danos devido à exposição solar e variações de temperatura.

Com base nos benefícios acima, a cobertura de geomembrana foi aprovada para ser usada como uma cobertura de aterro.

Os serviços de projeto de engenharia foram fornecidos pela *HDR Engineering Inc.* A cobertura de geomembrana foi fabricada em material à base de polipropileno de 60 milímetros (poliolefina termoplástica) com reforço. Lâminas flexíveis fotovoltaicas foram diretamente ligadas à cobertura de geomembrana. A construção do projeto teve início em dezembro de 2008 e foi concluída em abril de 2009. A Figura 12 apresenta a visão final do aterro da Tessman Road (TANSEL, 2010).

Descrição do sistema solar: 1050 lâminas fotovoltaicas flexíveis foram colocadas em na face sul com inclinação lateral, ligando-as diretamente com a cobertura de geomembrana. Os painéis flexíveis foram do modelo Uni-Solar PVL-128 com potência nominal entre 128 W-144W (TANSEL, 2010).

Figura 12 – Vista final do Aterro de Tessman Aterro Road



Fonte: (TANSEL, 2010).

- Ângulo de inclinação: as tiras PV nas encostas foram colocadas no mesmo ângulo e na direção da inclinação do superfície de aterro (isto é, virado a sul a 18°).
- Capacidade de Energia Solar: 182 megawatts por hora.

- Geração de Eletricidade: A produção estimada de eletricidade a partir do painel solar do sistema de 135KW é de 182.319 KWh (aprox.) Combinados com a energia do gás de aterro sanitário, 9 megawatts de eletricidade podem ser gerados capazes de alimentar 5500 residências.
- Benefícios: 0,089 \$ / kWh resultando em receita de energia de 16000 \$ / ano.

3 MATERIAIS E MÉTODOS: ESTUDO DE OPORTUNIDADE NO CEARÁ

3.1 O Estudo de Caso - Arquitetura da Usina Fotovoltaica Distribuída sobre Maciço ASMOC

No município de Caucaia, Ceará, está localizado o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) (latitude 3,789376 S e longitude 38,67394 O) , que dista aproximadamente 30 km, pelas BR-222 ou BR-020, do centro de Fortaleza. O aterro conta com um espaço original de 123,20 hectares, sendo 78,47 ha destinados à disposição de resíduos, com algumas células já encerradas. (SEMACE, 2011).

Desde 2010 o processo de ampliação do aterro está em andamento e a primeira etapa foi concluída em 2018. A ampliação contará com uma área de 101,70 ha, os quais 73,36 ha são destinados à disposição de resíduos (SEMACE, 2011).

Conforme o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), apresentado à Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE) a área da ampliação foi dimensionada para atender à demanda da capital e da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) pelos próximos 16 anos e 8 meses, funcionando, assim, até 2034, caso seja finalizada em 2018.

Na figura 13, pode ser observada a localização do ASMOC em vermelho, assim como a área de ampliação em verde.

Figura 13 – Localização do ASMOC e área de ampliação.



Fonte: RIMA - ASMOC (2011)

Uma análise foi realizada para verificar a possibilidade de aproveitamento da área de células encerradas do presente aterro por meio da instalação de projetos para geração de eletricidade usando energia solar. Foi considerado que a instalação de um sistema solar fotovoltaico deve ocorrer dez anos após o encerramento da disposição de resíduos na área do aterro, quando os recalques tendem a uma estabilidade, diminuindo eventuais problemas de movimentação do solo acentuados pelo peso da instalação da estrutura, como discutido anteriormente.

Objetiva-se que haja aproveitamento energético nas células encerradas após um período de 10 anos. Este aproveitamento poderia se dar de forma gradual, inicialmente nas células encerradas mais antigas, ainda durante o período em que o aterro recebe resíduos, como também, após o encerramento das atividades do aterro sanitário. Estima-se que o aproveitamento energético ocorrerá por um período aproximado de 25 anos, visto que mesmo desativado o aterro precisa ainda de cuidados e manutenção por pelo menos 30 anos, como visto anteriormente.

Objetiva-se ainda participar do sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*) para a redução da fatura mensal de consumo de energia elétrica (REN 482/2012 e REN 687/2015).

Trata-se de um projeto a longo prazo que pode trazer benefícios ao operador do aterro sanitário inclusive após o período de recebimento de resíduos.

Utilizou-se para a análise as ferramentas computacionais "*Decision Tree Tool*" da EPA e o "*System Advisor Model-SAM*" do NREL, ambos softwares livre e acessíveis na Internet.

3.2 Ferramenta Computacional Árvore de Decisão (*Decision Tree Tool*) da EPA

O programa *Decision Tree Tool*, desenvolvido pela iniciativa *RE-Powering America* da USEPA, guia através de um processo de identificação os locais para a adequação a instalações fotovoltaicas ou eólicas, com o objetivo de incentivar a energia renovável em terras já utilizadas ou degradadas, em vez de espaços verdes.

A ferramenta aborda os seguintes tipos de locais:

- Locais Potencialmente Contaminados (ex.:Minas abandonadas)
- Aterros (Resíduos Sólidos Urbanos, Construção e Demolição ou unidade similar)
- Subutilizado (parcelas abandonadas, estacionamentos, zonas de amortecimento)
- Telhados (somente solar fotovoltaico; Telhados comerciais / industriais)

Com ajuda deste recurso informativo é possível determinar se existem barreiras potenciais a um projeto solar ou eólico em um local de interesse. Ele fornece:

- Um passo-a-passo através de considerações fundamentais para o desenvolvimento de energias renováveis no local;
- Recursos sugeridos para ajudar a responder perguntas de triagem para avaliar o potencial do local; e
- Relatórios resumindo as respostas às perguntas de triagem, descobertas iniciais sobre adequação e outros comentários sobre o local.

