

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Aproveitamento energético em aterros sanitários: análise da viabilidade técnica e econômica para o uso do biogás e instalação de painéis fotovoltaicos

Matheus Martins Lopes

Itajubá, junho de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Matheus Martins Lopes

Aproveitamento energético em aterros sanitários: análise da viabilidade técnica e econômica para o uso do biogás e instalação de painéis fotovoltaicos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Exploração do uso racional de recursos naturais e energia

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas

Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a Regina Mambeli Barros

Junho de 2017

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Matheus Martins Lopes

Aproveitamento energético em aterros sanitários: análise da viabilidade técnica e econômica para o uso do biogás e instalação de painéis fotovoltaicos

Dissertação aprovada por banca examinadora em 13 de junho de 2017, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Energia**.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas (orientador)

Prof.^a Dr.^a Regina Mambeli Barros (co-orientadora)

Prof.^a Dr.^a Márcia Viana Lisboa Martins

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi

Itajubá

2017

AGRADECIMENTOS

Deixo registrado meu agradecimento a todos que contribuíram de alguma forma para a execução deste trabalho, em especial à minha família, pelo apoio incondicional de sempre; ao meu orientador, professor Vladimir e co-orientadora, prof.^a Regina pelo apoio, dicas, sugestões e disponibilidade; ao professor Ivan pela ajuda; à ajuda do amigo Matheus Augusto; aos amigos e colegas ganhos no período deste mestrado; e ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

O modo como é feito o gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o que inclui sua destinação final, é de grande importância, uma vez que o mau planejamento pode levar a consequências negativas tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade em geral. No Brasil tornou-se obrigatória, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, o tratamento e a destinação adequada dos RSU, sendo o aterro sanitário a principal técnica utilizada de disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Nos aterros sanitários ocorre a decomposição da matéria orgânica, resultando na liberação do biogás, composto principalmente por gás carbônico e metano, com potencial para ser usado como combustível. Além da questão de saneamento, também destaca-se a importância cada vez maior dada ao uso das energias renováveis. Nesse contexto, este estudo busca avaliar o potencial técnico e econômico do aproveitamento energético em aterros de RSU considerando o uso do gás de aterro e a energia solar fotovoltaica, por meio de um estudo de caso, a saber, do aterro sanitário do CIMASAS, localizado em Itajubá-MG. No caso da energia solar, considerou-se que o sistema seria instalado na plataforma superior do aterro, dez anos após o período de recebimento de resíduos, de modo a aguardar período de recalque. Este tipo de instalação recentemente vem ganhando cada vez mais destaque por se tratar, dentre outros motivos, de uma maneira de aproveitar um espaço que de outra maneira poderia ser subutilizado. Durante os períodos considerados, as análises mostram que os dois sistemas apresentariam viabilidade, com efeitos positivos quando os mesmos são tratados como sistemas de minigeração distribuída, utilizando-se do mecanismo de compensação de energia. O sistema a biogás poderia gerar um total de 162,1 GWh, e o sistema solar 15,1 GWh durante seus respectivos anos de operação.

Palavras-chave: Aterros Sanitários; Energia Renovável; Gás de Aterro; Energia Solar Fotovoltaica.

ABSTRACT

Municipal solid waste management, including its final destination, is of great importance since a bad control can negatively affect the environment and society in general. In Brazil, adequate destination and treatment of the municipal solid wastes became mandatory with the National Policy of Solid Residues, with the sanitary landfill as the primary technique for management; many countries still use this technique of final disposal. In the sanitary landfills, organic matter decomposition occurs, resulting in the release of biogas, or landfill gas, which is composed basically of carbon dioxide and methane and has the potential to be used as a fuel. Besides the issue of sanitation, renewable energy is also growing in importance. Within this context, this study evaluates the technical and economic potential of harnessing landfill gas and photovoltaic solar energy in municipal solid waste landfills through a case study in the sanitary landfill CIMASAS, located in Itajubá-MG. Regarding solar energy, it was considered that the system would be installed in the superior platform of the landfill ten years after the settlement period. This type of installation is gaining prominence due to being a way to use a space that could be left underused. During the considered periods, the analysis showed that both systems would be viable, with positive results when they are treated as distributed generation systems, considering the net metering system. The biogas system could generate a total of 162.1 GWh, and the solar system 15.1 GWh during its years of operation.

Key words: Sanitary Landfills; Renewable Energy; Landfill Gas; Solar Photovoltaic Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (a) Geração de Resíduos Sólidos Urbanos e (b) destinação final dos RSU coletados no Brasil.....	16
Figura 2. Aproximação da quantidade de resíduos sólidos municipais totais dispostos mundialmente considerando diferentes práticas.....	17
Figura 3. Composição dos resíduos sólidos por renda e ano.....	18
Figura 4. Figura esquemática de aterro sanitário.....	21
Figura 5. Esquema de um aterro sanitário.	21
Figura 6. Fases de produção de gás de aterro	24
Figura 7. Principais fatores que influenciam na geração de gás.....	26
Figura 8. Geração de eletricidade a partir de uma célula fotovoltaica.	33
Figura 9. Dez maiores países em relação às instalações e capacidade acumulada em 2015....	38
Figura 10. Capacidade acumulada instalada da tecnologia solar fotovoltaica.	39
Figura 11. Principais tipos de fundações utilizadas para sistemas fotovoltaicos.	41
Figura 12. Sistemas de rastreamento com um (a-esquerda) e dois eixos (b-direita).	43
Figura 13. Projeto conceitual de sistema fotovoltaico instalado sobre área de aterro desativada.	45
Figura 14. Aterro de resíduos sólidos urbanos e sistema fotovoltaico como um sistema integrado.	46
Figura 15. Lâminas fotovoltaicas flexíveis instaladas sobre geomembrana	47
Figura 16. Recalques total e anual em RSU.....	49
Figura 17. Exemplo de sistema de ancoragem tipo laje de concreto.....	56
Figura 18. Exemplos de sistemas autobalastrados (<i>ballasted systems</i>) em estrutura com bandeja.....	57
Figura 19. Cobertura solar vs. cobertura final tradicional.	59
Figura 20. <i>Tessman Road Landfill</i>	61
Figura 21. Cobertura solar do aterro de Hickory Ridge em uma área 4 ha, de uma área total de 16,2 ha.	62
Figura 22. Instalações solares nas superfícies planas.	64
Figura 23. Instalações solares nos taludes.	64
Figura 24. Sistema solar com rastreamento em um eixo utilizando na Nellis Air Force Base, Nevada-EUA.	65
Figura 25. Sistema fotovoltaico de inclinação fixa no aterro em Fort Cason, Colorado.....	65

Figura 26. Unidades instaladas no estudo.	67
Figura 27. Aterro sanitário do CIMASAS em Itajubá-MG.	68
Figura 28. Exemplo de período de planejamento para aproveitamento da área do aterro em estudo.	69
Figura 29. Potência de máxima produção energética (P_{ME}).	72
Figura 30. Escalonamento dos grupos geradores. (a) Definição da potência de maior produção energética P1; (c) Potências intermediárias (P2 e P3); (b) Implantação destas potências na curva de produção de gás de aterro..	72
Figura 31. Projeção da população e produção de resíduos (ton/ano) para o CIMASAS.	79
Figura 32. Gráfico da emissão de gás de aterro ao longo dos anos.	80
Figura 33. Gráfico da variação de potências disponíveis ao longo dos anos no aterro.	80
Figura 34. Relação entre potências, tempo de disponibilidade e energia gerada.	81
Figura 35. Incrementos energéticos devido à adição de mais grupos geradores.	81
Figura 36. Planejamento de sistema de aproveitamento do biogás utilizando um grupo gerador.	83
Figura 37. Planejamento de sistema de aproveitamento do biogás utilizando dois grupos geradores.	83
Figura 38. Planejamento de sistema de aproveitamento do biogás utilizando três grupos geradores.	83
Figura 39. Energia gerada (GWh) considerando três, dois e um grupo gerador.	84
Figura 40. Resultados da análise econômica (VPL) considerando três, dois e um gerador.	84
Figura 41. Resultados da análise econômica considerando três, dois e um gerador, comparando os casos sem e com venda de créditos de carbono.	85
Figura 42. Resultados da análise econômica considerando a venda de energia.	86
Figura 43. Relação entre a variação de valores da tarifa de energia e o VPL.	86
Figura 44. Produção de energia ao longo de 25 anos de funcionamento.	88
Figura 45. Variação do VPL conforme valor pago por MWh.	90
Figura 46. Comportamento do VPL com variação do preço total do sistema (R\$/W).	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Intervalos de tempo típicos para cada fase de produção de gás de aterro	24
Tabela 2. Projeção Populacional. Métodos com base em fórmulas matemáticas.	70
Tabela 3. Características do módulo fotovoltaico.	74
Tabela 4. Custos dos módulos e inversores	76
Tabela 5. Custos do sistema fotovoltaico.	77
Tabela 6. Equipamentos considerados para uma instalação para aproveitamento	82
Tabela 7. Características do sistema solar fotovoltaico proposto.....	87
Tabela 8. Resultados de geração do sistema no primeiro ano de operação.....	88

LISTA DE SIGLAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

AFRMM – Adicional de Frete para Renovação da Marinha Mercante

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASCE – *American Society of Civil Engineers*

BIG – Banco de Informações de Geração

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – ESALQ/USP

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CHP – *Combined Heat and Power*

CIMASAS – Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESMAP – *Energy Sector Management Assistance Program*

FDI – Fator de Dimensionamento do Inversor

GEE – Gases do Efeito Estufa

ICLEI – *International Council for Local Environmental Initiatives*

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IEA – *International Energy Agency*

IGP-M – Índice Geral de Preços do Mercado

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPI – Impostos sobre Produtos Industrializados

IRENA – *International Renewable Energy Agency*

LandGEM– *Landfill Gas Emissions Model*

LCOE – Custo Nivelado de Energia

MCI – Motor de Combustão Interna
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
NCM – Nomenclatura Comum do Mercosul
NREL – *National Renewable Energy Laboratory*
OECD – *Organisation for Economic Co-operation and Development*
O&M – Operação e Manutenção
PASEP – Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
PIS – Programa de Integração Social
PVPS – *Photovoltaic Power Systems Programme*
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
PMGIRS – Programa Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SEI – *Stockholm Environment Institute*
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SISCOMEX – Sistema Integrado de Comércio Exterior
TPO – Poliolefina Termoplástica
VPL – Valor Presente Líquido
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Resíduos Sólidos: conceitos e informações	15
2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos.....	19
2.1.2 Disposição final dos resíduos sólidos.....	20
2.2 O gás de aterro	22
2.2.1 Estimativa da produção de biogás	26
2.2.2 Captação do gás de aterro.....	28
2.2.3 Tecnologias de conversão do gás de aterro	29
2.3 A tecnologia solar fotovoltaica.....	32
2.3.1 Sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede.....	33
2.3.2 Principais componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	39
2.4 Considerações sobre instalações solares fotovoltaicas em aterros sanitários	43
2.4.1 Recalques.....	48
2.4.2 Cobertura final.....	50
2.4.3 Declividade e estabilidade.....	53
2.4.4 Sistemas de controle de lixiviados, gás de aterro e águas pluviais	54
2.4.5 Escolha das estruturas de suporte e tecnologia fotovoltaica	55
2.4.6 Alguns casos de instalações solares em aterros.....	60
3 METODOLOGIA	68
3.1 O estudo de caso.....	68
3.2 Projeção da população.....	69
3.3 Geração de resíduos sólidos e de biogás	70
3.4 Geração de energia pelo gás de aterro.....	71
3.5 Geração de eletricidade por sistema solar fotovoltaico.....	73
3.6 Análise de viabilidade econômica.....	77
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1 Análise de sistema de aproveitamento energético de gás de aterro	79
4.1.1 Projeção da população e geração de resíduos sólidos	79
4.1.2 Gás de aterro: geração e potencialidade energética.....	79
4.1.3 Análise econômica do aproveitamento energético do biogás.....	82
4.2 Análise do sistema solar fotovoltaico	87

4.2.1 Características do local e do sistema	87
4.2.2 Análise econômica da implantação do sistema fotovoltaico	88
5 CONCLUSÕES	92
6 SUGESTÕES	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO A	110

1 INTRODUÇÃO

Perceptível é a crescente preocupação relativa às ações do homem ao meio ambiente. Nesse contexto, inclui-se, por exemplo, frente a constante produção de resíduos, a busca pelo tratamento e disposição adequados. Também, a questão energética mundial, em que se destaca atualmente, o esforço para incrementar cada vez mais as chamadas energias renováveis.

