



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

RANIER ALEXSANDER ARRUDA MOURA

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO
ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA**

FORTALEZA

2018

RANIER ALEXSANDER ARRUDA MOURA

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO
ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

FORTALEZA

2018

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)

- M889e Moura, Ranier Alexsander Arruda.
Estimativa do potencial de geração de energia fotovoltaica no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia / Ranier Alexsander Arruda Moura. – 2018.
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.
1. Aterro solar. 2. Aterro sanitário. 3. Energia fotovoltaica. 4. Energia renovável. I. Título.
- CDD 621.042
-

RANIER ALEXSANDER ARRUDA MOURA

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO
ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO OESTE DE CAUCAIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Profª. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Felipe Alves Albuquerque Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Nonata

Às minhas irmãs, Denise e Rochelle

E às minhas sobrinhas, Luiza e Luna.

AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente à minha mãe, que me apoiou e me ajudou a ser uma pessoa melhor durante todos esses anos.

Ao Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire, pela excelente orientação e aos demais professores do curso de Engenharia de Energias Renováveis que contribuíram brilhantemente para a minha formação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios e Me. Felipe Alves Albuquerque Araújo pelo tempo, pelas valiosas colaborações e pelas sugestões.

Ao NUTEC, por ter me acolhido como estagiário de engenharia e me apresentar o tema cujo é abordado neste trabalho.

E aos meus amigos, que tornaram essa caminhada acadêmica um pouco menos árdua e muito mais gratificante.

RESUMO

Aterros solares são aterros sanitários que, uma vez encerrados, passam a produzir energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos instalados em sua cobertura outrora considerada ociosa. Tendo em vista aterros solares internacionais que já estão em operação e pesquisas relacionadas ao tema, este estudo teve como objetivo estimar o potencial de geração fotovoltaica de eletricidade do atual Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC e também da sua futura ampliação, ambos localizados no município de Caucaia – CE. A previsão de geração de potência, em MW, e de energia anual, em MWh, foi calculada com base em: um percentual da superfície total disponível das células de lixo, em m^2 ; na irradiância média incidente, em W/m^2 ; no rendimento médio das placas fotovoltaicas; e no tempo de exposição solar anual, em horas. Finalmente, baseado nos resultados obtidos, onde percebeu-se que 4,55 MW de potência poderia ser gerada utilizando apenas 2% da área disponível das células de lixo do atual ASMOC juntamente com a sua futura ampliação, é esperado que esta pesquisa possa servir de inspiração para pesquisas locais futuras sobre aterros solares e aproveitamento energético, de forma geral, em aterros sanitários.

Palavras-chave: Aterro solar. Aterro sanitário. Energia fotovoltaica. Energia renovável.

ABSTRACT

Solar landfills are landfills that, once closed, begin to produce electricity through photovoltaic systems installed in their previously considered idle cap. Taking into consideration international solar landfills already in operation, and related researches, this paper aims to estimate the potential of photovoltaic electric generation in the current Western Metropolitan Sanitary Landfill of Caucaia – ASMOC, as well as in its future expansion, both located in the city of Caucaia – CE. The prediction of power, in MW, and annual energy, in MWh, was calculated based on: the percentage of waste cells total available surface, in m^2 ; the average incident irradiance, in W/m^2 ; the average yield of photovoltaic panels; and the annual sun exposure time, in hours. Finally, based on the results obtained, where it was noticed that 4,55 MW of power could be generated using only 2% of the waste cells available area from current ASMOC plus its future expansion, it is expected that this study will serve as inspiration for future local researches about solar landfills and energy use in landfills.

Keywords: Solar landfill. Landfill. Photovoltaic energy. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Principais componentes de um sistema fotovoltaico.....	18
Figura 2	– Lixão.....	21
Figura 3	– Aterro controlado.....	22
Figura 4	– Aterro sanitário.....	23
Figura 5	– Instalação fotovoltaica em um aterro sanitário encerrado.....	25
Figura 6	– Aterro solar em Scituate, Estados Unidos. Potência: 3 MW.....	28
Figura 7	– Aterro solar em Easthampton, Estados Unidos. Potência: 2,3 MW.....	29
Figura 8	– Aterro solar em Detmold, Alemanha. Potência: 9,78 MW.....	29
Figura 9	– Vista do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE.....	29
Figura 10	– Situação atual do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE....	30
Figura 11	– Informações pertinentes ao Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE.....	33
Figura 12	– Área de ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Projeções de microgeradores fotovoltaicos.....	19
Gráfico 2 – Estimativa do potencial de geração fotovoltaica para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia antes da sua ampliação.....	39
Gráfico 3 – Estimativa do potencial de geração fotovoltaica para a ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.....	40
Gráfico 4 – Estimativa do potencial de geração fotovoltaica considerando a área atual do Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia e a sua ampliação.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Planilha de potência e de energia anual geradas.....	35
Tabela 2 – Previsão de geração de potência e de energia anual para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia antes da sua ampliação.....	38
Tabela 3 – Previsão de geração de potência e de energia anual para a ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área do Pannel Solar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia
E_g	Energia Gerada
F_c	Fator de Capacidade
FV	Fotovoltaica
GEE	Gases de Efeito Estufa
h	Hora
ha	Hectares
HSP	Horas de Sol Pleno
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
m	Metro
MassDEP	Massachusetts Department of Environmental Protection
m-Si	Silício Monocristalino
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NREL	National Renewable Energy Laboratory
P_g	Potência Gerada
p-Si	Silício Policristalino
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
$R_s(t)$	Radiação Solar Incidente em Função do Tempo
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
s.d.	Sem Data
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
UC	Unidade Consumidora
US EPA	United States Environmental Protection Agency
UTM	Universal Transversa de Mercator
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	A geração de energia fotovoltaica.....	16
2.2	Resíduos sólidos e aterros sanitários.....	19
2.3	O aproveitamento energético via fonte fotovoltaica em aterros sanitários...	23
3	METODOLOGIA	30
3.1	Dados gerais do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC.....	30
3.2	Dados sobre o projeto de ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC.....	32
3.3	Previsão do potencial de geração de energia fotovoltaica para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Devido ao contínuo aumento da consciência ambiental da população aliado aos impactos relacionados ao descarte inadequado do lixo e à necessidade de se explorar fontes alternativas de energia, começou-se a desenvolver ideias que solucionassem não apenas uma dessas problemáticas, mas as duas de forma integrada.

Os aterros sanitários são locais destinados à disposição final de resíduos sólidos de diversas origens, tais como domésticas, de construção civil, industriais e, entre outras. De acordo com a norma NBR 8419/92 da ABNT, a definição de aterro sanitário consiste em:

Uma 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).

Atualmente, estes locais estão sendo alvos de estudos e de projetos para aproveitamento energético através de diversas fontes, como o biogás proveniente da decomposição da matéria orgânica oriunda dos resíduos urbanos e o uso de placas fotovoltaicas nas áreas já finalizadas de um aterro sanitário que eram, até então, consideradas espaços ociosos.

Apesar de esta ideia de aterro solar, ou seja, aterros sanitários que aproveitam seu espaço disponível para a geração de energia fotovoltaica, ser inédita em território nacional, ela já vem sendo empregada em vários países como, por exemplo, Estados Unidos, Alemanha, Japão, Taiwan, Reino Unido, entre outros.

A procura cada vez maior da utilização dos espaços encerrados de aterros sanitários para geração de energia elétrica através do sol pode ser entendida devido a uma quantidade considerável de vantagens. No quesito ambiental, a redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) é um importante fator que beneficia esse tipo de empreendimento. Já no âmbito social, tem-se o surgimento de oportunidades de emprego, que pode ser direcionado para a comunidade local e para suas adjacências. E, na esfera econômica, há também um ganho atrativo para as prefeituras através da compensação do consumo elétrico que, atualmente, é regido pela Resolução Normativa nº 687 de 2015. Com isso, nota-se que a implantação de usinas solares em aterros supre, de forma

completa, os três pilares da sustentabilidade: o ambiental, o social e o econômico. Tornando assim, o empreendimento além de inovador, sustentável.

À vista disso, este Trabalho de Conclusão de Curso procurou analisar as características peculiares de engenharia em aterros solares, tais como o recalque e a estabilidade, o controle de águas pluviais, o gerenciamento de gás de aterro e o monitoramento e a manutenção, além de fazer uma estimativa de potência e energia anualmente geradas no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi propor o uso do espaço ocioso das superfícies das células de disposição final de resíduos já finalizadas do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia para geração de energia elétrica através de placas fotovoltaicas.

A partir disso, são definidos os objetivos específicos, que são:

1. Fazer uma estimativa do potencial de geração fotovoltaica para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia antes e depois da sua ampliação utilizando sua área disponível;
2. Apresentar estudos consolidados relacionados à geração de energia fotovoltaica em aterros sanitários encerrados de outros países do mundo;
3. Elencar as considerações técnicas e de engenharia que devem ser avaliadas em projetos de aterros solares;
4. Evidenciar as vantagens e dificuldades de um empreendimento deste porte e seus benefícios para a região em questão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo introduzir informações julgadas necessárias para o melhor entendimento do trabalho, sendo dividido em três seções.

A primeira seção, intitulada de “A geração de energia fotovoltaica”, aborda os princípios para a conversão da energia oriunda do sol em energia elétrica, os componentes básicos do sistema fotovoltaico, o atual sistema de compensação de energia e o panorama atual desta fonte alternativa de energia no Brasil.

A segunda seção, denominada de “Resíduos sólidos e aterros sanitários”, abrange desde a definição e a classificação dos resíduos sólidos até a sua destinação final em aterros sanitários.

A terceira seção, designada de “O aproveitamento energético via fonte fotovoltaica em aterros sanitários”, engloba os benefícios desse tipo de empreendimento, as considerações técnicas e de engenharia necessárias para a realização deste projeto e alguns casos internacionais de aterros que já utilizam seu espaço encerrado para geração de energia elétrica.

2.1 A geração de energia fotovoltaica

Considerada versátil e facilmente adaptável, a energia solar é uma fonte contínua, limpa e inesgotável de energia. “Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas da energia solar.” (ANEEL, 2002, p. 5). Porém, ao se tratar do uso direto da energia solar, as principais formas de aproveitamento são por energia térmica, através do aquecimento de fluidos, ou pela conversão em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Atualmente, a última é vista como uma das melhores alternativas para auxiliar no suprimento da demanda energética global.