Resumidamente, o programa foi utilizado para avaliar a viabilidade técnica de uma instalação solar fotovoltaica na ASMOC através de uma série de perguntas, desenvolvidas por uma agência americana que encoraja o desenvolvimento de energias renováveis em locais e aterros contaminados.

Este software organiza as perguntas em:

1. Características do local;
2. Considerações sobre redesenvolvimento;
3. Questões de contaminação e Aterro;
4. Avaliação Financeira;

E finalmente, apresenta o resumo e resultados. Na figura 14 é possível ver a interface do programa Decision Tree Tool.

Figura 14 – Interface do programa *Decision Tree Tool* da EPA.

The screenshot shows the 'Decision Tree Tool' interface. At the top, there is a navigation bar with icons for 'Home', 'Site Characteristics', 'Redevelopment Considerations', 'Contamination and Landfill Issues', 'Load Assessment and Financial', and 'Summary and Results'. Below this, the current session details are displayed: 'Site: ASMOC', 'Type: Landfill', 'Technology: Solar', and 'Installation: Ground'. The main content area is divided into two columns: 'Site Installation' and 'Explanation'. The 'Site Installation' column contains three sections: '*Site Type' with radio buttons for 'Potentially Contaminated (Superfund, Brownfield, RCRA, mine site)', 'Landfill (Municipal Solid Waste, Construction and Demolition or similar unit)', 'Underutilized (Abandoned parcels, Parking Lots, Buffer Zones)', and 'Rooftop (Solar PV only, Commercial/Industrial roofs)'; '*Technology' with radio buttons for 'Solar PV' (selected) and 'Wind Energy'; and '*Installation Type' with radio buttons for 'Ground Mount' (selected), 'Rooftop', and 'Ground Mount and Rooftop'. A note below states '*Indicates required field' and 'Selections made on this page will direct the questions that follow in the decision tree'. At the bottom of the form are 'Back' and 'Next' buttons. The 'Explanation' column contains three sections: 'Site Type' with a paragraph explaining the selection process; 'Technology' with the instruction 'Pick the technology to be explored.'; and 'Installation Type' with the instruction 'Select the installation type to be evaluated.'. At the bottom right of the interface are 'Save' and 'Exit' buttons.

Fonte: *Decision Tree Tool*.

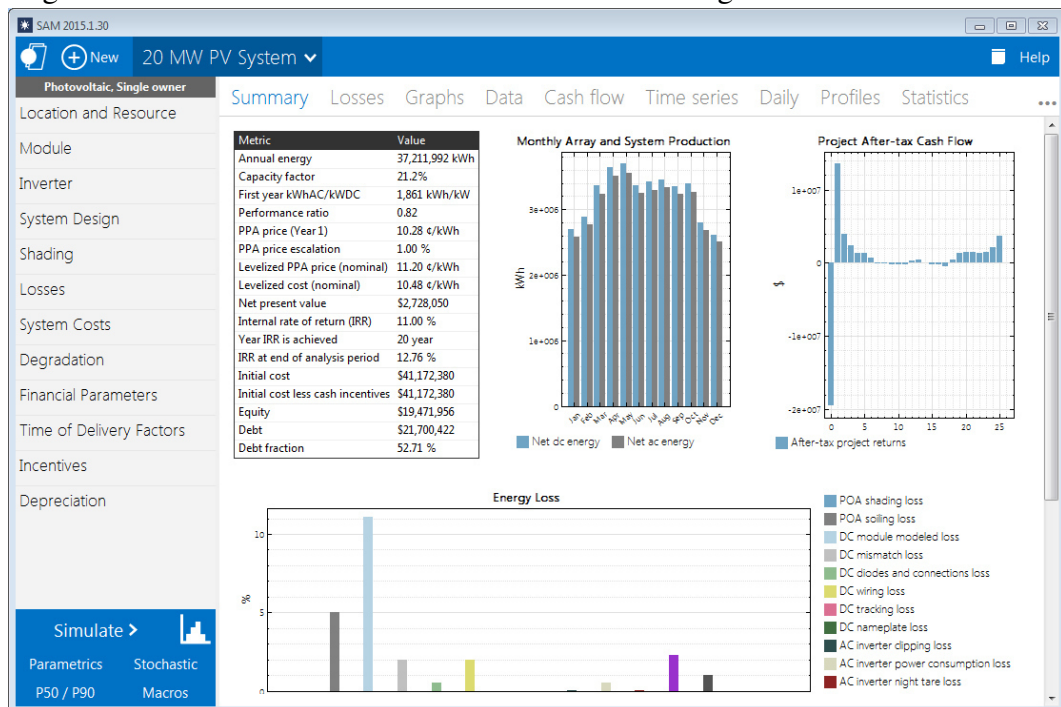
3.3 Modelagem Computacional Consultiva do Sistema (*System Advisor Model-SAM*) do NREL

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) ou Laboratório Nacional de Energia Renovável é um laboratório localizado na cidade de Golden, Colorado, e que pertence ao Departamento de Energia dos Estados Unidos. Ele é o mais importante centro de pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis e eficiência energética dos Estados Unidos (NREL, 2018a).

O *System Advisor Model* (SAM) é um modelo financeiro e de desempenho projetado pela NREL para facilitar a tomada de decisões para as pessoas envolvidas no setor de energia renovável, como gerentes de projetos, engenheiros, analistas de políticas, desenvolvedores de tecnologia e pesquisadores (NREL, 2018b).

Na figura 15 é possível ver a interface do programa *System Advisor Model-SAM*.

Figura 15 – Tabela de resumo de resultados do SAM e gráficos



Fonte: SAM-NREL.