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, 2010a), e regulamentada pelo Decreto 7.404/2010 (BRASIL, 2010b), foi estabelecida uma legislação mais moderna e direcionada para gestão dos resíduos sólidos. Essa lei aborda novos conceitos, como acordo setorial, logística reversa, sustentabilidade operacional e financeira, integração dos catadores de recicláveis, padrões sustentáveis de produção e consumo. E contribui ainda para o Programa Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS). Esses conceitos envolvem o objetivo maior de proteção à saúde pública, da qualidade ambiental sustentável e principalmente, da disposição final ambientalmente adequada.

No Brasil, a técnica predominante de tratamento e disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é o aterro sanitário (Grupo de Resíduos Sólidos - UFPE e BNDES, 2014). Nestes locais, devido à presença de matéria orgânica na massa de resíduos, há a produção de biogás por meio da decomposição anaeróbia. Uma oportunidade interessante seria então, o aproveitamento energético desse gás. Conforme Tolmasquim (2003), o aproveitamento energético do biogás se trata de uma alternativa que poderia ser implantada em um período de curto a médio prazo nos aterros sanitários brasileiros

Existe também a oportunidade de utilização dessas áreas de disposição de resíduos para instalação de outros sistemas de energia renovável, como é o caso da energia solar fotovoltaica. Conforme observado por Townsend *et al.* (2015), aterros sanitários normalmente apresentam grandes áreas onde painéis fotovoltaicos podem ser instalados. Esta pode ser uma alternativa interessante e proveitosa, já que busca utilizar um espaço que poderia ficar ocioso.

Ao redor do mundo, em países como Alemanha, França, Japão, Portugal, Itália, Taiwan, e Estados Unidos, já existem ou são planejadas instalações solares nestas áreas. Isto se deve ao fato de que o aproveitamento dessas áreas pode trazer uma série de benefícios. Dentre eles está a possibilidade de diminuição do uso de outras áreas abertas, devido ao crescimento dos requerimentos do uso de terras para aumento de instalações de fontes renováveis como a solar. Tais formas de energia renovável trariam benefícios não apenas ambientais, mas também sociais e econômicos, uma vez que estes locais passam então a ter

um novo uso, produzindo energia de fontes limpas.

Nesse sentido, este trabalho visa a avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso do biogás gerado pela decomposição da matéria orgânica para conversão em eletricidade, e da instalação de um sistema solar fotovoltaico no aterro sanitário de Itajubá-MG. Visa também a servir de ponto de partida para obtenção de maiores conhecimentos principalmente, em relação a projetos de instalações solares fotovoltaicas sobre áreas de aterros.

1.1 Objetivos

Este projeto tem como objetivo geral analisar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético do biogás produzido no aterro sanitário do CIMASAS (Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário) e da instalação de painéis solares fotovoltaicos sobre áreas onde foram depositados resíduos sólidos, em células que já foram encerradas, após aguardar o recalque da massa de RSU.

E possui os seguintes objetivos específicos, acerca de áreas onde foram depositados RSU:

- A partir de estimativa da quantidade de RSU dos municípios do CIMASAS e correspondente potencial de produção de biogás e geração de energia elétrica, avaliar a complementação com sistema fotovoltaico;
- Avaliar as condições estruturais necessárias para instalação de painéis solares fotovoltaicos em tais áreas cujo funcionamento foi encerrado;
- Determinar locais com possibilidade de receber uma instalação solar fotovoltaica em tais áreas após encerramento das operações, e após aguardar período de recalque da massa de RSU por dez anos;
- Estimar a produção energética resultante da instalação de painéis fotovoltaicos na área escolhida do aterro cujo funcionamento foi encerrado e também após aguardar período de recalque da massa de RSU por dez anos;
- Analisar a viabilidade econômica de ambos empreendimentos, considerando também o sistema de compensação de energia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos Sólidos: conceitos e informações

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), de 2 de agosto de 2010, apresenta a seguinte definição de resíduos sólidos:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A ABNT NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004) também apresenta sua definição:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10.004, 2004, p.1).

A norma ABNT NBR 8.419 de 1992 (ABNT, 1992) apresenta uma definição em relação aos resíduos sólidos urbanos (RSU), como “resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos industriais perigosos, hospitalares sépticos e de aeroportos e portos” (ABNT, 1992, p. 2).

Dados da ABRELPE (2014), como pode ser observado na Figura 1(a), mostram a quantidade e o crescimento na produção de RSU gerados em 2014 (78.583.405 toneladas), em relação ao ano anterior no Brasil, com um aumento de 2,9%, superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9%.

No cenário mundial atual, a produção de RSU é de aproximadamente, 1,3 bilhão de toneladas por ano, com expectativa de crescimento para cerca de 2,2 bilhões de toneladas por ano até 2025. Isso representa um aumento significativo nas taxas de geração de resíduos per capita, de 1,20 para 1,42 kg por pessoa por dia nos próximos 15 anos. Apenas os países componentes da *OECD-Organisation for Economic Co-operation and Development*, produzem quase metade (44%) dos resíduos no cenário mundial (BANCO MUNDIAL, 2012).

A geração de resíduos está relacionada a diversos fatores, como nível e hábito de consumo, fatores culturais, fatores climáticos, rendas e padrões de vida das populações, economia de um país, das características de sexo e idade dos grupos populacionais. Também está vinculada diretamente à origem dos resíduos e é função das atividades básicas de manutenção da vida (BIDONE E POVINELLI, 1999). De acordo com o Banco Mundial (2012), geralmente, quanto maior o desenvolvimento econômico e taxa de urbanização, maior a quantidade de resíduos sólidos produzidos. Nível de renda e urbanização estão altamente correlacionados, e enquanto os rendimentos e padrões de vida aumentam, o consumo de bens e serviços aumentam, assim como a geração de resíduos. Residentes de áreas urbanas produzem quase o dobro de resíduos que pessoas que vivem em áreas rurais (BANCO MUNDIAL, 2012).

Os resíduos sólidos, quando não mais apresentarem possibilidades de tratamento, reuso, reciclagem e recuperação por meio de processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, passam a ser tratados como rejeitos e devem ter sua disposição final ambientalmente adequada, conforme prevê a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010). Na Figura 1(b), observa-se que a destinação final dos resíduos no Brasil manteve-se estável em relação a 2013, e que a quantidade de RSU com destinação inadequada, para lixões ou aterros controlados, ainda é muito grande, trazendo riscos à saúde pública e meio ambiente. Do total, 58,4% dos RSU tiveram sua destinação adequada, sendo encaminhados para os aterros sanitários, e o restante destinado a aterros controlados (24,2%) e lixões (17,4%) (ABRELPE, 2014).

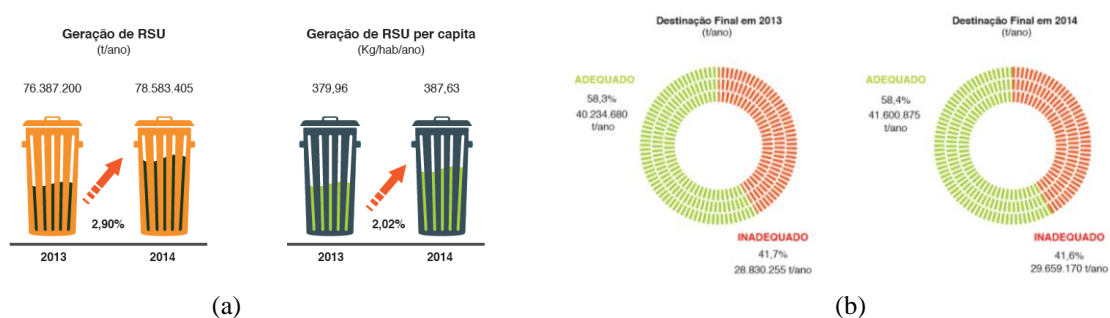


Figura 1. (a) Geração de Resíduos Sólidos Urbanos e (b) destinação final dos RSU coletados no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2014.

Em países de alta renda, aterramento e tratamento térmico são os métodos mais comuns para disposição de RSU. Na União Europeia em 2010, foram recuperados 40% dos resíduos descartados pela sociedade na forma de reciclagem e compostagem, 22% foram incinerados e 38% dispostos em aterros sanitários. Mas diversos países membros da União Europeia ainda utilizam em grande parte, a disposição em aterros sanitários (EUROSTAT,

2012, *apud* Grupo de Resíduos Sólidos - UFPE e BNDES, 2014). Dos RSU produzidos pelos Estados Unidos em 2012, 34,5% foram reciclados e compostados, 12% foram incinerados, e 53,8% foram depositados em aterros. Em 1980, 89% dos resíduos tinham aterros como destino. Como notado pela USEPA-*United States Environmental Protection Agency*, o número de aterros tem apresentado um decréscimo ao longo dos anos, enquanto que o seu tamanho médio aumentou (USEPA, 2012a). A Figura 2 mostra a quantidade mundial de resíduos dispostos em relação a opção de disposição final.

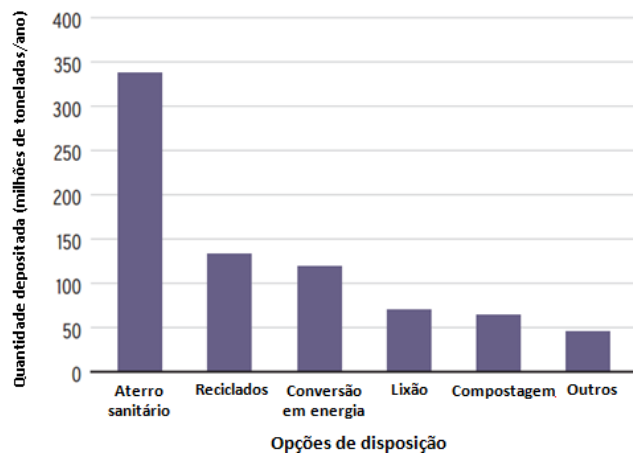


Figura 2. Aproximação da quantidade de resíduos sólidos municipais totais dispostos mundialmente considerando diferentes práticas.

Fonte: Adaptado de Banco Mundial, 2012.

Idealmente, os aterros deveriam ser usados apenas para deposição de rejeitos, mas muitos materiais que poderiam ser reaproveitados de outras maneiras são depositados sem prévio tratamento e separação. Dentre estes materiais que compõem os RSU depositados nos aterros estão materiais orgânicos que, ao sofrerem o processo de decomposição anaeróbia geram o biogás, que pode ser convertido em energia.

A composição dos resíduos é influenciada por fatores como cultura, desenvolvimento econômico, clima e fontes de energia; a composição impacta na frequência de coleta de RSU e como este é disposto. A fração orgânica tende a ser maior em países com menor nível de renda e menor em países com maiores níveis de renda. Neste último caso, papel, plásticos e outros materiais inorgânicos compõem a maior proporção dos RSU (BANCO MUNDIAL, 2015). Muitos países da União Europeia estão muito avançados quanto à redução de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários. Suíça, Alemanha, Holanda, Suécia, Bélgica, Áustria e Dinamarca têm relatado taxas de aterramento desses resíduos abaixo de 5% (Grupo de Resíduos Sólidos - UFPE e BNDES, 2014).

O Banco Mundial (2012) fez estimativas da composição dos resíduos sólidos por renda e ano, como mostrado na Figura 3. Em uma visão global, 46% dos resíduos sólidos

compõe-se de material orgânico. O Brasil, classificado como um país com renda média alta (*Upper Middle Income*) parece estar próximo dos valores de composição apresentados pelo Banco Mundial (2012), mas a diferença ainda é grande se comparado com países com renda alta (*High Income*), principalmente no que diz respeito à parcela orgânica.