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida com a conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. (RICARDO ALDABÓ LOPEZ, 2012, p. 85).

Segundo Lopez (2012, p. 86), “Um semicondutor é um material que tem um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e de um condutor. Inversamente relacionada à condutividade de um material é sua resistência ao fluxo de carga [...]”

Entre os semicondutores disponíveis para esta aplicação, destaca-se o silício, material que compõe a maioria das células solares ou células fotovoltaicas, que são consideradas a unidade básica para este sistema de geração de energia elétrica. A junção de várias células conectadas eletricamente entre si e encapsuladas para proteção é denominada de módulo fotovoltaico, enquanto que os painéis fotovoltaicos são um ou mais módulos conectados eletricamente em série e/ou paralelo constituindo uma estrutura.

As células fotovoltaicas se dividem em três gerações de acordo com a tecnologia empregada nas suas concepções. A primeira geração é composta por duas linhas de produção distintas: o silício monocristalino (m-Si) e o silício policristalino (p-Si).

Para Lopez (2012) o módulo monocristalino está entre os mais eficientes do mercado (eficiência de 15% a 19%), mas também está entre os de maior custo, devido à pureza requerida e ao processo de fabricação. As células deste módulo são formadas através de cortes de um pedaço de silício proveniente de um cristal uniforme e único.

De acordo com Villalva e Gazolli (2012), “Já as células de silício policristalino têm eficiências comerciais de 13% a 15%; porém o seu custo de fabricação é menor que o das células monocristalinas, o que compensa essa redução de eficiência.” (apud Lopes, 2017, p. 40).

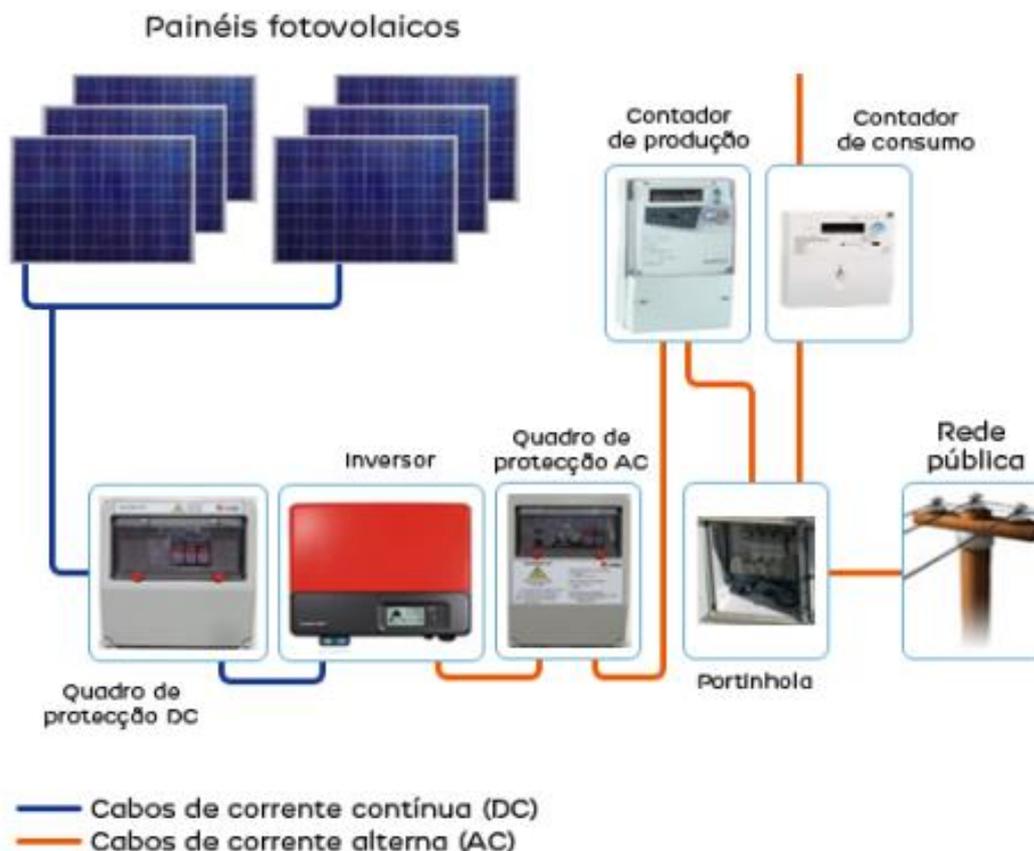
A segunda geração é constituída pelos módulos de película fina ou filmes finos, que, apesar de não ser tão presente no mercado em relação às anteriores, vem ganhando mais espaço devido à sua maior versatilidade e menor custo de produção. Segundo Lopez (2012, p. 97), “Os módulos de película fina são construídos depositando camadas extremamente finas de materiais fotossensíveis sobre suportes de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou plástico.”

De acordo com Pinho e Galdino (2014), “A terceira geração [...] divide-se em três escalas produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração, células sensibilizadas por corante e células orgânicas ou poliméricas.” (apud Lopes, 2017, p. 41).

Além dos módulos fotovoltaicos já mencionados, o sistema fotovoltaico é um agrupamento de dispositivos, que, juntos, convertem diretamente a energia solar em energia elétrica. Segundo a ABNT (2008), “Seus principais componentes são os painéis fotovoltaicos e inversores, incluindo dispositivos de controle e proteção, estrutura de suporte, fiação e em alguns casos dispositivos de armazenamentos (baterias).” (apud

Torres, 2012, p. 73). Na figura 1 é demonstrado um esquema simplificado dos principais componentes de um sistema fotovoltaico.

Figura 1 – Principais componentes de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Microgeração de Energia (2012).

A utilização destes sistemas fotovoltaicos para compensação de energia elétrica em residências, em indústrias, em comércios, em escolas, entre outros, são regidos, atualmente, pela Resolução Normativa nº 687/2015 que é uma atualização da Resolução Normativa nº482/2012.

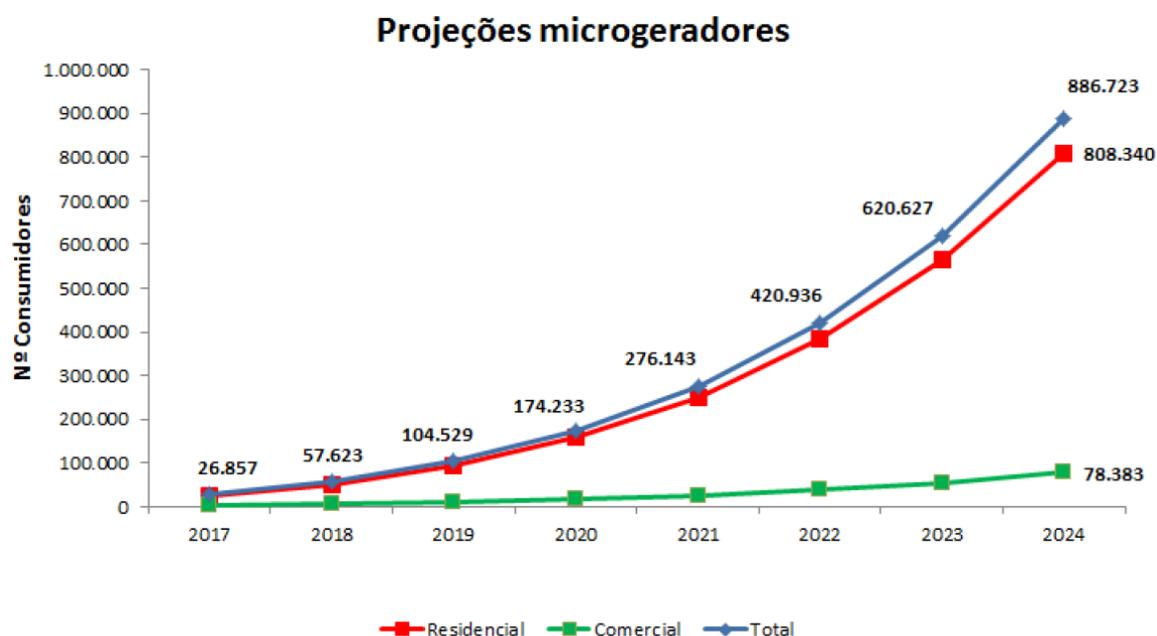
Esse sistema de compensação de energia elétrica permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente (ANEEL, 2016).

A micro e minigeração são centrais geradoras de energia elétrica que utilizam cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia. A primeira com potência instalada até 75 kW e a segunda entre 75 kW e 5 MW, exceto para fonte hídrica que é até 3 MW (ANEEL, 2015).

Devido a esse incentivo nacional para a geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, que foi formalizado através das resoluções normativas, além da isenção de outros impostos, como o ICMS, por exemplo, o número de instalações de sistemas fotovoltaicos para geração distribuída cresceu e continuará crescendo de forma exponencial em território brasileiro.

No Gráfico 1, é apresentado uma projeção da quantidade de microgeradores de sistemas fotovoltaicos para os próximos anos.

Gráfico 1 – Projeções de microgeradores fotovoltaicos.



Fonte: BlueSol (2018).

2.2 Resíduos sólidos e aterros sanitários

Segundo a Norma Brasileira nº 10.004 (2004), resíduos sólidos são conceituados como “[...] resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.”