O SAM faz previsões de desempenho e estimativas de custo de energia para projetos de energia conectados à rede com base nos custos de instalação e operação e nos parâmetros de projeto do sistema que são especificados como entradas para o modelo (NREL, 2018b).

A primeira etapa na criação de um arquivo SAM é escolher uma opção de tecnologia e financiamento para o projeto. O SAM preenche automaticamente as variáveis de entrada com

um conjunto de valores padrão para o tipo de projeto. É responsabilidade do analista revisar e modificar todos os dados de entrada conforme apropriado para cada análise. Em seguida, o usuário deve fornecer informações sobre a localização do projeto, o tipo de equipamento no sistema, o custo de instalação e operação do sistema e as premissas financeiras e de incentivos (NREL, 2018b).

Foi escolhido o modelo Fotovoltaico Detalhado para implementação deste estudo de caso. O modelo fotovoltaico detalhado calcula a potência elétrica de um sistema fotovoltaico conectado à rede usando modelos separados de módulo e inversor. Ele requer especificações do módulo e do inversor, juntamente com informações sobre o número de módulos e inversores no sistema. O modelo também estima as perdas devido ao efeito da temperatura no desempenho do módulo e tem opções para calcular o sombreamento e outras perdas no sistema, além de incluir um assistente de dimensionamento do sistema para ajudá-lo a determinar o número de módulos e inversores no sistema (NREL, 2018b).

3.3.1 Configuração do Sistema

O sistema a ser dimensionado será de 1 MW, caracterizando o projeto segundo a REN 687/2015 como minigeração distribuída.

Considera-se ainda que a queda de tensão será de, no máximo, 1,25% (razão DC/AC), conforme adotou PESTANA (2017), de forma a que o sistema funcione eficientemente.

Para os quatro casos a orientação escolhida foi a fixa e levou-se em consideração os valores padrões do software para as perdas causadas por cabeamento, diodos e conexões, incompatibilidade de módulo e a perda anual média.

3.3.2 Localização

Os dados meteorológicos usados no estudo de caso são de uma estação próxima ao Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), com as seguintes coordenadas UTM, -3.71 °N e -38.66 °L. Eles foram obtidos no Banco de Dados Nacional de Radiação Solar da NREL. Vale ressaltar que nos recursos típicos de radiações solares anuais constam a Irradiação Horizontal Global (*Global Horizontal Irradiation* - GHI), a Irradiação Direta Horizontal (*Direct Horizontal Irradiation* - DHI) e a Irradiação Direta Normal (*Direct Normal Irradiation* - DNI) do local.

3.3.3 Escolha do Equipamento

Uma análise de mercado permitiu investigar acerca dos fabricantes que garantem uma maior qualidade por parte dos seus equipamentos, assim como também investigar o que é prática comum em sistemas de média potência. Para a escolhas dos equipamentos seguiu-se as orientações contidas no trabalho de PESTANA (2017). Segue-se uma análise dos equipamentos escolhidos.

3.3.3.1 Escolha do Módulo

Referente a escolha dos módulos FV, segundo PESTANA(2017), é aconselhável dar prioridade a fabricantes de topo como a *SolarWorld*, *Canadian Solar*, *REC* e *Centrosolar*.

A escolha dos módulos caiu sobre a *Trina Solar*, a *SolarWorld* e a *Canadian Solar*, *Centro Solar* e *Sunpreme*. As características de cada módulo já estavam contidas no banco de dados do SAM e podem ser consultadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características dos módulos FV comparados.

Fabricante	Trina Solar	Solar Word	Canadian Solar	T-Solar Global
Modelo	320TSM-PD14	SW 340 XL	CS6U-320P	TS370
Potência máxima (Pmax) [Wp]	320	340	320	370
Tensão de Pico (Vmp) [V]	37,1	38	36,8	141
Corrente de Pico (Imp) [A]	8,63	9,01	8,69	2,71
Tensão em circuito aberto (Voc) [V]	45,8	47,6	45,3	185
Corrente de curto-circuito (Isc) [A]	9,1	9,69	9,26	3,24
Eficiência [%]	16,5	17,04	16,46	6,69
Tipo de célula	S. Policristalino	S. Monocristalino	S. Policristalino	Filme Fino
Dimensões do painel [m]	1,956 x 0,992	1,993 x 1,001	1,960 x 0,992	2,5980 x 2,198
Peso [Kg]	22,5kg	21,6	22,4	31,75

Fonte: Fabricantes.

3.3.3.2 Escolha do Inversor

No que toca a escolha dos inversores, também deu-se prioridade a fabricantes de topo como a *Solectria*, *ABB*, *Ingeteam*, *SMA*, *Huawei* e *Sungrow*. Seguindo a metodologia de PESTANA(2017), como o sistema FV a dimensionar foi de 1MW, escolheu-se 4 inversores de

250kW cada um. O objetivo desta escolha consistiu na distribuição equitativa do gerador FV, apostando na estabilidade e continuidade de serviço do sistema FV pois assim existirão 4 grupos independentes. A tabela 4 mostra as características dos inversores escolhidos.

Tabela 4 – Características dos inversores analisados.

Fabricante	Ingeteam	ABB	SMA	Sungrow
Modelo	250TL U X208	PVI-CENTRAL - 250-US	SC250U	SG250KU
Potência Nominal [kW]	250	250	250	250
Faixa de tensão [V]	350-820	320-480	330-480	300-600
Tensão máxima DC [V]	1000	480	480	600
Corrente máxima DC [A]	780	720	700,062	900

Fonte: Fabricantes e SAM.