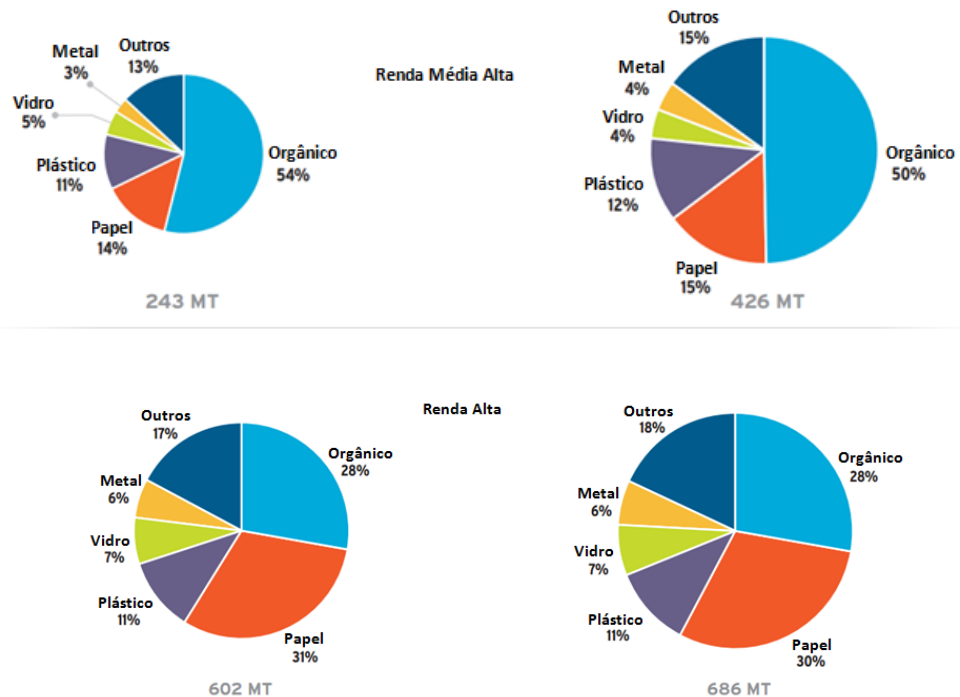


Figura 3. Composição dos resíduos sólidos por renda e ano. Os gráficos à esquerda mostram as estimativas para 2012, e os posicionados à direita valores estimados para o ano de 2025. Fonte: Adaptado de Banco Mundial, 2012.

O biogás produzido pela decomposição da matéria orgânica nos aterros pode ser aproveitado energeticamente como supracitado. Conforme Willumsen (2004), até o ano de 2004 haviam aproximadamente 1150 plantas com aproveitamento energético do gás de aterro, utilizando em sua maior parte de motores a gás. A maioria dessas plantas nos Estados Unidos e Europa (com um maior número em países como Alemanha, Itália, e Reino Unido) (WILLUMSEN, 2004). Nos Estados Unidos, conforme estimativas da USEPA (2015b), atualmente há 636 projetos operacionais utilizando gás de aterro para conversão energética, dos quais três quartos produzem eletricidade.

Estima-se que no Brasil existam 1.700 aterros sanitários (PORTAL BRASIL, 2012). Mas até o final de 2003 não existiam plantas de aproveitamento de gás de aterro em operação, apenas algumas em estado final de montagem, como no Aterro Bandeirantes em São Paulo (HENRIQUES, 2004). Atualmente, os aterros sanitários Bandeirantes, Caieiras, São João, Guataparã são exemplos deste tipo de plantas no Brasil.

Segundo dados da ABRELPE, se os resíduos sólidos urbanos gerados no país tivessem

uma destinação final adequada nos aterros sanitários, seria possível gerar até 536 MW a partir do biogás produzido. E se fosse realizado o tratamento térmico dos materiais que não podem mais ser reaproveitados ou reciclados, se somariam mais 742 MW de potencial, totalizando cerca de 1,3 GW (AMBIENTE ENERGIA, 2015). Salomon e Lora (2009) também verificaram que o potencial de geração de eletricidade a partir de biogás produzido a partir da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos está entre 1,05 e 1,13 GW, sendo que aterros sanitários teriam potencial entre 199,59 e 214,37 MW. Lino e Ismail (2011) observaram em suas análises que este valor estaria por volta de 41,7 MW. Barros et al (2014) verificaram em seus estudos que a geração de energia a partir do uso do gás de aterro, contribuiria no consumo final de energia em 2030 com valores entre 0,45% e 0,81% da geração por combustíveis residuais, ou entre 337 MW- 601 MW.

2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados de diferentes maneiras. Conforme a norma ABNT/NBR10.004 (ABNT, 2004), a classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e também de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com anexos de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A referida norma apresenta a seguinte classificação:

- a) Resíduos classe I – Perigosos: apresentam características tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.
- b) Resíduos classe II – Não-perigosos, subdivididos em:
 - Resíduos classe II A – Não-inertes: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes, nos termos da Norma. Os resíduos desta classe podem ter propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
 - Resíduos classe II B – Inertes: são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10.007 (ABNT, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10.006 (ABNT, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Além desta classificação quanto à periculosidade, Vilhena (2010) cita outras formas de classificação dos resíduos como por sua natureza física (seco e molhado), por sua composição química (matéria orgânica e matéria inorgânica), ou de acordo com sua origem (domiciliar, comercial, público, serviços de saúde e hospitalar, portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários, industrial, agrícola, e entulho).

A Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) classifica os resíduos sólidos em relação à periculosidade (perigosos e não perigosos, similar à NBR 10.004/2004) e à origem dos resíduos sólidos. Quanto à origem há a seguinte classificação: resíduos domiciliares; resíduos de limpeza urbana; resíduos sólidos urbanos (que englobam os domiciliares e de limpeza urbana); resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; resíduos dos serviços públicos de saneamento básico; resíduos industriais; resíduos de serviços de saúde; resíduos da construção civil; resíduos agrossilvopastoris; resíduos de serviços de transporte; e resíduos de mineração. Neste trabalho, os resíduos sólidos urbanos são os de maior interesse.

2.1.2 Disposição final dos resíduos sólidos

As seguintes formas de deposição final de resíduos sólidos são conhecidas, excluindo as formas de deposição já não mais permitidas (lixão e aterro controlado) pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010):

Aterro de resíduos perigosos – classe I - aterro industrial: trata-se de técnica de disposição final de resíduos químicos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública, minimizando os impactos ambientais e utilizando procedimentos específicos de engenharia para confinamento dos RSU (ANVISA, 2006). Nestes aterros, de acordo com a ABNT, existem alguns itens de projeto e operacionais mais restritivos relativamente ao aterro de resíduos sólidos urbanos, dentre os quais pode-se mencionar o duplo sistema de impermeabilização, provido de um sistema de detecção de vazamento (BARROS, 2012).

Aterros sanitários: a norma ABNT NBR 8.419/1992 (ABNT, 1992) apresenta a seguinte definição de aterro sanitário:

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 8.419, 1992, p.1).

O aterro sanitário consiste em uma solução sanitariamente segura à saúde da população e ao meio ambiente, sendo que isto se deve aos requisitos de projeto, licenciamento e operação necessários ao processo de licenciamento e previstos por norma e regulamentações pertinentes. Estes requisitos de projeto compreendem atendimento aos critérios: de localização, em relação às condições topográficas, hidrogeológicas e geotécnicas; sistema de monitoramento de águas subterrâneas; sistema de drenagem com queima, ou aproveitamento energético de gases; sistema de tratamento de percolato (mistura de chorume com água infiltrada); recobrimento interno com argila compactada e/ou geomembranas; plano de fechamento; dentre outros (BARROS, 2012). Nas Figuras 4 e 5, verificam-se exemplos da configuração de aterros sanitários.

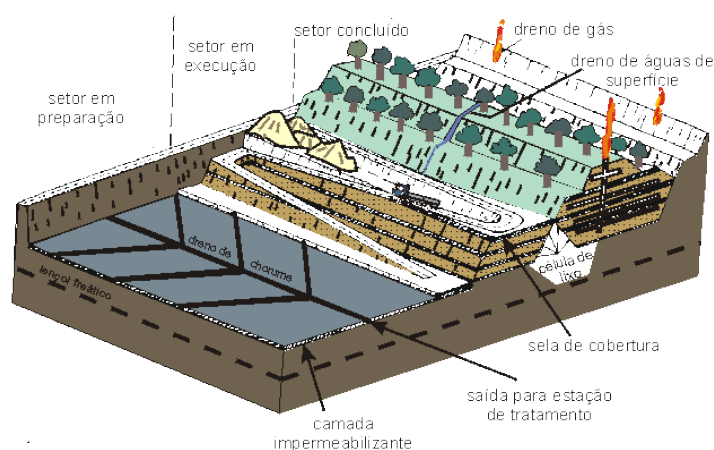


Figura 4. Figura esquemática de aterro sanitário.

Fonte: Unesp, s.d.

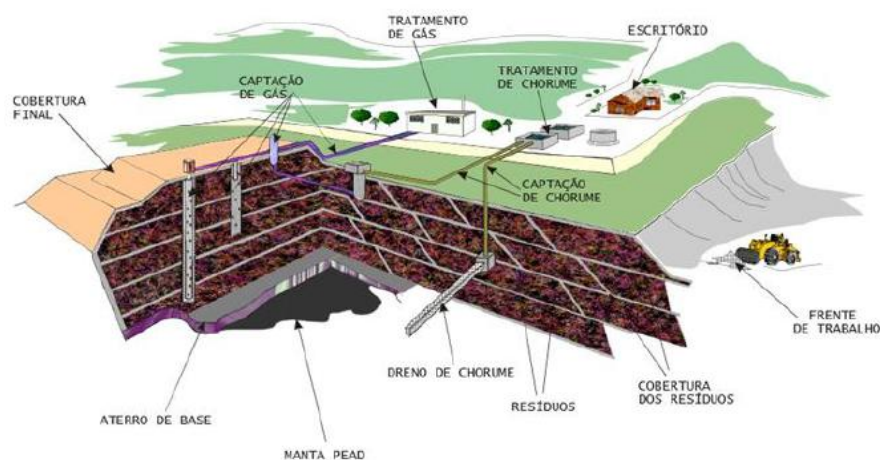


Figura 5. Esquema de um aterro sanitário.

Fonte: PMSP, 2013.

No Brasil, a técnica predominante de tratamento e disposição final dos RSU é o aterro

sanitário (Grupo de Resíduos Sólidos - UFPE e BNDES, 2014). Esta técnica é uma solução para tratamento e disposição final para RSU com operação relativamente simples, sobretudo quando comparado à incineração. Mas também, apresenta desvantagens, como o fato de o aterro possuir vida útil limitada e de sua área dever continuar a ser avaliada pelo sistema de monitoramento de água subterrânea e gases drenados mesmo após a desativação, já que mesmo após o término da vida útil, ainda há atividade microbológica no interior do mesmo (BARROS, 2012). No caso dos Estados Unidos, por exemplo, os regulamentos para aterros de resíduos sólidos urbanos (*municipal solid waste*) 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).

2.2 O gás de aterro

O gás de aterro é gerado como resultado de processos físicos, químicos, e microbiológicos. Devido à natureza orgânica de grande parte dos resíduos, os processos microbiológicos governam o processo de geração de gás (RAJARAM, et al, 2011). O componente mais importante do gás de aterro, principalmente de um ponto de vista energético, é o metano, que constitui aproximadamente 50% do volume total produzido. O metano possui um risco potencial por ser combustível e explosivo em concentrações entre 5 e 15% de ar. O biogás possui ainda cerca de 50% de dióxido de carbono, e menos de 1%, componentes traço como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e mercaptanas (BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004).

Conforme Castilhos Júnior (2006), usualmente o modelo mais utilizado sobre a variação temporal da composição do biogás em relação à decomposição dos RSU depositados em aterro sanitário é o descrito por Pohland e Harper (1985), distinguindo-se cinco fases que compõem o processo de degradação anaeróbia no interior da massa de resíduos. Existem outros modelos, mas as diferenças se estabelecem apenas nos níveis de detalhamento de cada classificação e não conceitualmente (CASTILHOS JÚNIOR, 2006). Cada uma dessas fases é apresentada a seguir, conforme Pohland e Harper (1985) e ilustradas na Figura 6:

Fase I – Ajuste inicial: disposição inicial de resíduos e acúmulo preliminar de umidade; subsidência inicial e fechamento de cada célula do aterro; detectadas as primeiras alterações em parâmetros ambientais devido a processos iniciais de estabilização (POHLAND e HARPER, 1985).