Para Santaella et al. (2014) a definição de resíduos sólidos modificou ao longo do tempo, devido aos avanços tecnológicos, à conscientização ambiental e à necessidade financeira de reaproveitamento de materiais que não são mais proveitosos para determinado objetivo, mas podem servir de matéria prima para outro. Esta definição

oscila de acordo com a época, a cultura, o lugar, o clima, os hábitos e a condição socioeconômica de uma sociedade

De acordo com a Lei nº 12.305 (2010), no Título III – Das diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos

Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I – quanto à origem:

- a) Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);
- h) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

II – quanto à periculosidade:

- a) Resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;

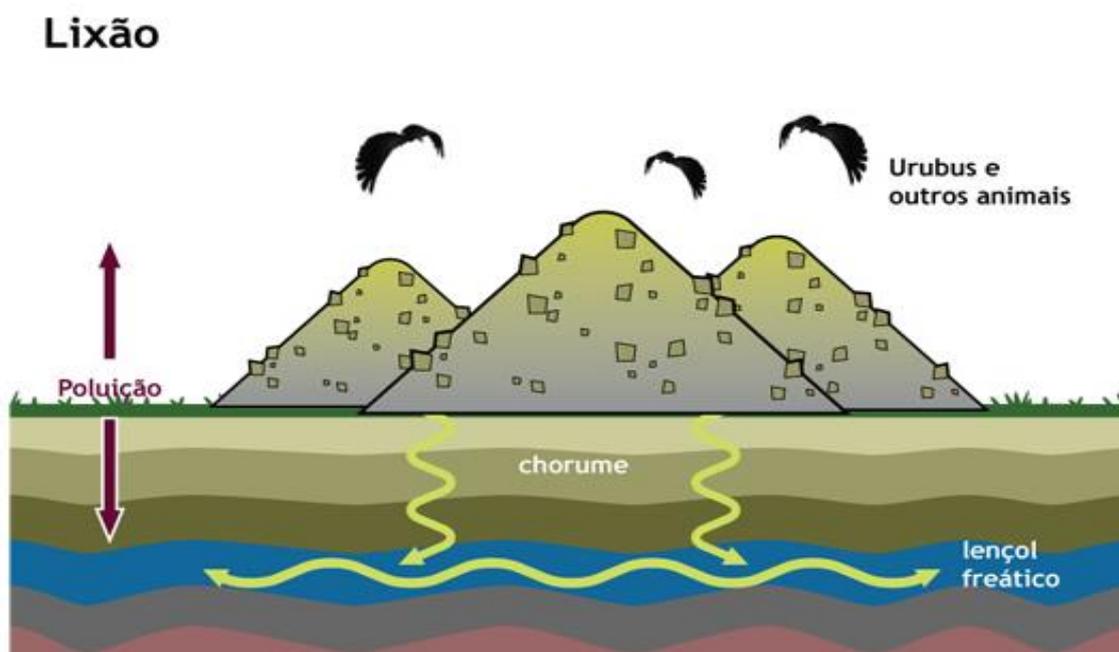
b) Resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

Parágrafo único. Respeitando o disposto no art. 20, os resíduos referidos na alínea “d” do inciso I do *caput*, se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo Poder Público municipal.

Além desta classificação da Lei nº 12.305 de 2010, existem também outros tipos de classificações que são usados na prática, dependendo da finalidade, como, por exemplo: quanto à composição química (orgânico e inorgânico), quanto à degradabilidade (facilmente degradável, degradável, pouco degradável, dificilmente degradável e não degradável), quanto aos riscos de contaminação ao meio ambiente (grupo A – risco biológico, grupo B – risco químico, grupo C – rejeito radioativo e grupo D – resíduo comum) e quanto a periculosidade (classe I – perigoso e classe II – não perigoso, dividindo-se em subclasse IIA – não inerte e subclasse IIB – inerte). (SANTAELLA ET AL., 2014).

Acerca da disposição final de resíduos sólidos as principais opções são: lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Para Santaella et al. (2014), lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos que se caracteriza pela simples descarga destes sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Na Figura 2, é apresentada uma ilustração esquemática de um lixão.

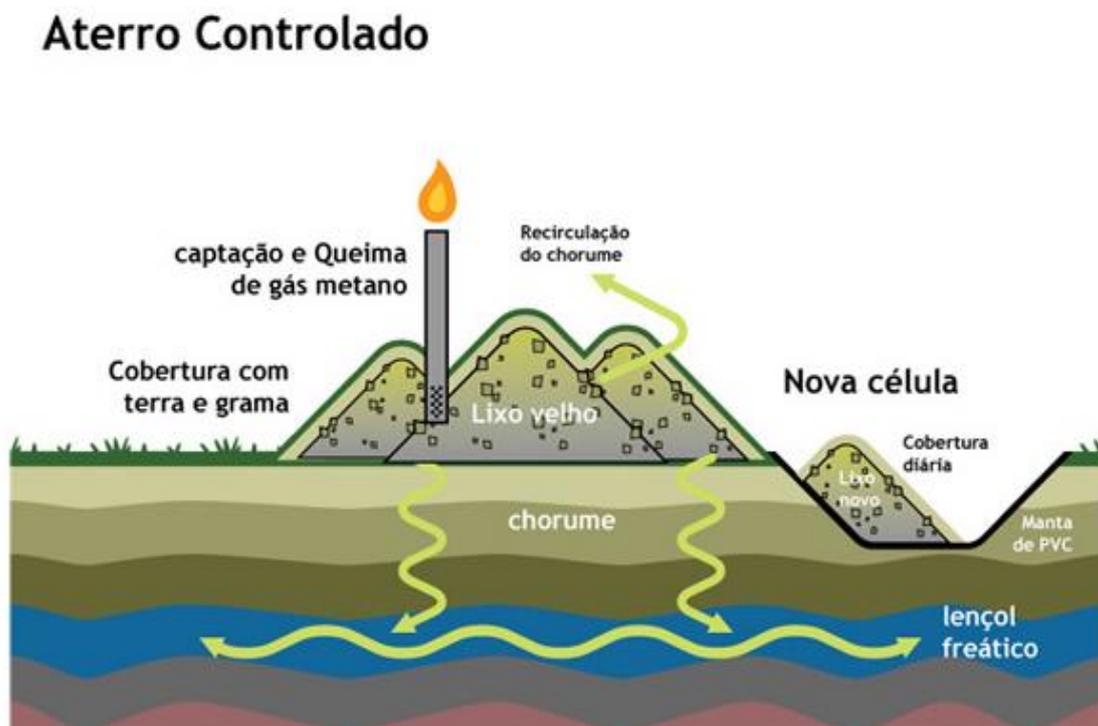
Figura 2 – Lixão.



Fonte: Infoenem (2015).

“Por sua vez, o aterro controlado é outra forma de deposição de resíduo, tendo como único cuidado a cobertura dos resíduos com uma camada de solo ao final da jornada diária de trabalho com o objetivo de reduzir a proliferação de vetores de doenças.” (CASTILHOS JUNIOR, 2003, p. 2). E, segundo Santaella et al. (2014, p. 26), “Trata-se de uma forma de disposição melhor que a do lixão, porém ainda inadequada e não recomendada tecnicamente”. O esquema de um aterro controlado é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Aterro controlado.



Fonte: Infoenem (2015).

De acordo com Calderoni (2003), “A diferença básica entre os aterros controlados e os sanitários é a ausência de impermeabilização no primeiro modelo, isso faz com que sejam acentuados os riscos de contaminação dos lençóis freáticos.” (apud Almeida, 2009, p. 8).

Segundo Castilhos Junior (2003, p.19), “Atualmente, o método de tratamento de resíduos sólidos urbanos mais utilizado, e que apresenta menor custo, consiste em sua estocagem no solo por intermédio da técnica de aterro sanitário.”

Esta técnica, de acordo com Santaella et al. (2014, p. 26)

É fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, para confinar os resíduos de forma segura e minimizar os impactos ambientais negativos. O solo é preparado antes da deposição dos resíduos sólidos com uma camada de argila ou coberto com mantas poliméricas (sintéticas) para impermeabilização. Deste modo, o chorume é drenado e conduzido a uma estação de tratamento de efluentes. Os gases produzidos (especialmente metano e sulfídrico) são coletados em extravasores e, posteriormente, queimados ou utilizados como combustível no próprio aterro. No aterro sanitário, os compartimentos para disposição dos resíduos sólidos são dimensionados de tal forma que devem ser preenchidos em períodos específicos. Os resíduos sólidos depositados são compactados com um trator e recobertos diariamente com cerca de 20 cm de solo, para não produzir maus odores e não atrair insetos, roedores e aves.

Na Figura 4, é demonstrado, de forma esquemática, o aterro sanitário.

Figura 4 – Aterro sanitário.

Aterro Sanitário



Fonte: Infoenem (2015).

2.3 O aproveitamento energético via fonte fotovoltaica em aterros sanitários

A instalação de usinas fotovoltaicas nas superfícies encerradas de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um atraente investimento para o pós uso dessas áreas. Além de ser uma forma de reutilizar esse espaço, há a vantagem de gerar energia através de uma fonte alternativa e sustentável (KUEHLE-WEIDEMEIER, 2010).

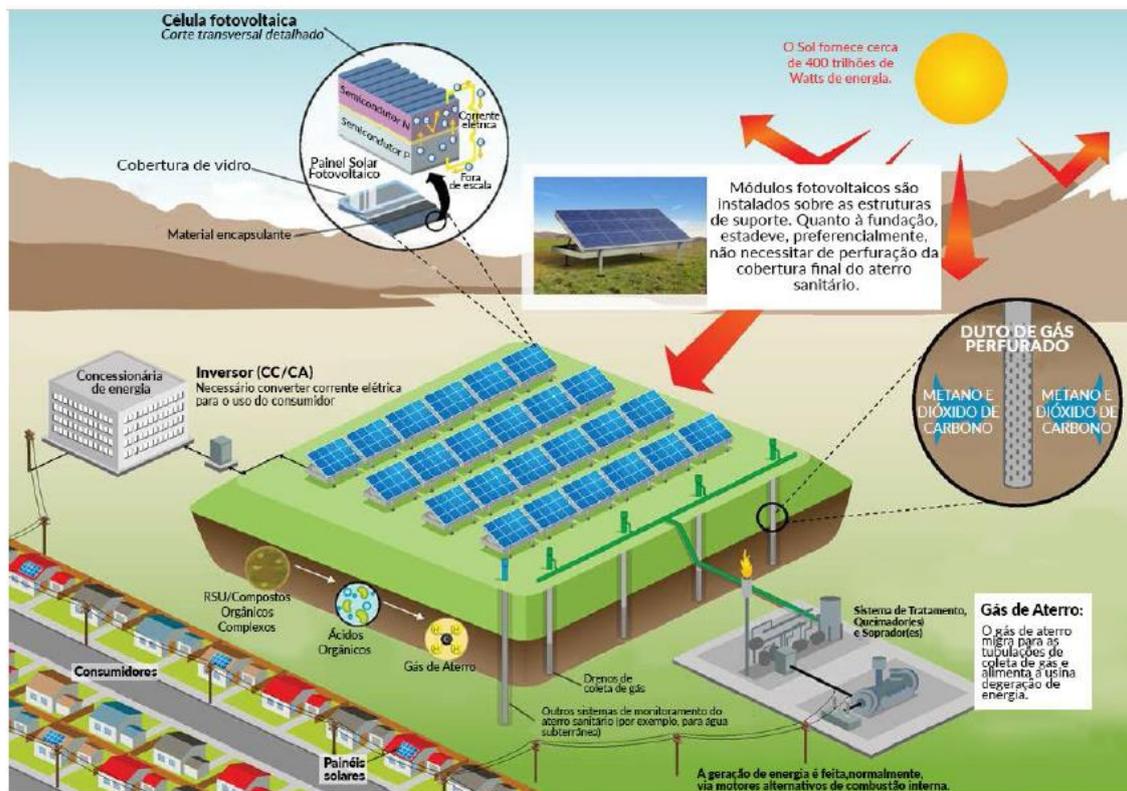
Para Bramryd (1997 apud MARINELA et al., 2016), os terrenos contaminados ou os aterros sanitários geralmente têm condições ambientais inadequadas para comércios ou residências, além de possuir uma baixa demanda. Porém, estes espaços oferecem uma área que poderia ser utilizada para a geração de energia fotovoltaica, uma vez que estas instalações seriam menos propensas a envolver preocupações da comunidade e impactos estéticos.