3.3.4 Definição dos Casos de Estudo

O dimensionamento do parque FV ocorrerá através da escolha de quatro casos distintos, o Caso A, o Caso B, o Caso C e Caso D. O objetivo da definição destes quatro casos consiste em determinar qual dos quatro será mais vantajoso no final. Além disso, tem também como objetivo comparar as tecnologias de silício policristalino, monocristalino e filme fino dos diversos módulos. Os casos foram separados da seguinte maneira:

Tabela 5 – Definição dos Casos de Estudo

	<i>Caso A</i>	<i>Caso B</i>	<i>Caso C</i>	<i>Caso D</i>
Módulo	Trina Solar	Solar Word	Canadian Solar	T-Solar Global
Inversor	Ingeteam	ABB	SMA	Sungrow
Tecnologia	S. Policristalino	S. Monocristalino	S. Policristalino	Filme Fino

4 RESULTADOS

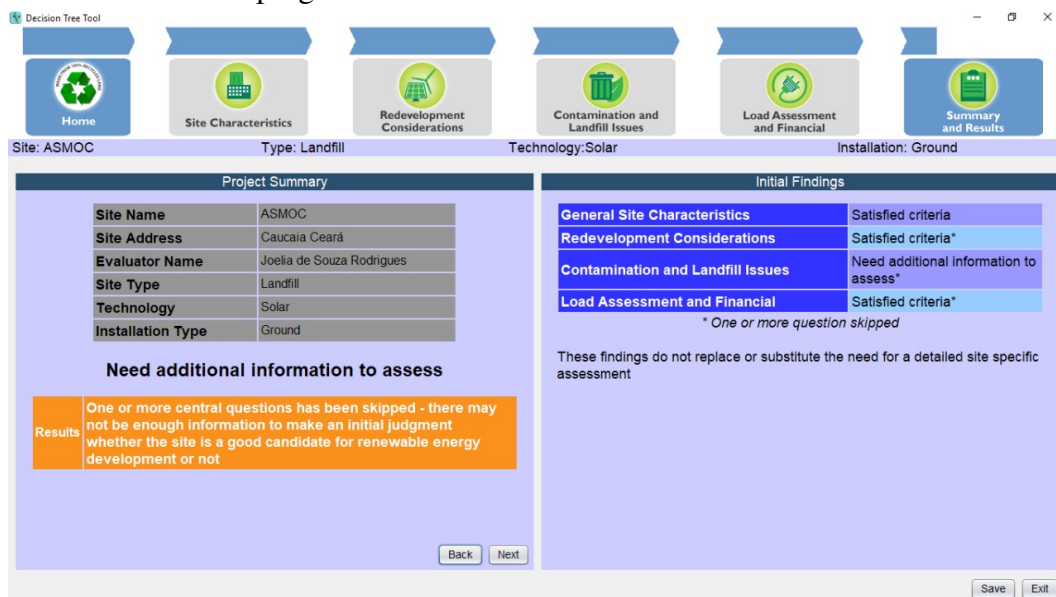
4.1 Análise dos resultados obtidos com a Ferramenta Computacional Árvore de Decisão (*Decision Tree Tool*) da EPA

Os resultados foram obtidos por meio de um Relatório Resumo e um Relatório de Entrada de Dados.

Como uma ou mais questões centrais foram omitidas, não houveram informações suficientes para o programa fazer um julgamento inicial se o local é um bom candidato para o desenvolvimento de energia renovável ou não.

Como pode ser visto na Figura 16, os critérios satisfeitos englobaram as características do local, as considerações sobre o redesenvolvimento e a avaliação financeira. Excluiu-se dos critérios satisfeitos, as questões sobre contaminação e aterro, devido a necessidade de informações adicionais. A seguir, cada critério será especificado de acordo com as suas particularidades.

Figura 16 – Interface do programa *Decision Tree Tool* da EPA.



Fonte: *Decision Tree Tool*

4.1.1 Características do Local

Segundo o Relatório Resumo, que reflete os dados inseridos pelo usuário, foram atribuídas as seguintes características satisfatórias à área que é objeto de estudo na ASMOC:

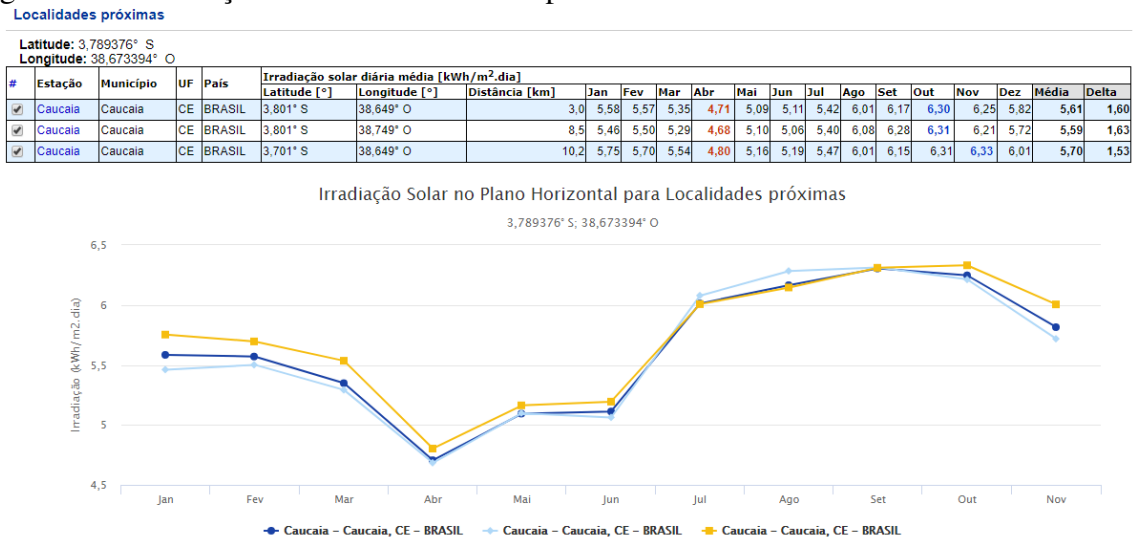
1. O projeto está localizado em uma área do país que recebe mais do que o recurso solar mínimo (3,5 kwh / m² / dia) para tornar uma instalação solar fotovoltaica tecnicamente

viável;