Esta primeira fase ocorre logo após a deposição dos resíduos, enquanto oxigênio está presente nos mesmos. A decomposição aeróbia produz dióxido de carbono, água e calor (BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004). Nesta fase, conforme Tchobanoglous, et al (1993) *apud* Ensinas (2003), em que a decomposição ocorre principalmente em condições aeróbias, a principal fonte de microorganismos está presente na própria terra que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final.

Fase II – Transição: quando a capacidade de campo (de retenção de água dos resíduos) é excedida e lixiviado é formado; transição de condições aeróbias para anaeróbias; o acceptor de elétrons muda do oxigênio para nitratos e sulfatos; tendência de estabelecimento de um ambiente com condições de redução; formação de intermediários mensuráveis nos lixiviados como ácidos graxos voláteis (POHLAND e HARPER, 1985).

Fase III – Formação de ácido: ácidos graxos voláteis se tornam predominantes com a hidrólise e fermentação contínuas dos resíduos; ocorrência da diminuição abrupta do pH com mobilização e possível complexação de espécies metálicas; nutrientes como nitrogênio e fósforo são liberados e usados como substratos no crescimento de microorganismos; hidrogênio pode ser detectado e por consequência, afetar a natureza e tipos de produtos intermediários que estão sendo formados (POHLAND e HARPER, 1985).

Nesta fase, o CO₂ é o principal gás gerado e os microorganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas (TCHOBANOGLIOUS, et al, 1993 *apud* ENSINAS, 2003).

Fase IV – Fermentação do metano: produtos intermediários que aparecem durante a fase de formação de ácidos são convertidos em metano e dióxidos de carbono em excesso; aumento do pH controlado pela capacidade tampão do meio; potenciais de oxi-redução se encontram nos seus valores mais baixos; nutrientes continuam a ser consumidos; ocorrência de complexação e precipitação de metais; a concentração de material orgânico diminui drasticamente em consonância com um aumento na produção de gás (POHLAND e HARPER, 1985). Durante a quarta fase, metano é gerado entre 40 e 70% do volume total de gás (MCBEAN, 1995 *apud* BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004).

Fase V – Maturação final: dormência relativa seguida da estabilização biológica dos componentes orgânicos disponíveis; os nutrientes podem tornar-se limitantes; a produção de biogás praticamente cessa; oxigênio e espécies oxidadas podem reaparecer lentamente com aumento no potencial de oxi-redução; materiais orgânicos resistentes à biodegradação podem ser lentamente convertidos em substâncias húmicas e pode ocorrer a complexação e mobilização de metais pesados (POHLAND e HARPER, 1985).

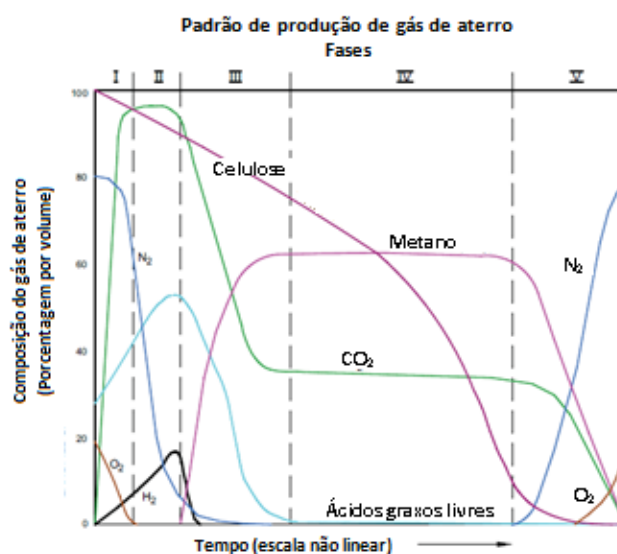


Figura 6. Fases de produção de gás de aterro
Fonte: Adaptado de Banco Mundial/ESMAP, 2004.

Tipicamente, os resíduos na maior parte dos aterros alcançará uma fase metanogênica estável em menos de dois anos após a disposição dos resíduos. Mas dependendo de características como o conteúdo de umidade dos RSU, a fase metanogênica pode ser alcançada logo após seis meses de deposição. O gás de aterro pode ser produzido em um local por décadas, com emissões continuando em níveis decrescentes por mais de cem anos a partir da data de deposição (BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004).

Mas a duração de cada fase é dependente de uma série de fatores, como da distribuição da matéria orgânica no aterro, da disponibilidade de nutrientes, do teor de umidade dos resíduos, do seu grau de compactação inicial, de microorganismos e pH (TCHOBANOGLOUS et al, 1993 *apud* ENSINAS, 2003; BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004). O Banco Mundial/ESMAP (2004) apresenta valores de intervalos de tempo para cada fase, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Intervalos de tempo típicos para cada fase de produção de gás de aterro

Fases	Condição	Intervalo de tempo típico
I	Aeróbia	horas a 1 semana
II	Anóxica	1 a 6 meses
III	Anaeróbia, metanogênica, instável	3 meses a 3 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica, estável	8 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica, declínio	1 a 40+ anos
Total		10 a 80+ anos

Fonte: Banco Mundial/ESMAP (2004).

A geração de biogás é influenciada por uma série de fatores, relacionados com os ambientes externo e interno das células e pela forma de construção e operação do aterro e as características iniciais dos resíduos (VAN ELK, 2007). Alguns dos mais relevantes são apresentados a seguir:

- **Composição do resíduo:** este fator é o mais importante para avaliação do potencial de geração do gás de aterro. O volume máximo potencial de gás é dependente da quantidade e tipo de conteúdo orgânico dentro da massa de resíduos, já que resíduos orgânicos biodegradáveis são as maiores fontes de todo gás de aterro produzido (RAJARAM, et al, 2011; BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004).
- **Idade do resíduo:** a geração de gás (metano) em um aterro possui duas variáveis dependentes do tempo, sendo elas o tempo de atraso (período que vai da disposição dos resíduos até o início da geração do metano) e tempo de conversão (que vai da disposição dos resíduos até o final da geração de metano) (BRITO FILHO, 2005).
- **Umidade:** um dos fatores mais importantes que afetam a geração de gás, servindo como meio de transporte para nutrientes e bactérias. O teor de umidade é influenciado principalmente, pela infiltração de águas de chuva. Outros fatores incluem tipo de cobertura diária usada, permeabilidade da cobertura final, sistema de coleta de lixiviados, profundidade dos resíduos, dentre outros (BANCO MUNDIAL/ESMAP, 2004).
- **Temperatura:** interfere nos tipos de bactérias predominantes e na taxa de produção de gás. A formação de metano pode ocorrer a uma extensa faixa de temperatura, entre 0° e 97°. Em ambientes anaeróbios, podem existir três faixas ótimas de temperatura, sendo elas psicrófila (ainda não bem definida), mesófila (30 a 35°) e termófila (50 a 55°C). Em um aterro sanitário, as máximas temperaturas são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição de resíduos como resultado da atividade aeróbia microbiana, diminuindo nas condições anaeróbias. Geralmente, a temperatura nos aterros não ultrapassa os 45°C, sendo difícil um aterro ser operado na faixa termófila (GONÇALVES, 2007).
- **pH:** o potencial hidrogeniônico (pH), um importante aspecto já que afeta o balanço entre as várias populações de microorganismos e também o nível de atividade microbiana. As archaeas metanogênicas são as mais sensíveis ao pH. A faixa normalmente aceita por estas archaeas está entre 6,5 e 7,6. Conforme experiências Brasileiras, a produção de metano é máxima quando o pH situa-se na faixa de 7,0 a

7,2, sendo que a atividade microbiana no aterro sanitário pode ser inibida em valores abaixo de 6,0 e superiores a 7,6 (BIDONE e POVINELLI, 1999).

- Tamanho das partículas: há uma relação inversamente proporcional entre a superfície exposta dos resíduos e o tamanho destes, expressa pela superfície específica. Assim, observa-se um aumento da velocidade de degradação quando a massa é composta por resíduos menores (VAN ELK, 2007). Na Figura 7 também encontram-se outros fatores que influenciam na geração do gás de aterro, além dos citados anteriormente.

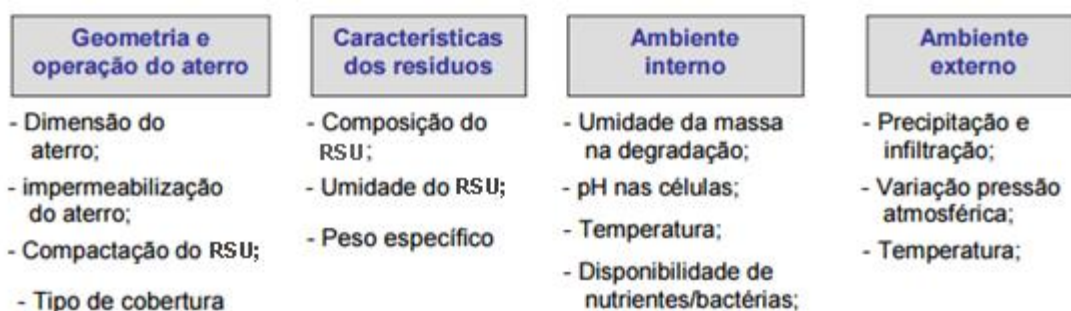


Figura 7. Principais fatores que influenciam na geração de gás.

Fonte: Modificado de Maciel, 2009.

Estudos teóricos e experimentais relataram que a biodegradação anaeróbia completa dos RSU pode gerar cerca de 200 m³ de metano por tonelada seca de biomassa (THEMELIS e ULLOA, 2006). Segundo Rajaram, et al (2011) uma tonelada de RSU produz cerca de 150 a 250 m³ de gás de aterro com um conteúdo de metano de cerca de 40 a 50% por um período de 15 a 25 anos. Nos aterros sanitários de Bandeirantes em São Paulo e do Delta em Campinas, os valores estimados do potencial de geração de metano foram de 125 e 157 m³ de metano por tonelada de RSU, respectivamente (ENSINAS, 2003).

2.2.1 Estimativa da produção de biogás

Para a estimativa da produção de gás de aterro, geralmente usa-se de uma equação de primeira ordem (BARROS, et al, 2014), como é o caso do programa LandGEM da USEPA. Esse tipo de modelo de decaimento de primeira ordem, conforme Machado *et al* (2009), é geralmente reconhecido como o mais amplamente usado, sendo recomendado pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) e pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).

Além da USEPA (2005) e do IPCC (2000), o Banco Mundial (2004) e a CETESB (2006) também apresentam seus modelos para estimativa da produção de biogás, mas eles têm

em comum o fato de adotarem as equações cinéticas de primeira ordem. Apesar de a produção de gás e a taxa de geração dos gases poderem variar conforme o modelo, estes possuem praticamente os mesmos parâmetros de entrada, destacando-se a quantidade de RSU aterrada, o tempo de atividade do aterro, a taxa de geração do metano (k) e o potencial de geração do metano (L_0).

O programa LandGEM da USEPA utiliza da Equação (1) de primeira ordem para estimar emissões anuais por um período de tempo determinado (USEPA, 2005):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}}, \quad (1)$$

Onde:

Q_{CH_4} = geração anual de metano no ano do cálculo (m^3 /ano);

i = incremento de tempo de um ano;

j = (ano do cálculo) – (ano inicial de recebimento de resíduos);

n = incremento de tempo de 0,1 ano;

k = taxa de geração de metano (ano^{-1});

L_0 = capacidade potencial de geração de metano (m^3 /Mg);

M_i = massa de resíduos aceita no i -ésimo ano (Mg);

t_{ij} = idade da j -ésima seção de massa de resíduo M_i aceita no i -ésimo ano (anos em decimais, por exemplo 3,2 anos).

O parâmetro k determina a taxa de geração de metano para a massa de resíduos no aterro. O valor de k é essencialmente dependente de quatro fatores, sendo eles: umidade da massa de resíduos; disponibilidade de nutrientes para os microorganismos que decompõem os resíduos formando metano e dióxido de carbono; e pH e temperatura da massa de resíduos (USEPA, 2005). A constante k está relacionada com o tempo necessário para a fração de carbono orgânico degradável dos RSU decair pela metade de sua massa inicial, podendo ser obtida por processo iterativo quando são conhecidas a vazão de gás metano do aterro, o valor de L_0 e a quantidade e o tempo de deposição de resíduos no local (ENSINAS, 2003).