Através da *RE-Powering America's Land Initiative*, uma iniciativa estadunidense que identifica o potencial de energia renovável para propriedades potencialmente contaminadas, aterros sanitários e minas, além de fornecer outros recursos úteis para comunidades, desenvolvedores, indústrias, governos estaduais ou qualquer pessoa interessada em reutilizar esses espaços para a geração de energia renovável, a *United States Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) ou Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos identificou vários benefícios para a instalação de placas fotovoltaicas em terrenos potencialmente contaminados e aterros de RSU (U.S. EPA & NREL, 2013):

- Podem proporcionar um reuso economicamente viável para lugares que tenham um custo significativo de limpeza ou baixa demanda de desenvolvimento pelos governos;
- Podem possuir condições ambientais que sejam inadequadas para a revitalização dos setores comercial e residencial;
- Podem ser desenvolvidas em lugares com espaço aberto limitado, preservando a terra como sumidouro de carbono e/ou para outros serviços do ecossistema;
- Geralmente estão situadas próximas a estradas e infraestruturas de transmissão ou distribuição de energia;
- Podem ser adequadamente definidas como zonas de energia renovável;
- Podem proporcionar oportunidades de emprego em comunidades urbanas e rurais;
- Podem estimular o avanço de tecnologias mais limpas e mais rentáveis;
- Podem reduzir os impactos ambientais de sistemas de energia (por exemplo, reduzir as emissões de gases de efeito estufa).

Na Figura 5, é apresentado um esquema de um aterro sanitário encerrado com instalações fotovoltaicas em sua superfície, i.e., um aterro solar

Figura 5 – Instalação fotovoltaica em um aterro sanitário encerrado.



Fonte: LOPES (2017), modificado de PV Navigator citado por U.S. EPA & NREL (2013).

Vários aterros de RSU são adequados para a instalação de placas solares fotovoltaicas, porém, nem todos são candidatos ideais para este tipo de projeto. Por esse motivo, os aterros candidatos a usarem suas superfícies para aproveitamento energético via fonte fotovoltaica devem ser cuidadosamente avaliados e selecionados (U.S. EPA & NREL, 2013).

As características que podem tornar os aterros de RSU adequados para este tipo de empreendimento são: serem localizados próximos a infraestruturas críticas, como linhas de transmissão de energia elétrica e estradas, estarem próximos a áreas com alta demanda de energia, terem sido construídos em largas áreas de baixa declividade o que é necessário para uma instalação ótima das estruturas fotovoltaicas, oferecerem baixos custos de terras ao se comparar com espaços abertos e poderem participar do sistema de compensação de energia elétrica, além de estarem aptos para receber projetos maiores (U.S. EPA & NREL, 2013).

Há também alguns desafios que devem ser analisados e estudados nesse tipo de projeto, como: restrições relacionadas à permissão do uso do espaço, problemas com

recalques, restrições da cobertura final, limites de peso/carga, design do sistema, distância de pontos de interconexões e topografia e declividade (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES, 2012).

De acordo com o Departamento de Proteção Ambiental de Massachusetts ou *Massachussets Department of Environmental Protection* (2012), existem quatro principais critérios que devem ser atendidos para o uso de um sistema fotovoltaico em uma área de pós-encerramento de um aterro sanitário:

- Recalque e estabilidade;
- Controle de águas pluviais;
- Gerenciamento de gás de aterro;
- Monitoramento e manutenção.

Engenheiros geralmente diferenciam o recalque em aterros sanitários em dois tipos: o recalque real e o recalque projetado. O recalque real pode ser identificado através de um processo de inspeção do local, enquanto o recalque projetado pode ser estimado através de variáveis como a compressão, a biodegradação e a volatilidade dos resíduos sólidos (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES, 2012).

Além da classificação do recalque em real e projetado, para U.S. EPA & NREL (2013) o recalque em aterros sanitários também pode se dividir em recalques uniforme e diferencial. O primeiro ocorre quando o resíduo sólido decai uniformemente em taxas semelhantes ou uniforme ao longo de uma grande área. Normalmente, esse tipo não traz preocupações para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Já o segundo ocorre quando o resíduo sólido decai em diferentes taxas ao longo do aterro, geralmente devido a sua composição, resultando em um recalque desigual ao longo da cobertura final. O recalque diferencial é uma preocupação significativa, pois pode causar um desalinhamento das configurações do arranjo fotovoltaico, reduzindo a produção de energia.

Independentemente dos tipos de recalques, as taxas que ambos ocorrem variam de acordo com a idade da cobertura do aterro e com a composição do material. Quanto mais recente for feita a cobertura final do aterro, maiores são as taxas de recalque, reduzindo apenas ao longo dos anos. Por esse motivo, sistemas fotovoltaicos em aterros recentemente finalizados (até dois ou três anos) são evitados (U.S. EPA & NREL, 2013).

Através de um estudo dos recalques, o impacto previsto pela estrutura fotovoltaica pode ser avaliado e revisado. A fundação do sistema fotovoltaico deverá evitar o acúmulo de água e, de forma geral, mantê-la fora do aterro enquanto conserva a integridade do sistema de cobertura final para controlar as emissões de gases. O projeto da fundação deverá ser estável, capaz de suportar o peso do próprio sistema e flexível o suficiente para se adequar a possíveis recalques (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES, 2012).

O controle da água pluvial é necessário para prevenir a erosão e manter o sistema de cobertura final do aterro sanitário, além de prevenir impactos adversos a vizinhança. A cobertura vegetal é frequentemente usada para o manejo de águas pluviais, portanto, pode haver restrições na área do aterro que poderá ser coberta pela fundação do sistema fotovoltaico (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES, 2012).

As coberturas dos aterros são tipicamente projetadas para absorver parte do escoamento da água da chuva por meio da camada de vegetação, ao mesmo tempo em que proporciona um escoamento adicional para se infiltrar em uma camada de solo subjacente, onde pode ser transportado para lagoas de retenção ou outras áreas de descarga. Por este motivo, é importante entender como os componentes do sistema fotovoltaico podem interagir com o sistema de gerenciamento de águas pluviais já existente e elencar as alternativas viáveis de projeto que atendem aos requisitos regulatórios (U.S. EPA & NREL, 2013).

Além disso, para regiões com precipitação limitada ou déficit de recurso hídrico, existe a possibilidade do reuso das águas pluviais para limpar os módulos fotovoltaicos. Neste caso, um sistema de tratamento de água poderia ser utilizado para remover os minerais da água da chuva e evitar a deposição de resíduos nos módulos (U.S. EPA & NREL, 2013).

Para o *Massachusetts Department of Energy Resources* (2012), o impacto do sistema fotovoltaico no plano de gerenciamento de gás do aterro sanitário também deverá ser analisado com foco no sistema de controle, nas características e nas rotas de migração deste gás. O impacto do projeto proposto do sistema fotovoltaico deve garantir proteção à saúde pública (evitando o escape de compostos tóxicos no ambiente), à segurança pública (evitando explosão, incêndio ou asfixia) e ao bem-estar da comunidade (evitando odores desagradáveis).

O carregamento e o posicionamento do sistema fotovoltaico em relação aos sistemas de lixiviado e de gás de aterro devem ser considerados na avaliação da viabilidade deste projeto. A capacidade de suporte de peso dos sistemas de tubulação e de coleta, assim como o peso dos caminhões e equipamentos que serão utilizados nas fases de preparação e construção do local da instalação fotovoltaica também devem ser analisados (U.S. EPA & NREL, 2013).

Outro ponto importante é a localização dos painéis fotovoltaicos a uma distância segura da coleta, do monitoramento, do armazenamento, da queima e de outros sistemas de geração de energia, pois o gás de aterro sanitário é explosivo e, se um sistema fotovoltaico estiver próximo das operações do gás de aterro, o potencial de ocorrer centelhas deste sistema pode apresentar risco de explosão. (U.S. EPA & NREL, 2013).

Após atendido estes critérios, o projeto proposto da instalação do sistema fotovoltaico deverá ser revisado para assegurar que a manutenção a longo prazo poderá ser executada conforme previsto. O projetista deste sistema precisará garantir que a água não penetrará, nem o gás escapará do aterro. Um sistema mal projetado pode ocasionar em custos futuros devido à instabilidade, à erosão, à quebra da cobertura final ou ao supercrescimento da vegetação (MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES, s.d.).

Nas Figuras 6 a 8 são apresentados exemplos internacionais de aterros solares.

Figura 6 – Aterro solar em Scituate, Estados Unidos. Potência: 3 MW.



Fonte: Ener G (2014).

Figura 7 – Aterro solar em Easthampton, Estados Unidos. Potência: 2,3 MW.



Fonte: Waste 360 (2012).

Figura 8 – Aterro solar em Detmold, Alemanha. Potência: 9,78 MW.



Fonte: PV Europe (2017).