2. Área útil utilizável é suficiente / não é provável que represente um obstáculo;
3. O local tem proximidade suficiente à rede elétrica para estabelecer interconexão;
4. O local está suficientemente próximo de estradas para fins de instalação e operação de um sistema de energia renovável;

Relativo a irradiação solar, segundo o site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESEB), o potencial solar para as coordenadas geográficas do ASMOC é em média 5,59 kWh/m²/dia, ou seja, irradiação superior ao mínimo aconselhado pelo software da EPA, caracterizando a área como tecnicamente viável para uma instalação fotovoltaica, como apresentado na figura 17.

Figura 17 – Irradiação solar nas localidades próximas ao ASMOC



Fonte: CRESEB - SunData

O CRESEB usa os recursos do programa SunData para o cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e constitui-se em uma tentativa de oferecer uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. O programa SunData foi atualizado com o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição, que foi produzido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CRESEB, 2018).

Referente a área útil, este trabalho aconselha o uso da área destinada à disposição de resíduos, sem considerar a ampliação, ou seja, 78,47 hectares. No entanto, segundo ao software é necessário desconsiderar no cálculo da área útil áreas com obstáculos, áreas sombreadas e áreas com inclinação superior a 10%. Desta forma, a superfície útil é dada pela equação:

Superfície útil = [Área Total - (Área com Obstáculos) - (Área sombreada) - (Área com grau superior a 10%)]

Concernente a rede elétrica, a Resolução Normativa Nº 414 da ANEEL estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada e define o consumidor ASMOC com fornecimento de energia elétrica em 13,8 kV como do Grupo A e Subgrupo A4, com proximidade satisfatória à rede elétrica.

Relativa a última característica relevante abordada pelo software, proximidade à estradas, o ASMOC é próxima da BR-222 e BR-220, como citado anteriormente, viabilizando a instalação e operação de um sistema de energia solar fotovoltaica.

4.1.2 Considerações sobre o Redesenvolvimento

As condições sobre o redesenvolvimento abordadas pelo Relatório da *Decision Tree Tool* da EPA foram:

1. O dono do local está interessado em desenvolver energia renovável no local;
2. Comunidade não tem ou é desconhecido um plano de redesenvolvimento;
3. Local livre de exclusões ou restrições de uso da terra que impediriam a energia solar fotovoltaica na área útil ou no telhado.

A Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará - Nutec, em uma iniciativa promissora para promover a sustentabilidade social e ambiental do desenvolvimento municipal no Ceará propiciou um Momento de Integração Tecnológica sobre “Aterros Sanitários Solares no Ceará e o Desenvolvimento Limpo: Oportunidades de Promoção de Desenvolvimento Sustentável PPP (*Profit-Planet-People*)”, contando com a participação de representantes do grupo empresarial Marquise (atual responsável pela administração do ASMOC) e da EcoFor. Neste evento, foi apresentado ainda um estudo de caso sobre a implantação de uma instalação solar fotovoltaica em alguns setores encerrados do ASMOC e o grupo Marquise mostrou-se bastante interessado na proposta e aberto a diálogo para o desenvolvimento da tecnologia no Ceará.

O plano de encerramento do ASMOC deverá ser elaborado e executado pela Prefeitura Municipal de Caucaia, conforme Lei 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Atualmente, o aterro já realiza o aproveitamento de biogás produzido pelos resíduos depositados. Desta forma, espera-se que o Estado continue buscando alternativas tecnológicas e inovadoras para o uso futuro da área, transformando o espaço em uma zona produtiva

de energia renovável.

4.1.3 Questões sobre contaminação e Aterro

Devido a necessidade de informações adicionais, os critérios sobre contaminação e aterro não tiveram todas as orientações satisfeitas. Ainda segundo o Relatório Resumo fornecido após a análise feita pelo software, o ASMOC conta com as seguintes características:

Tabela 6 – Critérios relativos as Questões sobre contaminação e aterro

Critérios Satisfeitos	Critérios que Necessitam de Informações Adicionais
O Aterro no local está fechado (conta com algumas zonas encerradas)	A capacidade de suporte de peso dos sistemas de tubulação e coleta é desconhecida
A agência de supervisão, o proprietário do local e o operador parecerem receptivos a uma instalação solar fotovoltaica no aterro	Se a instalação de energia solar fotovoltaica seria compatível com as operações e manutenção da infra-estrutura de lixiviação e gás de aterro é desconhecida
O aterro já passou pela fase de recalque ou espera-se que o recalque seja uniforme	Se uma instalação solar fotovoltaica terá impacto sobre os padrões de drenagem ou sobre o plano de gerenciamento de águas pluviais do aterro é desconhecido
Uma instalação de energia solar fotovoltaica é consistente com os planos de controle de erosão existentes ou especificações de cobertura vegetativa	- - -

Fonte: Relatório fornecido pela Ferramenta Computacional Árvore de Decisão (*Decision Tree Tool*) da EPA.

No que se refere aos critérios satisfeitos, o ASMOC conta atualmente com algumas zonas encerradas, como a Zona Leste 1 e a Zona Leste 2, e as demais zonas terão sua capacidade total prevista de serem atingida em 2019 e passarão pela fase de recalque mais acentuado nos próximos 10 anos, após isso espera-se que ele apresente uma aparência estável devido aos métodos de compactação modernos adotados no ASMOC.