O valor de k padrão utilizado pelo programa LandGEM é de $0,05 \text{ ano}^{-1}$, mas os valores incluem uma variação de $0,02 \text{ ano}^{-1}$ para locais secos a $0,07 \text{ ano}^{-1}$ para locais úmidos (USEPA, 2005). Segundo Borba (2006), taxas mais rápidas ($k=0,2/\text{ano}$ ou uma meia vida de aproximadamente 3 anos) estão vinculadas a condições de elevada umidade e materiais rapidamente degradáveis, enquanto que taxas mais lentas ($k=0,03/\text{ano}$ ou uma meia vida de 23 anos) se associam a aterros de resíduos secos e a resíduos de degradação lenta. Como

exemplo, os valores de k encontrados para o Aterro de Bandeirantes, em São Paulo e o Aterro Delta, em Campinas são de 0,0395/ano e 0,0283/ano, respectivamente (ENSINAS, 2003).

A Capacidade Potencial de Geração de Metano (L_0) depende somente do tipo e composição dos resíduos depositados no aterro. Quanto maior o conteúdo de celulose dos resíduos, maior o valor desta variável. Os valores padrão usados pelo programa são representativos dos resíduos sólidos urbanos. O valor de L_0 , como é usado na equação da taxa de decomposição de primeira ordem, é medida em unidades métricas de metros cúbicos por megagrama. O valor *default* que o programa adota é 170 m³/Mg (USEPA, 2005).

O parâmetro é dependente da composição dos resíduos, e em particular da fração de matéria orgânica presente. Sua estimativa é baseada no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e em um fator de conversão estequiométrica. Valores típicos variam de 125 a 310 m³ de metano/tonelada de resíduos (Banco Mundial/ESMAP, 2004).

Em condições brasileiras, o fator k pode ser aplicado com magnitudes de 0,05/ano a 0,15/ano. E o fator L_0 varia de 140 a 190 m³/t, uma vez que no Brasil a matéria orgânica constitui cerca de metade dos resíduos sólidos urbanos (CEPEA, 2004 apud GONÇALVES, 2007).

2.2.2 Captação do gás de aterro

A coleta de biogás começa geralmente depois que uma porção do aterro, conhecida como célula, é fechada para deposição adicional de RSU. Um sistema de captação de biogás é composto basicamente por drenos, que podem ser horizontais e/ou verticais, sistema de coleta de condensado, compressor e *flares* (USEPA, 2015b).

O método mais comum de coleta de gás de aterro é o uso de drenos verticais. Drenos horizontais são usuais em aterros mais profundos e em áreas de enchimento ativo. Alguns sistemas de coleta usam uma combinação dos dois tipos. O projeto depende condições específicas de cada local e do tempo de instalação do sistema de coleta do gás (USEPA, 2015b).

Os drenos existentes na grande maioria dos aterros sanitários brasileiros podem ser adaptados e integrados ao sistema de captação. A adaptação consiste na impermeabilização da parte superior dos drenos, instalação de um cabeçote e integração ao sistema de coleta. As tubulações provenientes dos drenos são interligadas a pontos de regularização de vazão ou

manifolds, e estes são interligados a uma linha principal, que irá conduzir o biogás para os sistemas de queima em *flare* e/ou reaproveitamento energético (ICLEI, 2009).

Um sistema de coleta de condensado é necessário já que o gás de aterro se esfria ao longo do mesmo. Se o condensado não é removido, pode haver o bloqueio do sistema de coleta e interromper o processo de aproveitamento energético (USEPA, 2015b).

Um soprador é necessário para succionar o gás a partir das tubulações de coleta para a unidade de coleta e levar o gás para tratamento posterior e sistemas de recuperação energética. O tamanho, tipo e quantidade de sopradores dependem da taxa de vazão de gás e da distância dos processos seguintes (USEPA, 2015b).

Os *flares* estão presentes em grande parte dos aterros que possuem sistemas de aproveitamento energético para combustão do gás em excesso e para uso durante desligamentos do sistema, neste caso quando os motores precisam passar por manutenção, por exemplo. É uma maneira economicamente efetiva para o aumento gradual do tamanho do sistema de geração de energia. Enquanto mais resíduos são dispostos, e o sistema de coleta de gás é expandido, este equipamento é utilizado para controlar o excesso de gás durante mudanças do sistema de conversão, prevenindo assim, a emissão direta de metano na atmosfera. Podem ser abertos ou enclausurados (USEPA, 2015b). É recomendada a instalação de um *flare* enclausurado especialmente para os projetos destinados à obtenção de créditos de carbono (ICLEI, 2009).

Para uso do gás de aterro em um sistema de recuperação energética usualmente é necessário um tratamento do gás para remover excesso de umidade, particulados e outras impurezas. O tipo e extensão do tratamento do gás dependem das características específicas do aterro e do tipo do sistema de recuperação energética usado. Caldeiras e maior parte dos motores de combustão interna (MCI) geralmente requerem tratamento mínimo do biogás, normalmente desumidificação, filtração de particulados e compressão. Alguns motores a combustão interna e muitas aplicações que usam turbinas a gás e microturbinas também requerem remoção de siloxanos e sulfureto de hidrogênio após a etapa de desumidificação (USEPA, 2015b).

2.2.3 Tecnologias de conversão do gás de aterro

Conforme observado por Rajaram et al (2011), a utilização de gás de aterro em projetos de energia é uma maneira de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE),

melhorar a qualidade local do ar e controlar odores. Estes projetos também fornecem vários outros benefícios econômicos e ambientais para a comunidade, para o aterro, e para o usuário final da energia.

O gás de aterro pode ser classificado em três categorias, de acordo com o Banco Mundial/ESMAP (2004), dependendo do nível de tratamento necessário anteriormente à sua utilização:

- Combustível de baixo teor: utilização do gás de aterro de baixa qualidade requer processamento mínimo, envolvendo câmaras de remoção de condensado como parte do sistema de coleta do gás, e locais de remoção de umidade para reduzir a umidade no fluxo de gás. Possui tipicamente poder calorífico inferior de 16,8 MJ/m³;
- Combustível de teor médio: também possuem geralmente poder calorífico de 16,8 MJ/m³. Neste caso, dispositivos adicionais de tratamento de gás são utilizados de modo a retirar mais umidade (com contaminantes) e material particulado mais fino. O processo envolve geralmente a compressão e refrigeração do gás e/ou tratamento químico ou purificação para remover umidade adicional e compostos gasosos traço de mercaptanas, compostos de enxofre, siloxanos e compostos orgânicos voláteis;
- Combustível de alta qualidade: é necessário extensivo tratamento para separação do dióxido de carbono e outros constituintes gasosos, e para remover impurezas como mercaptanas, compostos de enxofre, sulfureto de hidrogênio, e compostos orgânicos voláteis, além de compressão do gás para consequente desidratação. Possui poder calorífico de 37,3MJ/m³.

O principal uso do biogás produzido em aterros é como combustível para transformação em energia elétrica, utilizando-se principalmente MCI, sendo motores de ciclo Otto os mais utilizados (ICLEI, 2009). Para ser utilizado nestes tipos motores, faz-se necessária a identificação de sua vazão, composição química e poder calorífico, que determinam o real potencial de geração de energia elétrica, além de permitir dimensionar os processos de pré-tratamento (COELHO, 2006). De uma maneira geral, para garantir a instalação de 1MWe, estima-se que são necessários de 670 a 800 m³/h de biogás com uma concentração de 50% de metano (ABRELPE, 2013).

As seguintes tecnologias podem ser utilizadas para conversão em eletricidade:

- **Motores alternativos de combustão interna:** motor ciclo Otto é o motor mais utilizado para queima do biogás, por seu maior rendimento elétrico e menor (o conjunto) custo em relação às outras tecnologias (ICLEI, 2009). Motores recíprocos ou alternativos de combustão interna são normalmente a tecnologia para geração de

eletricidade mais viável economicamente em relação a aterros contendo de 1 milhão a 5 milhões de toneladas de resíduos, mas também têm sido utilizados em aterros com até 10 milhões de toneladas de resíduos. Tipicamente, um aterro de RSU com 1 milhão de toneladas de resíduos depositados é compatível com um projeto de eletricidade entre 0,8 e 1MW (ABRELPE, 2013). Eles utilizam o biogás diretamente, sem um tratamento sofisticado, pois secagem e filtração são suficientes (SILVA, 2012), e pode-se utilizar de múltiplos motores se necessário (USEPA, 2015b). Possuem eficiência de cerca de 33% (BOVE E LUNGHI, 2006).

- **Turbinas a gás:** representam a segunda tecnologia mais utilizada para conversão energética do gás de aterro. Dentre as desvantagens, pode-se citar que uma turbina a gás de menor tamanho apresenta maiores perdas energéticas em comparação a motores de combustão interna. Apresentam também baixo desempenho a baixas cargas. Possuem eficiência na faixa de 28% (BOVE E LUNGHI, 2006). Dentre as vantagens inclui-se a menor geração de NOx em relação aos motores recíprocos, e apresentam custos de manutenção relativamente baixos. Este tipo de tecnologia é utilizada em vários aterros de RSU de grande porte, que contêm mais de 5 milhões de toneladas de resíduos, e projetos que geram mais de 5MW em eletricidade (ABRELPE, 2013).
- **Microturbinas:** constituem-se em nova opção tecnológica para o aproveitamento energético do gás de aterro, especialmente quando se faz referência a aterros menores. Geralmente, são mais adequadas para aplicações pequenas com potência menores que 1MW, e são projetadas para fornecimento de eletricidade para atender às necessidades de energia do próprio local, assim como usuários finais próximos do local de geração (ABRELPE, 2013). De acordo com Ensinas (2003), existe a possibilidade de uso de grupos desses equipamentos com potências de 30 a 100 kW cada, flexibilizando o uso do gás da maneira mais conveniente, de acordo com a necessidade local. Esta é uma alternativa interessante quando há pequena vazão de gás e os motores de combustão interna ou turbinas a gás de grande porte são inadequados.
- **Turbinas a vapor:** os sistemas de ciclo a vapor funcionam conforme o ciclo Rankine, que consistem basicamente de caldeira, turbina, condensador e bomba (ICLEI, 2009). Este tipo de tecnologia é adequada para aterros maiores, com pelo menos 15 milhões de toneladas de RSU dispostos em sua vida útil e rendem uma produção típica de no mínimo 10MW. Mas foram aplicados em poucos aterros de grande porte, por seu maior custo de capital e às exigências de porte (ABRELPE, 2013).

- **Motores Stirling:** motores do ciclo Stirling são motores de combustão externa que produzem energia por expansão e compressão, de maneira alternada, de um gás de trabalho no interior de uma câmara fechada. Desde janeiro de 2003, as primeiras demonstrações bem sucedidas de motores Stirling de 2-25 kW e 10-25kW usando gás de aterro estão operacionais em dois aterros de Michigan-EUA. Demonstração do primeiro *sundish* elétrico híbrido térmico (tecnologia que combina energia solar e motor Stirling usando gás de aterro) tem funcionado com sucesso desde 1999 (RAJARAM, et al, 2011). Conforme Bove e Lunghi (2006), as duas principais desvantagens desta tecnologia são a indisponibilidade de equipamentos de tamanho relativamente grande e a falta de projetos demonstrativos.

Além do uso para produção de eletricidade, o gás de aterro pode ser aproveitado para outros fins, como o uso direto ou combustível alternativo:

- **Uso direto (energia térmica):** a combustão direta do gás de aterro é amplamente a opção de reuso mais fácil e barata, sendo que seu uso para substituir ou complementar carvão, petróleo, propano e o gás natural já foi comprovado com sucesso. Algumas aplicações incluem a queima em caldeiras, aquecimento de espaços, fornos de cimento e tijolos, secagem de lodo, e secagem e incineração de chorume. Na maior parte dos casos, a limpeza do gás consiste em pouco além da remoção do condensado; e as modificações necessárias em equipamentos e procedimentos também são mínimas (ABRELPE, 2013).