3 METODOLOGIA

3.1 Dados gerais do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC

De acordo com Linard e Aquino (2015), o ASMOC está localizado na rodovia BR 020, no município de Caucaia/CE. A natureza dos RSUs dispostos neste aterro é doméstica, industrial (classe II) e pública (varrição, poda de árvores). O aterro apresenta uma área total de 123 ha, dos quais 78 ha destinam-se ao recebimento dos RSUs. (apud Ribeiro et al. 2018, p. 3).

Já segundo Brilhante (2006), este aterro possui uma área total de 120 ha, onde 2,35 ha é de área de administração, 3,19 ha é de área do sistema viário, 78,47 ha é de área de células, 7,04 ha é de área de preservação do contorno e 28,95 ha é de área de preservação de 1ª e 2ª categoria (apud Assunção, 2008, p. 75).

Na Figura 9 é apresentado uma vista lateral do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.

Figura 9 – Vista do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE.



Fonte: Espiral - UFC (2015).

parte do solo escavado e do entulho trazido diariamente pelas rampas de acesso que levam ao ponto de descarrego. (MOREIRA, 2010).

Neste ponto os caminhões descarregam o material, que é transportado por tratores de esteiras até o grande volume de resíduos. Posteriormente, um trator de rolo compressor faz a compactação das camadas de lixo e também da camada de cobertura, que também é trazida pelos tratores de esteira. Após o descarrego, os caminhões avançam novamente até a portaria. Lá eles recebem os tickets com as pesagens, e seguem para sair do aterro. (MOREIRA, 2010).

3.2 Dados sobre o projeto de ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC

A implementação da ampliação do ASMOC vem suprir uma necessidade básica de infraestrutura para os municípios de Fortaleza e Caucaia. Estes, atualmente, desfrutam de um aterro sanitário para a disposição final de seus resíduos sólidos, porém o mesmo está com sua vida útil reduzida e em fase de planejamento de desativação e de encerramento (LIMA ET AL., 2011).

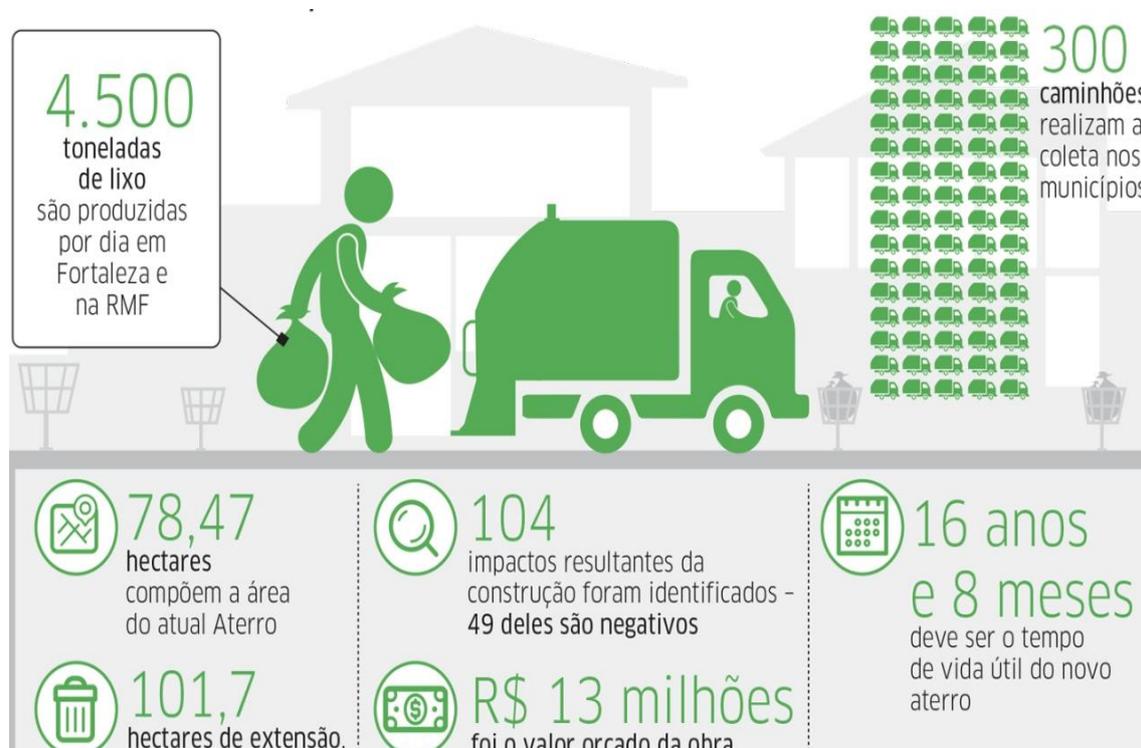
Segundo Moreira (2010) o ASMOC completou doze anos de operação em 2010, onde, na época, já tinha 70% da sua capacidade ocupada. Este aterro deveria ter uma vida útil de 15 anos, porém teve seu prazo aumentado devido a um maior rigor adotado na compactação dos RSUs, que passaram a ser realizadas por rolos compactadores de 24 toneladas a partir do ano de 2002, e também devido à presença de catadores de lixo no processo da coleta. Além disso, existe a possibilidade de aproveitar o espaço entre as trincheiras já desativadas. Esta solução daria uma sobrevida de 60 meses, garantindo a operação do aterro até o ano de 2020.

Para Lima et al. (2011) a concepção do projeto de ampliação do ASMOC se fundamentou, essencialmente, em critérios de engenharia e de normas específicas operacionais, tendo em vista o objetivo de reduzir os impactos ambientais e sociais.

Além de ser claramente urgente um projeto de ampliação deste aterro, tendo em vista a necessidade da disposição final ecologicamente correta dos RSUs dos municípios de Fortaleza e de Caucaia, também é importante que se proceda à desativação e o encerramento gradual da área atual do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, de forma que, na medida em que for procedendo a instalação da ampliação da nova área, a área antiga seja continuamente desativada e encerrada (LIMA ET AL., 2011).

Na Figura 15 é ilustrado, de forma esquemática, a área atual do aterro que é utilizada para a disposição final dos RSUs da cidade de Fortaleza e da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a área da ampliação do novo aterro que está sendo construído ao lado do antigo, a quantidade de lixo produzido por dia em toneladas em Fortaleza e RMF, a quantidade de caminhões que operam na coleta de resíduos destes municípios, a quantidade de impactos resultantes da construção do empreendimento, o valor da obra e a vida útil do novo aterro sanitário.

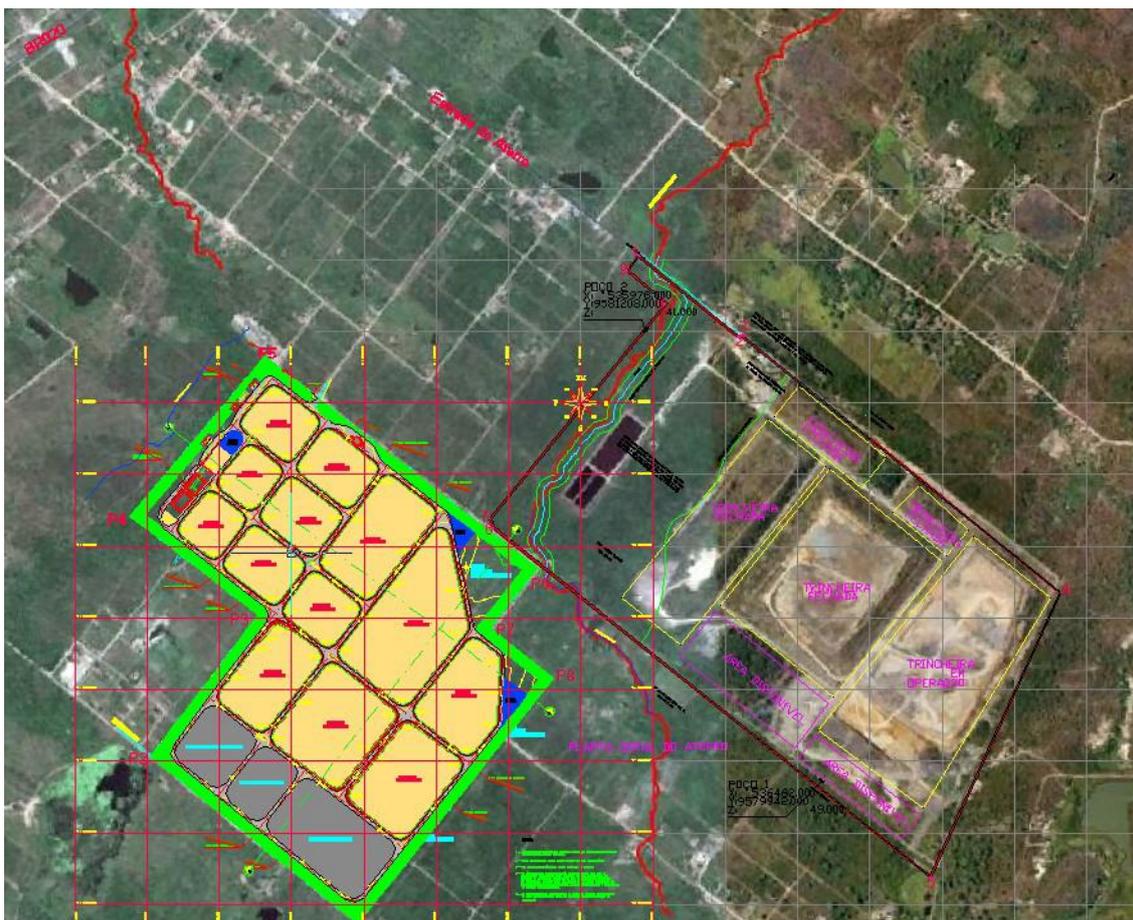
Figura 11 – Informações pertinentes ao Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE



Fonte: Diário do Nordeste (2018).

Também de acordo com Lima et al. (2011), o projeto de ampliação do ASMOC será implantado em uma área total de células de lixo correspondente a 73,36 ha dentro de uma área total de 101,70 ha. Esta ampliação ocorrerá na Fazenda Carrapicho. Na Figura 16 é apresentada uma vista aérea da localização do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE, identificando sua área reservada para as células de destinação final de resíduos.