Além disso, uma instalação fotovoltaica ao mesmo tempo que produziria energia, se ajustaria também como uma cobertura dificultando processos erosivos no solo.

No que concerne aos critérios que necessitam de informações adicionais, antes de respondê-las seria necessário realizar um estudo sobre os atuais sistemas de lixiviação, drenagem, captação de gás de aterro e do gerenciamento das águas pluviais no ASMOC, além de um estudo geotécnico para examinar se eles se adequariam sem prejuízos à montagem e ao peso de uma estrutura fotovoltaica.

4.1.4 Avaliação Financeira

Em referência a avaliação financeira, o software analisou os seguintes pontos:

1. A concessionária local ou outro fornecedor de energia está interessado em comprar energia de um projeto de energia solar fotovoltaica no local;
2. Existe uma instalação disponível com carga de energia no local que pode ser fornecida durante a vida útil mínima de uma instalação solar fotovoltaica;
3. O proprietário do local / cliente da concessionária pode ser compensado pela energia fornecida à rede por um sistema fotovoltaico solar que exceda as necessidades de eletricidade do local (Net Metering);
4. O preço da eletricidade no varejo é desconhecido;

Se o ASMOC optar pela instalação de uma usina solar fotovoltaica com capacidade de até 5 MW, de acordo com a Resolução Normativa N° 687/2015 da ANEEL, o empreendimento será caracterizado como minigeração distribuída e poderá se beneficiar do sistema de compensação energética (Net Metering), além de poder fornecer eletricidade para outras instalações públicas com o mesmo CNPJ, como escolas e hospitais do município.

Caso o projeto, tenha capacidade de geração superior a 5 MW poderá participar dos leilões de energia promovidos pelo Ministério de Minas e Energia, assim, vendendo a energia gerada diretamente para a distribuidora. Leilões são processos licitatórios realizados com o objetivo de contratar a energia elétrica necessária para assegurar o pleno atendimento da demanda futura no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) (mercado das distribuidoras). os agentes vendedores (geradores, comercializadores e autoprodutores) e as distribuidoras estabelecem Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) (MME, 2018).

Quanto ao preço da eletricidade, questão também abordada no critérios relativos a viabilidade financeira, o ASMOC é um cliente com fornecimento de energia elétrica em 13,8 kV do Grupo A e Subgrupo A4, assim, conta com uma estrutura tarifária diferente dos consumidores comuns. A fatura de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem (PROCEL, 2011). Uma relação com as tarifas aplicadas pela distribuidora de energia ENEL em abril de 2018 no Ceará, está no Anexo C.

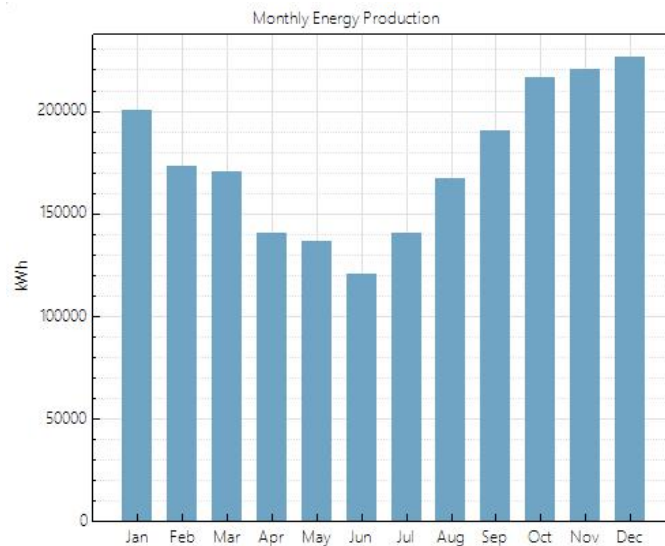
4.2 Análise dos resultados obtidos com a Modelagem Computacional do Sistema (*System Advisor Model-SAM*) do NREL

4.2.1 Caso A: Módulos Trina Solar 320 W e Inversor Ingeteam

Para o primeiro estudo, com uma potência instalada de 1250 kW e uma razão DC/AC de 1,25, segundo a simulação realizada no SAM, a previsão é de serem usados 3888 módulos FV, em 216 *strings* em paralelo, juntamente com 4 inversores.

Visto que não existe restrição de espaço na zona que se pretende instalar as instalações FV, dado que este é um estudo para o pós-enceramento do ASMOC, a área total ocupada pelos módulos corresponde a 7.542,7 m² e a área de total utilizada é de 6,2 acres ou 2,50905 hectares.

Figura 18 – Caso A - Geração mensal de energia



Fonte: SAM - NREL.

Na Figura 18 podemos ver a produção mensal estimada de energia ao longo de um ano para a localização do ASMOC com a configuração do Caso A e na tabela 7 alguns parâmetros de rendimento e produção.

Tabela 7 – Caso A - Parâmetros de rendimento e produção

	Valor Métrico
Energia anual (ano 1)	2.102,020 MWh
Fator de capacidade (ano 1)	19,3%
Rendimento energético (ano 1)	1.689 kWh/kW
Razão de desempenho (ano 1)	0.78

Fonte: SAM

4.2.2 Caso B: Módulos Solar Word 340 W e Inversor ABB

Para o do Caso B, com a mesma potência instalada e a mesma razão DC/AC do Caso A, a previsão é de serem usados 3,645 módulos FV, em 405 *string* em paralelo, juntamente com 4 inversores.

A área total ocupada pelos módulos corresponde a 7.053,1 m² e a área de total utilizada é menor do que no caso A, 5,8 acres ou 2,34718 hectares.