- **Combustível alternativo:** o gás de aterro como combustível de alta qualidade (biometano) pode ser injetado no gasoduto de gás natural, usado como combustível veicular, células combustíveis, e produção de metanol (RAJARAM, et al, 2011). Para este fim, no Brasil, deve-se considerar as especificações apresentadas na Resolução nº8/2015 (ANP, 2015) da Associação Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

2.3 A tecnologia solar fotovoltaica

O efeito fotovoltaico, base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica por meio da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um 'sanduíche' de materiais semicondutores. Se esta célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles, e se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos surgirá uma corrente elétrica (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Esta corrente elétrica produzida pela célula fotovoltaica, quando exposta à luz, pode ser usada em uma infinidade de aplicações, como para alimentar aparelhos elétricos, carregando baterias ou fornecendo eletricidade para ruas, bairros e cidades nos sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Como exemplo, é mostrado na Figura 8 uma célula conectada a uma carga externa, no caso uma lâmpada, usada para fornecer energia.

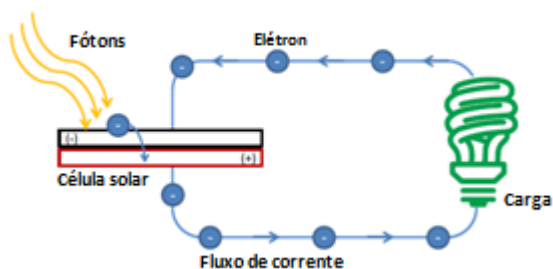


Figura 8. Geração de eletricidade a partir de uma célula fotovoltaica.
Fonte: Traduzido de USEPA, 2015a.

Mas uma célula fotovoltaica sozinha produz pouca energia e apresenta uma tensão elétrica muito baixa; então, várias células podem ser ligadas em série para fornecer uma grande quantidade de energia elétrica e uma tensão mais elevada. Atualmente, as células fotovoltaicas produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente são majoritariamente constituídas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Este domínio de tecnologias fotovoltaicas desenvolvidas a partir silício se deve a uma reputação bem estabelecida devido à confiabilidade e durabilidade, com sistemas instalados a mais de 20 anos ainda apresentando bom desempenho apesar de todo o tempo percorrido (GREEN, 2014).

2.3.1 Sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede

Os sistemas fotovoltaicos podem ser isolados (ou autônomos) e conectados à rede. Nos dois casos, podem operar a partir apenas da fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos (PINHO e GALDINO, 2014).

Sistemas fotovoltaicos isolados podem ser empregados em locais não atendidos por uma rede elétrica, para iluminação pública, na sinalização de estradas, na alimentação de sistemas de telecomunicações e no carregamento de baterias de veículos elétricos. Podem também ser utilizados para fornecer eletricidade para veículos terrestres e náuticos e um número grande de aplicações, desde pequenos aparelhos eletrônicos portáteis até sistemas

aeroespaciais (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Sistemas isolados, sendo eles puramente fotovoltaicos ou híbridos, em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento (como é o caso do uso de baterias), e de uma unidade responsável pelo controle e condicionamento de potência composta por inversor e controlador de carga (PINHO e GALDINO, 2014).

Os módulos fotovoltaicos produzem energia na forma de corrente e tensão contínuas, sendo que para algumas aplicações é necessário converter essa energia em tensão e corrente alternadas através do inversor. Em relação ao controlador de carga, ele é usado para regular a carga da bateria e prolongar sua vida útil, protegendo-a de sobrecargas ou descargas excessivas (PINHO e GALDINO, 2014).

Sistemas conectados à rede são os sistemas em que a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica (PINHO e GALDINO, 2014). Estes tipos de sistema vêm ganhando destaque mundialmente. Conforme Villalva e Gazoli (2012), o objetivo do sistema fotovoltaico conectado à rede é gerar eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou inclusive eliminar o consumo da rede pública ou mesmo gerar excedente de energia.

Estes sistemas foram incluídos na regulamentação da ANEEL, por meio da Resolução Normativa nº 482 de 17 abril de 2012 (ANEEL, 2012), alterada pela Resolução Normativa nº 687 de novembro de 2015 (ANEEL, 2015c), que “estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências” (ANEEL, 2012).

No sistema de compensação de energia elétrica (ou *net metering*), permite-se que a energia excedente, se houver, gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede distribuidora, que funcionará como uma bateria, armazenando este excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora. Assim, a energia elétrica gerada por essa unidade consumidora é cedida à distribuidora local, sendo posteriormente compensada com o consumo de eletricidade dessa mesma unidade consumidora, ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade. Na prática, se em um determinado ciclo de faturamento, a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) na próxima fatura. Caso contrário, o consumidor irá pagar apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada (ANEEL, 2014).

Esses créditos podem ser utilizados em outras unidades previamente cadastradas, desde que dentro da mesma área de concessão e caracterizada como autoconsumo remoto,

geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condimínios), em local diferente do ponto de consumo (ANEEL, 2016; 2015c), e são definidas como:

- Geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores de mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2015c);
- Autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras com titularidade de mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, em uma mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2015c);
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracteriza-se pela utilização da energia elétrica de forma independente, em que cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento (ANEEL, 2015c).

Esse mecanismo de compensação de energia, garante que a eletricidade gerada e fornecida à rede tenha o mesmo valor econômico que a energia vendida pela empresa de energia aos consumidores (SEI, 2012). O sistema de compensação de energia acaba contribuindo na redução dos custos de sistemas fotovoltaicos já que elimina a necessidade de uso de baterias para armazenamento (JANNUZZI e MELO, 2013). Apesar disso, Faria Jr. et al (2016) afirmam que esse tipo de incentivo não é forte o suficiente para estimular a geração solar distribuída no Brasil, havendo necessidade de maior suporte, como dedução de taxas sobre equipamentos fotovoltaicos, condições de financiamento especiais, e incentivos sobre equipamentos, montagem e instalação. Pinto, et al (2016) sugerem também a implantação de tarifas *feed-in* de modo a aumentar ainda mais o estímulo a este tipo de geração.

No Brasil, os consumidores, ou unidades consumidoras, são classificadas em dois

grupos tarifários: Grupo A e Grupo B. Ao Grupo B, geralmente pertencem as residências, lojas, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais, grande parte dos edifícios residenciais e a maioria dos prédios públicos federais, já que, na sua maioria são atendidos nas tensões de 127 ou 220 volts. E no Grupo A, estão os consumidores atendidos em alta tensão, como indústrias, *shopping centers* e alguns edifícios comerciais (ELETROBRAS, 2011). E quanto ao faturamento da unidade consumidora integrante do sistema de compensação de energia elétrica, deve ser cobrado neste, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade para o consumidor do grupo B (valor em reais equivalente a 30 kWh-monofásico, 50kWh-bifásico, ou 100kWh-trifásico), ou da demanda contratada para o consumidor do grupo A, conforme o caso (ANEEL, 2016; 2015c).

Os dois grupos apresentam subdivisões. O Grupo B é subdividido de acordo com a atividade do consumidor em Subgrupos B1 (residencial), B2 (rural), B3 (demais classes, por exemplo, poder público) e B4 (iluminação pública). E o Grupo A é subdividido de acordo com a tensão de atendimento em Subgrupos A1 (para nível de tensão de 230 kV ou mais), A2 (88 a 138 kV), A3 (69 kV), A3a (30 a 44 kV), A4 (2,3 a 25 kV) e AS (para sistema subterrâneo. Neste caso, os poucos prédios públicos classificados no Grupo A, em geral estão no Subgrupo A4 (ELETROBRAS, 2011).

Para o Grupo A, as tarifas são constituídas em três modalidades de fornecimento: estrutura tarifária convencional, estrutura tarifária horo-sazonal verde, e estrutura tarifária horo-sazonal Azul. Nos três casos, há exigência de um contrato específico com a concessionária (ELETROBRAS, 2011).

Na estrutura tarifária Convencional, se determina um valor da demanda pretendida pelo consumidor ('Demanda Contratada'), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco ou úmido). E a fatura de eletricidade desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, da demanda, e demanda de ultrapassagem, caso essa exista (ELETROBRAS, 2011).

Na estrutura tarifária horo-sazonal Verde, também se pactua a demanda pretendida pelo consumidor, independente da hora do dia, se ponta ou fora de ponta. Neste caso, a fatura de energia compõe-se da soma das parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela, separadamente), demanda e ultrapassagem. E na estrutura tarifária horo-sazonal azul, deve ser pactuado tanto o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta, quanto o valor pretendido nas horas fora de ponta. E a fatura de energia elétrica é composta pela soma das parcelas referentes ao consumo e demanda (e ultrapassagem, caso exista), sendo que em todas as parcelas observa-se diferenciação entre horas de ponta e horas fora de ponta

(ELETROBRAS, 2011). Em relação ao horário de ponta, este corresponde ao período de três horas consecutivas entre o intervalo das 17h e 22h, a ser definido por cada distribuidora de energia, de acordo com o registro do maior consumo (CEMIG, 2017a).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica podem ser centralizados, constituindo usinas de geração de energia elétrica, ou micro e minissistemas descentralizados de geração distribuída instalados em qualquer tipo de consumidor. A ANEEL (2015c) apresenta a seguinte diferenciação em categorias conforme o tamanho do sistema: microgeração, com potência instalada de até 75 kW; minigeração, com potência instalada entre 75 kW e 3 MW para fontes hídricas, ou até 5 MW para cogeração qualificada.

Estes tipos de instalações conectadas à rede vêm se tornando cada vez mais populares em diversos países europeus, Japão, Estados Unidos, e mais recentemente o Brasil. As potências instaladas vão desde poucos kWp em instalações residenciais, até da ordem de MWp em grande sistemas operados por empresas (PINHO e GALDINO, 2014). Em países desenvolvidos, sistemas fotovoltaicos conectados à rede são o segmento de maior crescimento no mercado de energia. De 1999 a 2009 por exemplo, essa indústria teve uma taxa anual de crescimento composta de 42% (RÜTHER e ZILLES, 2011). Por enquanto no Brasil, como pode ser consultado no Banco de Informações de Geração da ANEEL (2017), dos empreendimentos em operação até a data de 21 de junho de 2017, centrais geradoras fotovoltaicas ainda correspondem a apenas 0,02% do total (23.764 kW), mas existem 111 empreendimentos em construção ou em construção não iniciada que somarão mais 2,98 GW.

O potencial brasileiro é muito grande. Uma das maneiras de comprovar isto é observar os valores de irradiação média anual, que varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano. Estes valores são significativamente superiores à maioria dos países europeus, cujas estatísticas indicam intervalos entre 900 e 1.250 kWh/m²/ano na Alemanha, entre 900 e 1.650 kWh/m²/ano na França e entre 1.200 e 1.850 kWh/m²/ano na Espanha (MME/EPE, 2015).

No Atlas Brasileiro de Energia Solar, encontram-se informações sobre o potencial de geração elétrica a partir da matriz fotovoltaica no país. A segunda edição do documento, lançada em julho de 2017, apresenta dados que apontam para uma "enorme" capacidade de explorar esse recurso, principalmente no chamado Cinturão Solar, uma área que se estende do Nordeste até o Pantanal, alcançando o norte de Minas Gerais, o sul da Bahia e o norte e nordeste de São Paulo (BRASIL, 2017).

O Brasil realizou dois leilões para energia solar, que ocorreram em 2014 e em 2015, sendo contratados 2 GW em potência instalada, em empreendimentos a serem implantados até 2017 (EPE, 2014; 2015; COSTA, 2015). Mas um grande crescimento deve ser observado

principalmente em relação à chamada geração distribuída. No estudo “*New Energy Outlook 2015*” da consultoria *Bloomberg New Energy Finance*, é apontado que em 2040, um quinto de toda a capacidade instalada brasileira não virá de usinas, mas da geração distribuída, produzida por consumidores principalmente a partir de painéis fotovoltaicos. A análise considera que da capacidade instalada no país de 383 GW a ser alcançada àquele ano, 80,5 GW virão da fonte solar fotovoltaica (OLIVEIRA, 2015).

Ainda conforme o estudo da Bloomberg, um terço dos investimentos de R\$ 300 bilhões em investimentos para geração de energia elétrica esperados até 2040 terá fins solares. Projetos de grande escala, com mais de 1 MW receberão R\$ 31 bilhões, enquanto que a geração distribuída deverá atrair um montante de US\$ 93 bilhões (BARBOSA, 2015).