Figura 12 – Área de ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE.



Fonte: ECOSAM (2011) citado por Lima et al. (2011).

“Neste projeto foram definidas um total de 13 áreas para células durante treze etapas de alteamento. Ressalta-se que as etapas serão implantadas em sequência, conforme indicada nas plantas, após o término de cada operação.” (LIMA et al., 2011, p. 11).

3.3 Previsão do potencial de geração de energia fotovoltaica para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE

Para a previsão de potência e de energia fotovoltaica geradas foi criada uma planilha no Excel 2016, onde o dado de entrada é a área total do terreno em m^2 , que em seguida é convertido em área disponível para a produção de energia também em m^2 . Os dados de radiação solar incidente, em W/m^2 , de rendimento do sistema fotovoltaico e de tempo de exposição solar anual, em h, são considerados constantes. Com isso, são gerados

os dados de saída, que são a potência esperada, em MW, e a energia gerada anualmente, em MWh. O esquema da planilha é apresentado a seguir na Tabela 1.

Tabela 1 – Planilha de potência e de energia anual geradas.

Caso	Área total (m ²)	Área disponível (m ²)	Radiação Solar Incidente (W/m ²)	Rendimento da Placa Fotovoltaica	Tempo de exposição solar anual (h)	Potência gerada (MW)	Energia anual (MWh)
1			1000	0,15	2190		
2			1000	0,15	2190		
3			1000	0,15	2190		
4			1000	0,15	2190		
5			1000	0,15	2190		

Fonte: elaborada pelo autor (2018).

As áreas totais, em m², que foram utilizadas no desenvolvimento deste trabalho são correspondentes tanto às células de destinação final de resíduos já desativadas do antigo Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia quanto às células que estão sendo projetadas para a ampliação do mesmo. A partir destes valores totais, foram retirados 2, 4, 6, 8 e 10% para compor a área disponível do sistema fotovoltaico que produzirá, de fato, a energia, totalizando dez casos distintos para serem comparados.

Segundo López (2012), a potência gerada (P_g) de um painel solar pode-se dar através da Equação (1):

$$P_g = \eta \cdot A \cdot R_S(t), (1)$$

“Onde: η é o rendimento do sistema, composto pelo rendimento do painel solar mais o rendimento do sistema de condicionamento da potência; A é a área do painel solar; R_S é a radiação solar incidente em função do tempo.” (LOPEZ, 2012, p. 94).

A potência instalada é determinada como a potência alcançada pelo conjunto receptor enquanto o sistema está submetido à insolação máxima. Este valor pode variar de acordo com as condições locais de insolação, do tipo de configuração (com ou sem armazenamento) e do uso do sistema. O valor típico utilizado para a radiação solar máxima é de 1.000 W/m² (LOPEZ, 2012).

Para Pinho e Galdino (2014), o número de Horas de Sol Pleno (HSP) é uma grandeza que corresponde a quantidade de horas em que a irradiância solar seja constante

e igual a 1.000 W/m^2 , de modo que a energia resultante seja equivalente à energia disponibilizada pelo Sol em determinada localidade e acumulada ao longo de um dia. Em um dia ensolarado a irradiação, por exemplo, é de 6 kWh/m^2 , com isso, o número de HSP é dado através da seguinte expressão:

$$HSP = \frac{6 \text{ kWh/m}^2}{1 \text{ kW/m}^2} = 6 \frac{\text{h}}{\text{dia}}$$

O valor da HSP adotada neste trabalho foi de 6 h/dia, tendo em vista que a maioria dos dias do município em questão são ensolarados. Na planilha em questão o tempo de exposição solar anual foi obtido através do produto entre o número de HSP e a quantidade de dias em um ano (365 dias), resultando em 2.190 horas.

Segundo Palz (2002), quando as células solares de silício são submetidas à iluminação máxima com luz solar no solo, seu rendimento teórico máximo de conversão fotovoltaica pode chegar a 23%. Porém, os rendimentos alcançados destas células em escala comercial variam apenas entre 10 e 15% (terrestres). Em escala de laboratório estes valores podem chegar entre 17 e 19%. Para Lopez (2012), este rendimento depende do material utilizado, das técnicas de fabricação empregadas, de temperaturas, além de outros fatores externos.

O valor adotado do rendimento da placa fotovoltaica deste trabalho nos cálculos de previsão de potência e de energia anual gerada foi de 15%.

Também de acordo com Lopez (2012), a energia gerada anualmente por um sistema fotovoltaico é dada pela Equação (2):

$$E_g = P \cdot F_c \cdot 8760 \text{ h/ano}, (2)$$

“Onde: F_c é o fator de capacidade, que depende de fatores como disponibilidade de insolação, perdas no sistema e capacidade instalada.” (LOPEZ, 2012, p. 95). P é definido como a potência.

Este fator de capacidade é definido por Lopez (2012, p. 119) como “quantidade de energia que um sistema produz como uma porcentagem da quantidade total que produziria se houvesse operado com capacidade plena durante o ano.”

Porém, vale notar que as 24 horas dos 365 dias do ano não serão aproveitadas para a conversão fotovoltaica, como é sugerido na equação anterior por Lopez. Por este

motivo, como já foi citado anteriormente, neste trabalho considerou-se que apenas 6 h/dia serão realmente aproveitadas ao longo do ano, totalizando um tempo de exposição solar anual de 2.190 horas, o que leva a Equação (3):

$$E_g = P.2190h/ano, (3)$$

O fator de capacidade foi considerado constante e igual a 1 para simplificação de cálculos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 é apresentada a previsão de geração de potência (MW) e energia anual (MWh) com base nas áreas das células de lixo já finalizadas do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia antes da sua ampliação. A área total destinada a estas células é de 78,47 ha, e a partir deste valor, foi realizado cinco casos distintos que contemplem 2, 4, 6, 8 e 10% (1º, 2º, 3º, 4º e 5º caso, respectivamente) desta área total apenas para a cobertura com placas fotovoltaicas. Vale salientar que, nesta área útil para a previsão da geração fotovoltaica, foram consideradas apenas as placas; outros componentes do sistema fotovoltaico, como inversores, cabeamentos e reguladores de carga, não estão inseridos neste espaço, uma vez que a área demandada por estes equipamentos é significativamente inferior à demandada pelas placas.

Tabela 2 – Previsão de geração de potência e de energia anual para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia antes da sua ampliação.

Caso	Área total (m ²)	Área disponível (m ²)	Radiação Solar Incidente (W/m ²)	Rendimento da Placa Fotovoltaica	Tempo de exposição solar anual (h)	Potência gerada (MW)	Energia anual (MWh)
1	784700	15694	1000	0,15	2190	2,35	5155,48
2	784700	31388	1000	0,15	2190	4,71	10310,96
3	784700	47082	1000	0,15	2190	7,06	15466,44
4	784700	62776	1000	0,15	2190	9,42	20621,92
5	784700	78470	1000	0,15	2190	11,77	25777,39

Fonte: elaborada pelo autor (2018).

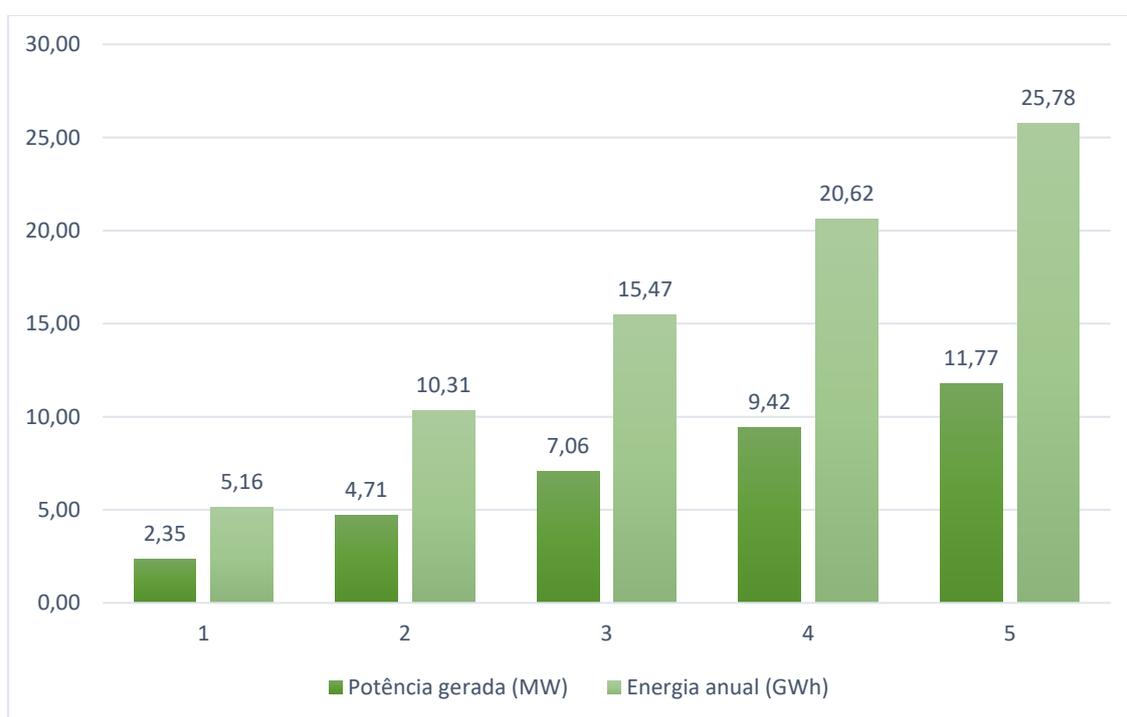
Tomando como base os dados da Tabela 2, percebeu-se que, mesmo utilizando uma parcela pequena da área total das células de lixo já finalizadas para se estimar a previsão do potencial energético fotovoltaico, os valores encontrados de potência gerada, em MW, e de energia anual gerada, em MWh, foram consideravelmente altos.

Com isso, notou-se que, apenas nos casos 1 e 2 os possíveis sistemas fotovoltaicos poderiam ser enquadrados, através da Resolução Normativa N° 687, na categoria de minigeração distribuída, uma vez que os valores das potências geradas foram inferiores à 5 MW (2,35 MW para o primeiro e 4,71 MW para o segundo). Nos demais casos, as potências foram superiores à 5 MW (7,06 MW para o terceiro, 9,42 MW para o

quarto e 11,77 MW para o quinto), fazendo com que os mesmos não pudessem ser regidos pela resolução citada e, conseqüentemente, não pudessem se beneficiar do Sistema de Compensação de Energia Elétrica.