A redução do número de módulos e no espaço ocupado ocorre devido a maior eficiência dos painéis monocristalinos.

Na tabela 8 é possível verificar alguns parâmetros de rendimento e produção deste arranjo. A produção mensal de energia segue um perfil similar ao Caso A.

Tabela 8 – Caso B - Parâmetros de rendimento e produção

	Valor Métrico
Energia anual (ano 1)	2.117,572 MWh
Fator de capacidade (ano 1)	19,4%
Rendimento energético (ano 1)	1.697 kWh/kW
Razão de desempenho (ano 1)	0.79

Fonte: SAM

4.2.3 Caso C: Módulos Canadian Solar 320 W e Inversor SMA

Referente ao do Caso C, com a mesma potência instalada e a mesma razão DC/AC dos casos anteriores, a previsão é de serem usados 3,900 módulos FV, em 325 *string*, juntamente com 4 inversores.

A área total ocupada pelos módulos corresponde a 7.053,1 m² e a área de total utilizada é a mesma no Caso A, de 6,2 acres ou 2,50905 hectares.

Na tabela 9 é possível verificar alguns parâmetros de rendimento e produção deste arranjo. A produção mensal de energia segue um perfil similar ao Caso A.

4.2.4 Caso D: Módulos T-Solar Global 370 W e Inversor Sungrow

Relativo ao do Caso D, único caso módulos de tecnologia de filme fino, a mesma potência instalada e a mesma razão DC/AC dos casos anteriores foram adotadas, e a previsão é de serem usados 3,270 módulos FV, em 1,090 *string*, juntamente com 4 inversores.

Tabela 9 – Caso C - Parâmetros de rendimento e produção

Valor Métrico	
Energia anual (ano 1)	2.113,715 MWh
Fator de capacidade (ano 1)	19,3%
Rendimento energético (ano 1)	1.695 kWh/kW
Razão de desempenho (ano 1)	0.79

Fonte: SAM

A área total ocupada pelos módulos corresponde a 18.671,7 m² e a área de total utilizada é de 15,4 acres ou 6,232159 hectares.

Na tabela 10 é possível verificar alguns parâmetros de rendimento e produção deste arranjo. A produção mensal de energia segue um perfil similar ao Caso A.

Tabela 10 – Caso D - Parâmetros de rendimento e produção

Valor Métrico	
Energia anual (ano 1)	2.196,884 MWh
Fator de capacidade (ano 1)	20,3%
Rendimento energético (ano 1)	1.758 kWh/kW
Razão de desempenho (ano 1)	0.82

Fonte: SAM

4.2.5 *Análise Comparativa*

Analisando a tabela 11, é possível verificar o comportamentos de cada arranjo para o primeiro ano de instalação.

Tabela 11 – Análise comparativa dos Estudos de Caso

	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
Quantidade de Módulos	3.888	3.645	3.900	3.270
Quantidade de Inversores	4	4	4	4
Área total ocupada (hectares)	2,509	2,347	2,509	6,232
Produção (ano 1) [MWh]	2.102,02	2.117,572	2.113,715	2.196,884
Rendimento energético [kWh/kW]	1689	1687	1695	1758
Razão de desempenho [%]	0,78	0,79	0,79	0,82
Tecnologia[%]	S. Policristalino	S. Monocristalino	S. Policristalino	Filme Fino

Oberva-se que o Caso A e o Caso C, ambos de tecnologia de Silício Policristalina, obtiveram um desempenho muito semelhante, tanto quanto a previsão da quantidade de módulos

necessários para uma potência instalada de 1,25 MW, como também, para a razão de desempenho e o rendimento energético. Os dois arranjos ocupariam, segundo o software SAM da NREL, a mesma área de 2,509 hectares.

Para o Caso B, diferentemente dos casos anteriores, optou-se pela tecnologia de Silício Monocristalina, como esperado da natureza da tecnologia, este caso apresentou uma redução considerável da quantidade de módulos devido a maior eficiência do painel monocristalino.

O Caso D obteve o melhor desempenho nas simulações realizadas, com razão de desempenho de 0,82%, contudo, para a instalação deste caso será necessário uma área aproximadamente 2,5 vezes maior do que nos Casos A e C. Essa grande diferença na ocupação de área ocorre devido a menor eficiência dos módulos de filme fino, enquanto nos três casos anteriores as eficiências eram entre 16,46% e 17,4%, o módulo empregado no Caso D opera com 6,69% de eficiência.

Por outro lado, considerando-se que o espaço original do ASMOC conta com 78,47 ha destinados à disposição de resíduos, ou seja, área muito superior que as requisitadas nos quatro estudos de caso, não há restrições de espaço na zona onde se pretende instalar a usina solar fotovoltaica.

Visto que não há limitação de superfície, as condições de escolha seriam o custo, a razão de desempenho, como também, o peso, por se tratar de uma área de aterro sanitário que ainda apresentará recalques.

Os quatro casos apresentados levaram em consideração apenas as tecnologias dos módulos, para a irradiação encontrada na área do ASMOC, outras questões precisariam ser analisadas antes da implantação, como a escolha da estrutura de suporte e a cobertura da superfície, que constituem duas considerações de projeto muito importantes para empreendimentos em áreas de aterros sanitários.

Um requisito que deve ser especificado para a instalação elétrica em estudo é ser certificada e marcada para aplicação em atmosfera potencialmente explosiva em conformidade com a série de normas técnicas ABNT NBR IEC 60079 (HAZLOC), caso a área encerrada selecionada ainda tenha emissões fugitivas de gás de aterro e no estudo de classificação de área conforme ABNT NBR IEC 60079-10-1 seja classificada Zona 2.