Empresas já fabricam módulos fotovoltaicos no país, como a Globo Brasil instalada em Valinhos-SP e a Multisolar Energy em Osasco-SP. A canadense Canadian Solar também já se encontra em operação em Campinas-SP. A empresa Csem Brasil também fabrica em Belo Horizonte-MG células orgânicas, já em escala comercial (MORAES, 2015).

Na Figura 9 observam-se os dez países em termos de maior capacidade instalada e capacidade instalada cumulativa para o ano de 2015 em relação à tecnologia solar fotovoltaica. A Alemanha ainda deixou de ser a líder mundial em 2015 em capacidade acumulada, cedendo essa posição para a China, que passou a ter 43,5 GW instalados. Naquele ano, a China também obteve a liderança em novas instalações, seguida pelo Japão, que passou a oferecer maiores incentivos à energia solar fotovoltaica.

Países com maior capacidade anual instalada em 2015				Países com maior capacidade instalada cumulativa em 2015			
1		China	15,2 GW	1		China	43,5 GW
2		Japão	11 GW	2		Alemanha	39,7 GW
3		EUA	7,3 GW	3		Japão	34,4 GW
4		Reino Unido	3,5 GW	4		EUA	25,6 GW
5		Índia	2 GW	5		Itália	18,9 GW
6		Alemanha	1,5 GW	6		Reino Unido	8,8 GW
7		Coreia do Sul	1 GW	7		França	6,6 GW
8		Austrália	0,9 GW	8		Espanha	5,4 GW
9		França	0,9 GW	9		Austrália	5,1 GW
10		Canadá	0,6 GW	10		Índia	5 GW

Figura 9. Dez maiores países em relação às instalações e capacidade acumulada em 2015.

Fonte: Traduzido de IEA PVPS (2016).

Na Figura 10, observa-se a capacidade acumulada instalada no mundo, alcançando 219.927 MW no ano de 2015, um salto enorme se comparado ao ano de 2000, em que alcançava-se apenas 804 MW. Desde 2010, observa-se que a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no mundo cresceu mais que nas quatro décadas anteriores (MME/EPE, 2015). Este crescimento das instalações vem acompanhado de redução significativa nos

preços deste tipo de instalação.

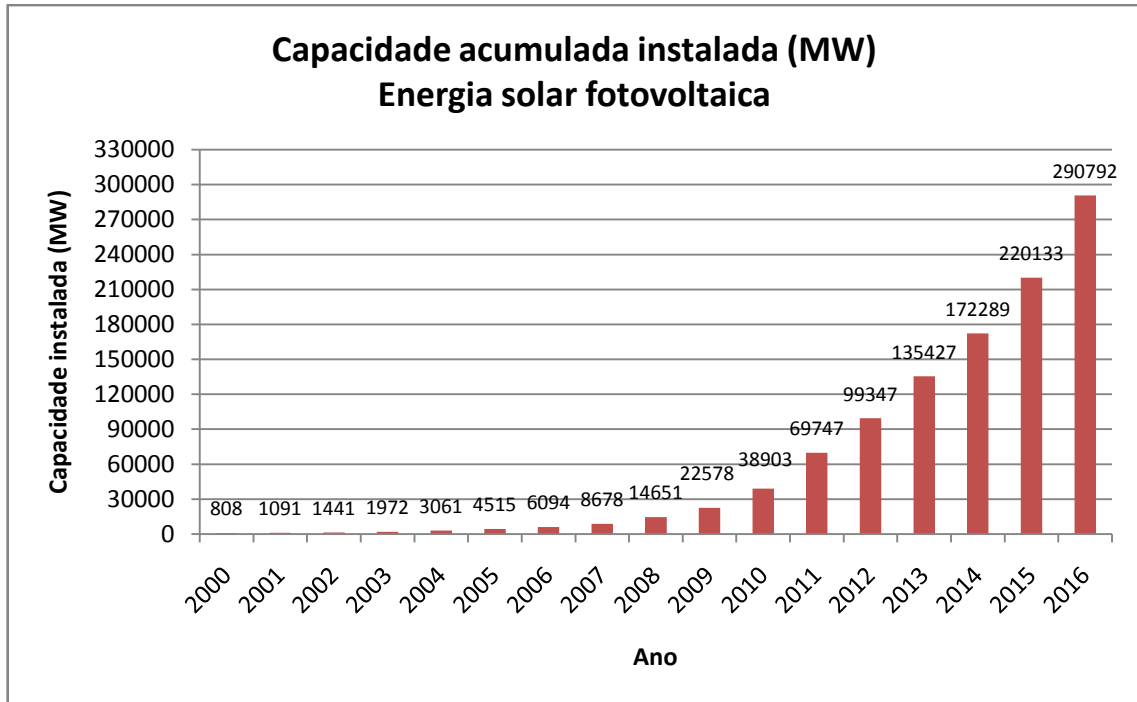


Figura 10. Capacidade acumulada instalada da tecnologia solar fotovoltaica.
Fonte: Adaptado de IRENA (2017).

A IEA-PVPS (2015) estima a produção de pelo menos 200 TWh em 2015 por sistemas instalados e colocados em operação até janeiro de 2015, representando cerca de 1% da demanda mundial de eletricidade, embora alguns países já tenham alcançado rapidamente porcentagens significativas.

2.3.2 Principais componentes de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

Um sistema fotovoltaico conectado à rede é composto de uma série de componentes, incluindo os módulos fotovoltaicos, inversor, e demais componentes para equilíbrio do sistema como as estruturas para suporte dos módulos e cabeamento elétrico (*balance of system components*) (USEPA & NREL, 2013).

Módulos fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é composto por um conjunto de células montadas sobre uma estrutura rígida e conectadas eletricamente. Uma célula fotovoltaica é o dispositivo fotovoltaico básico, e por produzir pouca eletricidade sozinha, várias são agrupadas para produzir os painéis, placas ou módulos. Em relação à terminologia, módulo, placa ou painel têm o mesmo significado, sendo usados indistintamente na literatura para descrever um

conjunto empacotado de células fotovoltaicas disponível no mercado (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos podem ser classificadas em três gerações. A primeira delas divide-se em duas cadeias produtivas: a de silício monocristalino (m-Si) e a de silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado. Isso se deve por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, além de possuir a melhor eficiência comercialmente disponível (PINHO e GALDINO, 2014).

As células de silício monocristalino são as mais eficientes produzidas em larga escala e disponíveis comercialmente, alcançando eficiências de 15 a 18%, mas apresentam custo de produção mais elevado que outros tipos de células. Já as células de silício policristalino têm eficiências comerciais de 13 a 15%; porém, seu custo de fabricação é menor do que o das células monocristalinas, o que compensa essa redução de eficiência. O silício para fabricação de células fotovoltaicas é extraído a partir do mineral quartzo, sendo o Brasil um dos principais produtores mundiais desse minério (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A segunda geração, denominada como tecnologia de filmes finos, é dividida em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração apresenta eficiência menor que a primeira geração e apresenta modesta participação no mercado. Há dificuldades relacionadas à disponibilidade de materiais, vida útil, rendimento das células, e no caso do cádmio, sua toxicidade, que retardam sua utilização em maior escala (PINHO e GALDINO, 2014).

Os dispositivos de filmes finos são produzidos em qualquer dimensão, sendo que a única restrição consiste da área da base para fabricação do módulo. A baixa eficiência acaba fazendo com que necessitem de maior área de módulos para produzir a mesma energia que produzem as tecnologias cristalinas. Uma vantagem frequentemente apontada é seu melhor aproveitamento da luz solar para baixos níveis de radiação e para radiações do tipo difusa. Outro fator é seu coeficiente de temperatura mais favorável, ou seja, a diminuição da produção de energia com o aumento da temperatura é menor que em outras tecnologias; assim, os módulos de filmes finos são mais adequados para locais com altas temperaturas (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino normalmente encontrados no mercado produzem entre 50 e 250 W de potência, enquanto que os módulos de filmes finos, formados por uma célula única com as dimensões do próprio módulo, são encontrados geralmente em

potências em torna de 50 a 100 W (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

E a terceira geração, ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), testes e produção em pequena escala, divide-se em três escalas produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (*Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (*Dye-Sensitized Solar Cells*) e células orgânicas ou poliméricas (*Organic Photovoltaics*) (PINHO e GALDINO, 2014).

Inversor

Inversores são dispositivos eletrônicos que fornecem energia elétrica em corrente alternada (c.a) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (c.c.). A energia elétrica c.c. pode ser oriunda, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. No caso de sistemas conectados à rede elétrica, o caso de interesse deste trabalho, a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (PINHO e GALDINO, 2014).

Estruturas para suporte dos módulos

A estrutura de suporte é concebida especialmente para adaptar-se ao terreno ou à estrutura do prédio, às características dos módulos e à estratégia de ajuste de inclinação e orientação. Para instalações realizadas no solo, deve ser realizado o projeto e escolhido o tipo de fundação mais adequado. A fundação tem por objetivo manter a orientação adequada da estrutura de suporte do gerador fotovoltaico com relação ao sol e também evitar danos ao conjunto durante ventos fortes. Alguns fatores devem ser levados em consideração ao se escolher o tipo de fundação, como o acesso ao local, condições climáticas extremas, topografia, propriedades do solo, o código de obras local, disponibilidade de mão de obra, dentre outros. Os tipos mais comuns são fundação tipo laje, tipo bloco e tipo viga, como podem ser verificadas na Figura 11 (PINHO e GALDINO, 2014). No item 2.4 são verificadas as considerações sobre as fundações para aterros sanitários.

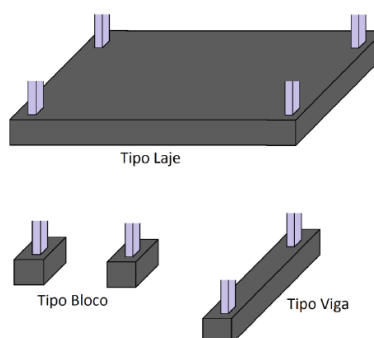


Figura 11. Principais tipos de fundações utilizadas para sistemas fotovoltaicos.
Fonte: Pinho e Galdino, 2014.

A fundação do tipo laje requer grande volume de concreto e terreno relativamente plano. Esta laje pode ser feita no próprio local ou podem ser pré-fabricadas e transportadas até o local da instalação. Este tipo de fundação não é adequado para aplicações distantes, onde o custo para o transporte do cimento é elevado, além de também não ser adequado para terrenos muito acidentados, devido à escavação que seria necessária antes de executar a fundação (PINHO e GALDINO, 2014).

Para terrenos acidentados e locais remotos, a fundação tipo bloco é a mais adequada, por ser relativamente leve e transportável e poder ser pré-fabricada nos locais onde se disponha de cimento e de equipamentos apropriados. Pouca escavação é necessária e os blocos podem ser posicionados com razoável facilidade, minimizando problemas de alinhamento. Os blocos devem ser montados com armaduras e todas as cavidades devem ser totalmente preenchidas com concreto ou argamassa (PINHO e GALDINO, 2014).

A fundação do tipo viga pode ser vista como um meio termo entre os outros dois tipos de fundação, sendo adequada para terrenos ondulados além de proporcionar um fácil alinhamento entre os geradores fotovoltaicos adjacentes. A viga pode ser executada com cimento, peças de madeira ou ainda outros materiais que possuam o formato adequado e resistência suficiente às solicitações. Não há nenhuma fundação que seja aplicável a todas as situações. Uma delas geralmente será mais adequada a uma aplicação particular (PINHO e GALDINO, 2014). Estas estruturas para suporte de sistemas podem ser realizadas com ou sem penetração no solo (USEPA & NREL, 2013). Mais informações específicas para aterros e tipos de fundação são apresentados a partir do item 2.4.

Estes sistemas montados no solo podem ainda ser categorizados como de inclinação fixa (*fixed tilt*) ou com rastreamento (*tracking systems*). Sistemas com inclinação fixa são caracterizados por módulos instalados em um determinado ângulo, tipicamente baseado na latitude local e condições do vento, de modo a aumentar a exposição aos raios solares ao longo do ano. Sistemas deste tipo podem apresentar menores custos de manutenção, mas geram menor quantidade de energia (kWh) por unidade de potência (kW) em comparação com sistemas com rastreamento (USEPA & NREL, 2013).