Para um melhor entendimento dos dados da tabela acima, o Gráfico 2 foi elaborado para ilustrar a potência gerada, em MW, e a energia gerada anualmente, em GWh, em cada um dos cinco casos mencionados anteriormente.

Gráfico 2 – Estimativa do potencial de geração fotovoltaica para o Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia antes da sua ampliação.



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Na Tabela 3, a potência e a energia anualmente geradas foram estimadas com base nos dados do projeto de ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, onde o mesmo ainda está em fase de construção. A área total prevista para ser utilizada como células de lixos deste empreendimento será de 73,36 ha e, da mesma forma que foi realizado na Tabela 2, foram retirados cinco casos para compor a área disponível para o aproveitamento fotovoltaico, cada um com 2, 4, 6, 8 e 10% da área total, respectivamente.

Tabela 3 – Previsão de geração de potência e de energia anual para a ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.

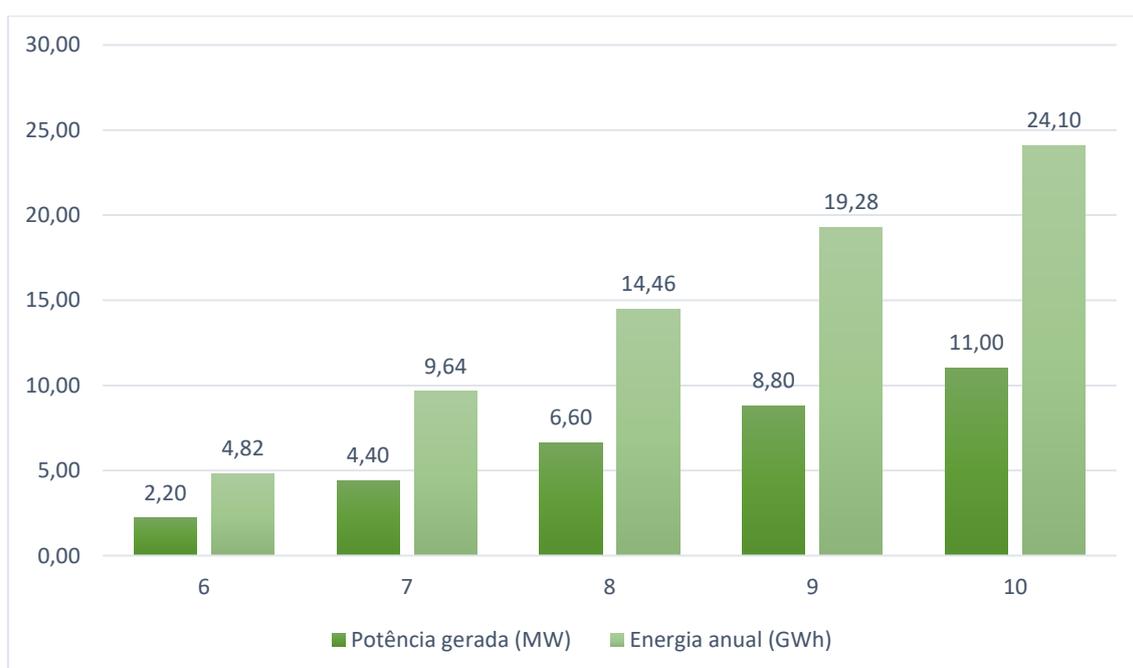
Caso	Área total (m ²)	Área disponível (m ²)	Radiação Solar Incidente (W/m ²)	Rendimento da Placa Fotovoltaica	Tempo de exposição solar anual (h)	Potência gerada (MW)	Energia anual (MWh)
6	733600	14672	1000	0,15	2190	2,20	4819,75
7	733600	29344	1000	0,15	2190	4,40	9639,50
8	733600	44016	1000	0,15	2190	6,60	14459,26
9	733600	58688	1000	0,15	2190	8,80	19279,01
10	733600	73360	1000	0,15	2190	11,00	24098,76

Fonte: elaborada pelo autor (2018).

De acordo com os dados gerados na Tabela 3, notou-se que, novamente, a potência e energia anual geradas foram significativamente altas, tendo em vista que apenas uma pequena parcela da área total das células de destinação final de resíduos sólidos foi efetivamente utilizada para a geração fotovoltaica.

Com as informações da Tabela 3 foi elaborado o Gráfico 3, que apresenta a potência e energia anual geradas para os casos 6 ao 10.

Gráfico 3 – Estimativa do potencial de geração fotovoltaica para a ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.



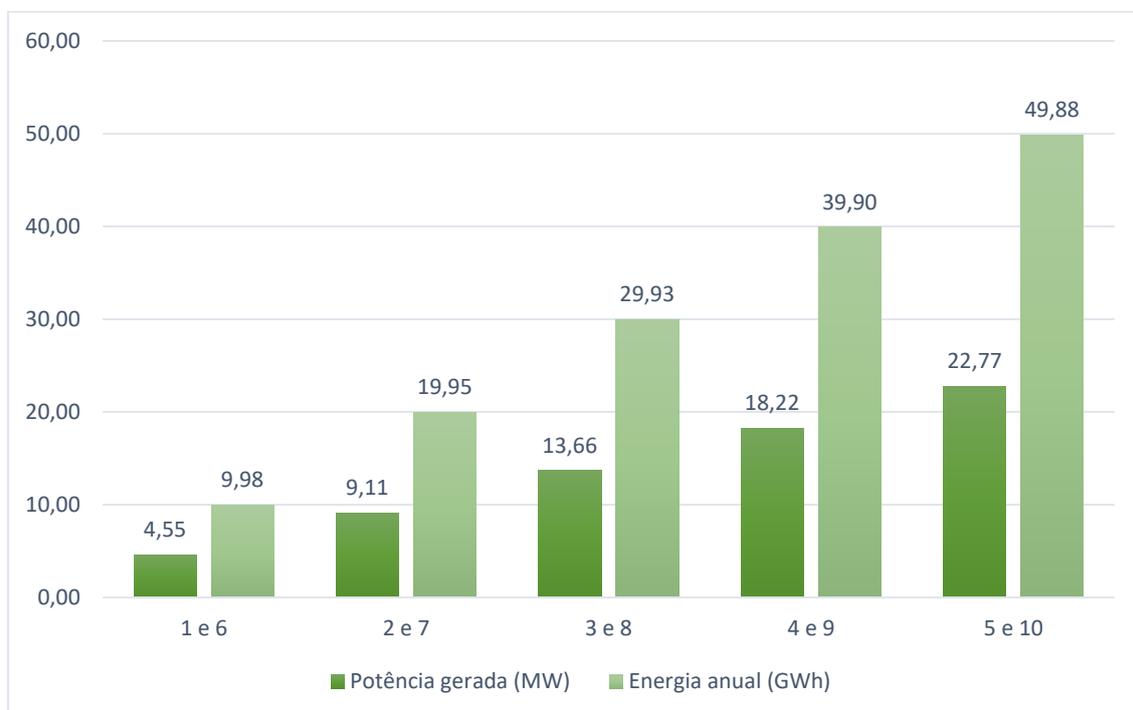
Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Como apenas os casos 6 e 7 tiveram suas potências estimadas para menos que 5 MW (2,20 MW para o sexto e 4,40 MW para o sétimo), estes seriam os únicos que poderiam ser classificados como minigeração e regidos pela Resolução Normativa N° 687, podendo usufruir do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Já os casos 8, 9 e 10 (6,60 MW, 8,80 MW e 11,00 MW, respectivamente) ficariam de fora.

É importante frisar também que, para Lopes (2017), é aconselhado que a instalação do sistema fotovoltaico deva ocorrer apenas dez anos após o encerramento da disposição dos resíduos sólidos nas células do aterro, pois é neste período que o recalque tende a se estabilizar. Isto é, o aproveitamento energético via fonte fotovoltaica só poderá ser iniciado na ampliação do ASMOC ao se completar uma década do encerramento das primeiras células de lixo do mesmo.

Ao fazer um somatório do potencial de geração fotovoltaica para os casos que possuem a mesma relação de área disponível por área total, ou seja, os casos 1 e 6, 2 e 7, 3 e 8, 4 e 9 e 5 e 10, é obtido o Gráfico 4:

Gráfico 4 – Estimativa do potencial de geração fotovoltaica considerando a área atual do Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia e a sua ampliação.



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Ao se analisar o Gráfico 4, fica claro que, mesmo quando 2% da área total das células de lixo são utilizadas (ASMOC finalizado mais ASMOC ampliado), a

potência gerada soma 4,55 MW. Com 10% este valor sobe ainda mais, chegando em 22,77 MW. Isso evidencia o quão este espaço ocioso poderia ser utilizado para gerar energia elétrica através de uma fonte limpa e renovável.

Com isso, percebe-se que um estudo de engenharia mais aprofundado e criterioso, voltado para a instalação de uma usina solar na superfície das células já finalizadas do ASMOC, seria pertinente, assim como uma readequação do projeto de ampliação deste aterro, visando o aproveitamento energético fotovoltaico.

Além de contribuir para a diversificação da matriz energética cearense e brasileira, a produção de energia elétrica via fonte fotovoltaica no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia reduziria as emissões de Gases de Efeito Estufa na atmosfera, podendo tornar este aterro sanitário ainda mais sustentável e o transformando no primeiro aterro solar brasileiro.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a análise de dados, constatou-se que o potencial de geração fotovoltaica no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, tanto antes quanto depois da sua ampliação, é amplo, tendo em vista que há bastante área disponível na superfície das células de lixo já encerradas. Caso apenas 2% da área das células de destinação final de RSUs do atual ASMOC e da sua ampliação fossem utilizadas, a potência gerada alcançaria 4,55 MW, o que é próximo ao limite da categoria de minigeração de acordo com a Resolução Normativa N° 687.