5 CONCLUSÃO

O estudo mostrou que o aterro da ASMOC, localizado no Estado do Ceará, poderia receber a instalação de um sistema de energia solar fotovoltaica ao longo do período de recebimento de resíduos e também após o fim destas atividades. Portanto, tomando os devidos cuidados técnicos, com verificações quanto à estabilidade e declividade, aos sistemas de controle de lixiviados, gás de aterro e águas pluviais, espessura da cobertura final, e ocorrência de recalques, as instalações apresentadas deveriam ser cada vez mais implementadas em áreas de deposição de resíduos, no caso, aterros sanitários de RSU.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalho futuros, recomendo continuidade de estudo de integração energética de Aterro Sanitário Solar com veículo elétrico coletor e compactador de resíduo sólido urbano, objetivando contribuir com o ProteGEEr. O ProteGEEr é um projeto de cooperação técnica entre o Brasil e a Alemanha para promover uma gestão sustentável e integrada dos resíduos sólidos urbanos, articulada com as políticas de proteção do clima. Além disso, uma análise do potencial ganho econômico que a implantação desse sistema em um aterro sanitário pode trazer.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 20 julho 2018.
- ALBUQUERQUE, J. B. T. de. **Resíduos sólidos**. São Paulo: R Independente Editora e Distribuidora Jurídica, 2012.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 482**. Brasília, 2012.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 687**. Brasília, 2015.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e Minigeração Distribuída**: Sistema de compensação de energia elétrica. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 08 julho 2018.
- BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2010. Lei no 12.305.
- CRESEB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 30 julho 2018.
- ELK, A. G. H. P. van. **Redução de emissões na disposição final**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_publicacao/125_publicacao12032009023918.pdf>. Acesso em: 20 julho 2018.
- ENEL. **Geração Distribuída**. 2016. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicao.com.br/ce/GeracaoDistribuida.aspx>>.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro, 2012.
- GE - GENERAL ELECTRIC. **The Rise of Distributed Power**. 2014. Disponível em: <<https://www.ge.com/sites/default/files/2014%2002%20Rise%20of%20Distributed%20Power.pdf>>. Acesso em: 09 julho 2018.
- LEMO, P. F. I. **Resíduos sólidos e responsabilidade civil pós-consumo**. 2. ed. rev. atual. e ampl. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2012.
- MACHADO, S. L. **Aproveitamento Energético de Aterros Sanitários**: O uso de critérios do aproveitamento energético na escolha de locais para implantação de futuros aterros sanitários. 2007.

MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES. **The Guide to Developing Solar Photovoltaics at Massachusetts Landfills**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.mass.gov/files/documents/2017/10/16/pvlandfillguide_0.pdf>. Acesso em: 11 julho 2018.

MINAS ENERGIA. **Principais mudanças da Resolução 687 da ANEEL**. 2016. Disponível em: <<https://www.minasenergia.com.br/single-post/2016/05/24/Principais-mudan%C3%A7as-da-Resolu%C3%A7%C3%A3o-687-da-ANEEL-1>>. Acesso em: 20 julho 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Leilões de Energia**. 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/destaques-do-setor-de-energia/leiloes-de-energia>>. Acesso em: 30 julho 2018.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **NREL - National Renewable Energy Laboratory**. 2018. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/>>. Acesso em: 31 julho 2018.

NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **System Advisor Model (SAM)**. 2018. Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 31 julho 2018.

PESTANA, L. I. A. **Estudo do recurso solar fotovoltaico: Previsão e dimensionamento de um parque fotovoltaico de média potência**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.

PROCEL - PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. [S.l.], 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20El%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf>. Acesso em: 30 julho 2018.

ROSA, C. B. **Modelagem para Mensuração da competitividade na Geração de Energia Fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

ROSS, D. J. **Construction of Solar Farms on Closed Landfills in Utah**. Dissertação (Mestrado) — Brigham Young University, 2011.

SAMPSON, G. **Solar Power Installations on Closed Landfills: technical and regulatory considerations**. Santa Barbara, 2009.

SCIDADESCIDADES - SECRETARIA DAS CIDADES. **Consórcios Públicos de Resíduos**. 2018. Disponível em: <<http://www.cidades.ce.gov.br/consorcios-publicos-de-residuos/>>. Acesso em: 23 julho 2018.

SCIDADESCIDADES - SECRETARIA DAS CIDADES. **Programa Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. 2018. Disponível em: <<http://www.cidades.ce.gov.br/programa-gestao-integrada-de-residuos-solidos/>>. Acesso em: 23 julho 2018.

SEMA - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO CEARÁ. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos – PERS: Estudos de prospecção e escolha de cenários de referência**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.sema.ce.gov.br/attachments/article/44259/CENARIOS-min.pdf>>. Acesso em: 23 julho 2018.

SEMACE - SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **RIMA - RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL: Projeto de implantação para a ampliação do aterro sanitário metropolitano de caucaia - ce**. [S.l.], 2011.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in brazil. 2013.

SOLANGI, K.; ISLAM, M.; SAIDURA R. RAHIM, N.; FAYAZ, H. **A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews**,. 2011.

TANSEL, B. **Solar Energy Harvesting at Closed Landfill Sites**. 2010.

TOWNSEND, T. G.; POWELL, J.; JAIN, P.; XU, Q.; TOLAYMAT, T.; REINHART, D. **Sustainable practices for landfill design and operation**. 1. ed. New York: [s.n.], 2015.

TYAGI, V.; RAHIM, A. N.; RAHIM, N.; SELVARAJ, J. A. **Progress in solar PV technology: Research and achievement**. 2013.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; NREL - NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Best practices for siting solar photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills**. 2013.