Ressalva-se ainda a necessidade de se continuar esta pesquisa diante do seu relevante valor social, ambiental e econômico, uma vez que o potencial energético fotovoltaico no ASMOC é muito vasto para não ser aproveitado. Além deste tipo de empreendimento trazer benefícios para a comunidade local e adjacências, através do surgimento de oportunidade de empregos, há a possibilidade de se reduzir a quantidade de emissões de GEE e também a oportunidade de se gerar créditos ao participar do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, caso o sistema seja categorizado como minigeração.

Por este e outros motivos, é encorajado a realização de mais estudos, pesquisas e incentivos (por iniciativas privadas ou públicas) relacionados ao aproveitamento energético via fontes renováveis em aterros sanitários já finalizados do Estado do Ceará e de outros estados brasileiros.

Porém, é importante lembrar que aterros solares possuem considerações específicas de engenharia que devem ser levadas em conta como, por exemplo, o recalque e a estabilidade do solo, o controle de águas pluviais, o gerenciamento do gás gerado e o monitoramento e a manutenção da usina solar no aterro sanitário, tornando as fases de planejamento, projeto, construção e operação destes aterros mais criteriosas do que já são.

E, para finalizar, as sugestões para trabalhos posteriores relacionados à aterros solares são:

- Elaboração de um panorama de potencial energético dos aterros sanitários cearenses e brasileiros;
- Análise da potência e da energia geradas em aterros solares através de sistemas híbridos com energia fotovoltaica e biogás oriundo do próprio aterro.

REFERÊNCIAS

- ALL IN ON RENEWABLE POWER. ENER G. Disponível em: <http://www.altenerg.com/back_issues/julyaug2014-story4.php>. Acesso em: 25 agos. 2018.
- ALMEIDA, Paulo Santos de. **Armazenamento de lixo urbano em Lixões e Aterros Sanitários: Contaminação do solo, proliferação de macro e micro vetores e contaminação do lençol freático**. São Paulo, 2009. 37p. Disponível em: <<http://stoa.usp.br/wagnerk/files/-1/16685/trabalho+1+de+SMC+-+professor+Paulo+Almeida.pdf>>. Acesso em: 22 agos. 2018.
- ASSUNÇÃO, Cecília Daniela Cláudio. **Análise da ampliação vertical do Aterro Metropolitano Oeste de Caucaia – CE**. 2008. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.
- BERNARDS LANDFILL SOLAR 3.67 MW GROUND MOUNT. CONTI SOLAR. Disponível em: <<https://www.contisolar.com/projects/bernards-landfill-solar-3.67-mw-ground-mount>>. Acesso em: 25 agos. 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, 2002. 199 p. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 19 agos. 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Caderno Temático Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília, 2016. 34 p. 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: 20 agos. 2018.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa N° 687, de 24 de Novembro de 2015**. Brasília, 2015. 25 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 20 agos. 2018.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de Agosto 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 28 dez. 2018.
- CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte**. 1. ed. Florianópolis: ABES, 2003.

ENERGIA SOLAR NO BRASIL: UM PANORAMA PARA [VOCÊ] ENTENDER TUDO. BLUESOL. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-no-brasil-panorama/>>. Acesso em: 28 dez. 2018.

ENTENDA A DIFERENÇA ENTRE ATERRO SANITÁRIO E LIXÃO. INFOENEM. Disponível em: <<https://www.infoenem.com.br/entenda-a-diferenca-entre-aterro-sanitario-e-lixao/>>. Acesso em: 28 dez. 2018.

ESTADOS UNIDOS. Massachusetts Department of Energy Resources. **The Guide to Developing Solar Photovoltaics at Massachusetts Landfills**. 2012. 46 p. Disponível em: <https://www.mass.gov/files/documents/2017/10/16/pvlandfillguide_0.pdf>. Acesso em: 22 agos. 2018.

ESTADOS UNIDOS. United States Environmental Protection Agency – U.S. EPA; National Renewable Energy Laboratory. **Best Practices for Siting Solar Photovoltaics on Municipal Solid Waste Landfills**. 2013. 82 p. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/52615.pdf>>. Acesso em: 22 agos. 2018.

ESTADOS UNIDOS. United States Environmental Protection Agency – U.S. EPA. **RE-Powering America's Land Initiative: Renewable Energy on Potentially Contaminated Land, Landfills and Mine Sites**. 2016. 3 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/re_powering_program_overview.pdf>. Acesso em: 22 agos. 2018.

FOLLOWING A SOLAR LANDFILL PROJECT IN EASTHAMPTON, MASS., FROM CONCEPT TO COMPLETION. WASTE 360. Disponível em: <<https://www.waste360.com/landfill-solar-projects/letting-sunshine>>. Acesso em: 25 agos. 2018.

HICKORY RIDGE LANDFILL. HDR. Disponível em: <<https://www.hdrinc.com/portfolio/hickory-ridge-landfill>>. Acesso em: 25 agos. 2018.

HORIZONTE DO DESPERDÍCIO. ESPIRAL UFC. Disponível em: <<http://espiralufc.wixsite.com/cargadagua/foto-reportagem-aterro-sanitario>>. Acesso em: 30 dez. 2018.

HUNGRIA. Sándor Szabó *et al.* **A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites**. 2017. 10 p. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032117304525?token=A39045B94EBD88A252A3972A1DE735CDB5F112A96B74B4D09066C5BB9C4AA085D8EEE3962C388167366CD509BCC978D>>. Acesso em: 22 agos. 2018.

IMAGENS AÉREAS DA CONSTRUÇÃO DO NOVO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL OESTE DE CAUCAIA. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=hPCTB-ZJAAk>>. Acesso em: 21 out. 2018.

INNOVATIVE PV LANDFILL SYSTEM SAVES COSTS AND PROTECTS THE ENVIRONMENT. PV EUROPE. Disponível em: <<https://www.pveurope.eu/News/Installation/Innovative-PV-landfill-system-saves-costs-and-protects-the-environment>>. Acesso em: 25 agos. 2018.

ITÁLIA, Silvia Sangiorgio; Marco Falconi. **Thecnical feasibility of a photovoltaic power plant on landfills. A case study.** 2015. 7 p. Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/S1876610215025679/1-s2.0-S1876610215025679-main.pdf?_tid=1980207c-caa5-4425-8aa1-5bcc5d4a8858&acdnat=1537133188_7e43a6dffacd2a4503a4bcd11f4768c8>. Acesso em: 22 agos. 2018.

KUEHLE-WEIDEMEIER, Matthias. **Implementation of the first landfill cover sealing with integrated photovoltaic power plant.** 2010. 39 p. Alemanha.

LIMA, José Dantas de *et al.* **Relatório de Impacto Ambiental: Projeto de implantação para a ampliação do Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia-CE.** Fortaleza, 2011. 74p. Disponível em: <<http://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/2011/11/CAUCAIA-ATERRO.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.

LIXÃO X ATERRO. LIXO.COM.BR. Disponível em: <<http://www.lixo.com.br/content/view/144/251/>>. Acesso em: 22 agos. 2018.

LOPES, Matheus Martins. **Aproveitamento energético em aterros sanitários: análise da viabilidade técnica e econômica para o uso do biogás e instalação de painéis fotovoltaicos.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Energia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia solar para produção de eletricidade.** São Paulo: Artliber Editora, 2012.

MAIA, Magda Helena de Araújo. **Plano de Desenvolvimento Econômico e Social – Fortaleza 2040.** Fortaleza, 2015. 34p. Disponível em: <<http://forum.fortaleza2040.fortaleza.ce.gov.br/wp-content/uploads/2015/09/ANEXO-III-RES%C3%8DDUOS-S%C3%93LIDOS.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2018.

MOREIRA, Felipe Fernandes. **Estudo de Potencial Energético de Aproveitamento de Biogás Gerado no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.** 2010. M836e. Monografia (Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

NOVO ATERRO DE CAUCAIA SEGUE SEM CONCLUSÃO. DIÁRIO DO NORDESTE. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/metro/novo-aterro-de-caucaia-segue-sem-conclusao-1.1899966>>. Acesso em: 21 out. 2018.

PALZ, Wolfgang. **Energia solar e fontes alternativas.** Tradução de Noberto de Paula Lima. Hemus, 2002.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPTEL – CRESESB, 2014.

RIBEIRO, Layson Rayre Rocha *et al.* **Estudo de viabilidade da instalação de um gerador de energia elétrica a partir do biogás produzido no aterro sanitário de Caucaia-CE.** Fortaleza, 2018. 5p. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2018/XIV-002.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2018.

ROCHA FILHO, José Itanor do Couto. **Potencial para uso de seguimento solar em sistemas fotovoltaicos: Estudo de caso para Fortaleza/CE.** 2013. R573p. Monografia (Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ROMÊNIA. Bodog Marinela; Pásztai Zoltan; Mann Eugen. **Exploitation of a closed landfill according to the principles of sustainable development.** 2016. 8 p. Disponível em: <http://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/protectia_mediului/2016B/im/04.%20Bodog%20Marinela.pdf>. Acesso em: 22 agos. 2018.

SANTAELLA, Sandra Tédde *et al.* **Resíduos sólidos e a atual política ambiental brasileira.** Fortaleza: UFC / LABOMAR / NAVE, 2014.

SITUAÇÃO ATUAL DO ATERRO – PLANTA GERAL. CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIADOS. Disponível em: <<http://craengenharia.com.br/wp/pdfs/10510-0000-CI-00001-B.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2018.

TELES FILHO, Paulo Marcos Carneiro. **Estudos da viabilidade econômica da micro e minigeração fotovoltaica à luz da Resolução Normativa nº 482 da ANEEL.** 2015. T272e. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. AMÉRICA DO SOL. Disponível em: <<http://americadosol.org/tipos-de-modulos-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 19 agos. 2018.

TORRES, Regina Célia. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais.** 2012. T693e. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

TUDO SOBRE A MICROGERAÇÃO EDP. MICROGERAÇÃO DE ENERGIA. Disponível em: <<http://www.microgeracaodeenergia.com/geral/tudo-sobre-a-microgeracao-edp/>>. Acesso em: 27 dez. 2018.

TYNGSBOROUGH 3.5 MW SOLAR LANDFILL SYSTEM. CONTI SOLAR. Disponível em: <<https://www.contisolar.com/index.php/projects/tyngsborough-3.5-mw-solar-landfill-system>>. Acesso em: 25 agos. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará.** Fortaleza, 2013.