Sistemas com rastreamento tornam possível a rotação dos módulos fotovoltaicos de maneira a seguir o movimento do sol. Isto possibilita o aumento da energia produzida, mas aumenta os custos de equipamentos e manutenção. O rastreamento com um eixo pode aumentar a produção de energia em 25% ou mais, enquanto que um sistema com rastreamento com dois eixos, em que o sistema está diretamente apontado para o sol por todo o dia, a produção pode ser aumentada em cerca de 35% ou mais (USEPA & NREL, 2013).

Na Figura 12 é possível observar exemplos de sistema de rotação em um e dois eixos.

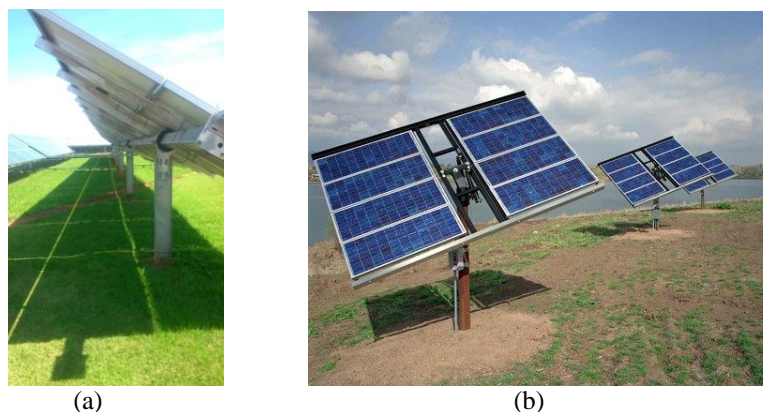


Figura 12. Sistemas de rastreamento com um (a-esquerda) e dois eixos (b-direita).
Fonte: (a) Retirada pelo autor na Usina Solar Tanquinho (2015); (b) USEPA & NREL, 2013.

Estes tipos de sistemas com rastreamento não são normalmente instalados sobre aterros, devido a possíveis problemas de alinhamento devido à ocorrência de recalques (USEPA & NREL, 2013).

Fiação elétrica

Na maioria das instalações tradicionais, a fiação do conjunto fotovoltaico aos inversores, e dos inversores ao ponto de conexão, é geralmente enterrada. No caso de instalações em aterros, pode ser requerido que a fiação seja colocada acima do solo devido a, por exemplo, restrições de penetração da cobertura final. (USEPA & NREL, 2013).

2.4 Considerações sobre instalações solares fotovoltaicas em aterros sanitários

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. Os Estados Unidos, por exemplo, onde se encontra a maioria dos projetos do tipo, por meio do programa chamado *RE-Powering America's Land Initiative* analisou mais de 11.000 áreas contaminadas e aterros de RSU (cobrindo cerca de 6,1 milhões de hectares) para verificar viabilidade de instalação de projetos de energia renovável, incluindo a fonte solar. Essas áreas foram inclusive mapeadas e disponibilizadas pela EPA (USEPA & NREL, 2013).

Há uma quantidade reduzida de estudos nessa área. Um deles inclui o estudo realizado por Szabó *et al* (2017) também verificou o potencial de uso dessas áreas de deposição de

resíduos, não exclusivamente aterros de RSU, revelando a possibilidade de instalar projetos solares fotovoltaicos que somariam 450 MWp na Hungria e, para a União Europeia, as estimativas ficariam ao redor de 13 GWp. Mårtensson e Skoglund (2014), verificaram para a ilha de Gotland, na Suécia, que aterros solares poderiam gerar 22 GWh de eletricidade.

Além dos Estados Unidos, outros países também já contêm, em proporção bem menor, instalações solares em áreas de deposição de resíduos, como é o caso da Alemanha, França, Japão, Portugal, Itália, Taiwan. Algumas instalações são apresentadas no item 3.5.6 deste trabalho.

Há uma série de benefícios quanto a instalações fotovoltaicas nessas 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 redesenvolvimento 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 mais limpas e tecnologias mais rentáveis;
- podem reduzir impactos ambientais de sistemas energéticos (por exemplo, reduzir emissões de gases do efeito estufa).

Muitos aterros de RSU, que recebem maior enfoque neste trabalho, são bem adequados para instalações solares, mas apesar disso nem todo local pode ser considerado como um candidato ideal. Ressalta-se que alguns locais apresentam melhores condições para sistemas solares, uma seleção cuidadosa deve ser feita. Apenas quanto a esses locais, a USEPA pré-selecionou mais de 1.600 locais para analisar o potencial para energia renovável nos Estados Unidos. Algumas vantagens para instalações solares em aterros de RSU incluem o fato de estarem geralmente localizados próximos a infraestruturas críticas como linhas de transmissão e estradas, e também de locais 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, s.d). Nos caso dos Estados Unidos, há apenas alguns projetos fotovoltaicos em aterros de RSU completos, com vários na fase de planejamento (USEPA & NREL, 2013). A Figura 13 ilustra a representação esquemática de uma instalação solar fotovoltaica em aterro de RSU em local que recebeu os resíduos e está desativada para esta atividade.

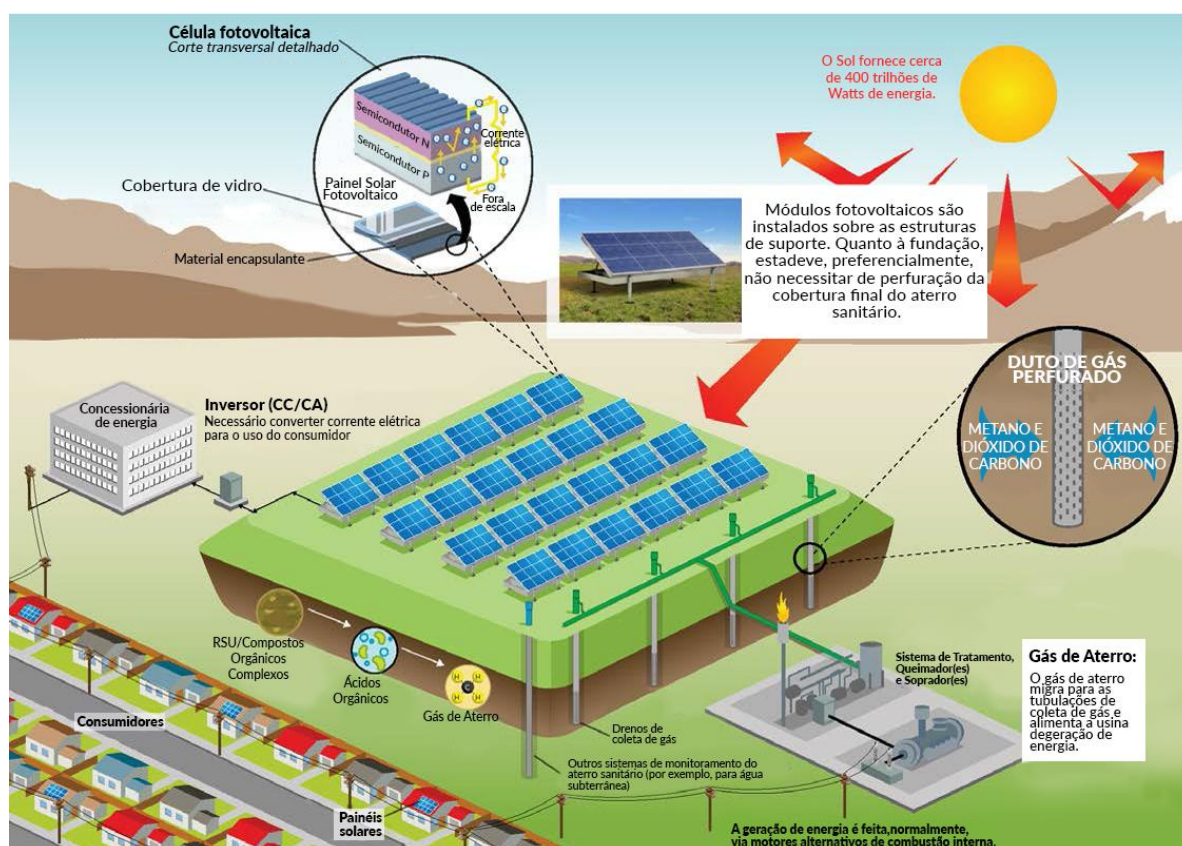


Figura 13. Projeto conceitual de sistema fotovoltaico instalado sobre área de aterro desativada.
Fonte: Modificado de PV Navigator citado por USEPA & NREL, 2013.

A viabilidade da instalação dos painéis fotovoltaicos nestas áreas de aterros sanitários depende das características do aterro, como os sistemas de engenharia existentes, características da cobertura, declividade e estabilidade, composição dos resíduos, recalques, controle de erosão e cobertura vegetal, sistema de coleta de lixiviados e gás e sistemas de tratamento, e controle de águas pluviais (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, 2013).

Conforme USEPA & NREL (2013), é importante desenvolver projetos fotovoltaicos em aterros como um projeto integrado, não como sistemas separados. Por exemplo, desde o início das análises, previsões existentes podem prever recalques baseados em dados históricos. Estas previsões são feitas na ausência de um sistema fotovoltaico. Após a instalação de tal sistema, este pode afetar a taxa ou padrão de recalque ao longo do tempo, devido ao peso do sistema fotovoltaico, como mostrado na Figura 14. Assim, a análise deve considerar os dois sistemas em conjunto.

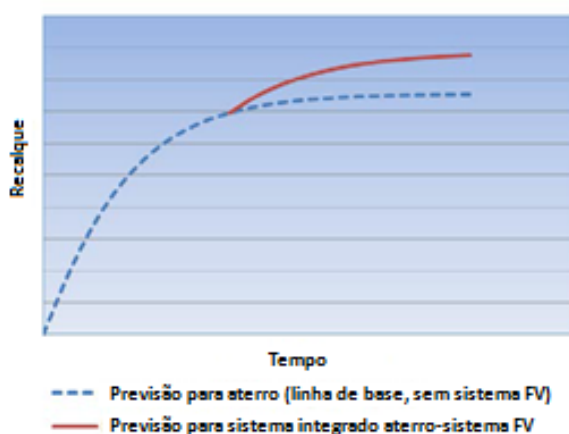


Figura 14. Aterro de resíduos sólidos urbanos e sistema fotovoltaico como um sistema integrado. O analista deve basear as considerações de viabilidade nas previsões de recalque do aterro de RSU com o sistema fotovoltaico.

Fonte: Adaptado de USEPA & NREL, 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).

Em locais onde o peso do sistema solar for uma preocupação de engenharia, por exemplo, células solares de filme fino flexíveis podem ser uma escolha preferível. O uso deste tipo de tecnologia fotovoltaica elimina a necessidade da estrutura convencional de suporte do sistema e de fundações, podendo ser instalada diretamente sobre coberturas de geomembrana, como pode ser visto na Figura 15. Mas em contraste, painéis com a tecnologia monocristalina

ou policristalina podem ser mais leves em relação à produção de energia por peso do que painéis convencionais de filme fino (amorfo). Quando espaço aberto for limitado e busca-se a máxima produção de energia, painéis mono ou policristalinos podem ser a melhor escolha pela vantagem de produção em relação a filmes finos (SAMPSON, 2009). Mas a solução final deve ser considerada caso a caso na análise de viabilidade de instalação.



Figura 15. Lâminas fotovoltaicas flexíveis instaladas sobre geomembrana no aterro Tessman Road em San Antonio, Texas - Estados Unidos. Fonte: Sampson, 2009.

Caso também haja no aterro sanitário um sistema de geração de energia para aproveitamento do gás de aterro, uma medida interessante seria considerar se os sistemas operariam como um sistema híbrido ou se operariam separadamente. A estratégia de usar um sistema híbrido pode maximizar o valor econômico de ambos sistemas. A geração de gás de aterro pode ser usada para complementar a produção do sistema fotovoltaico. Por exemplo, se a produção do sistema solar diminui durante o dia, a geração a partir do gás de aterro pode ser aumentada para compensar tal diminuição. A produção dos sistema híbrido também pode ser controlada de modo a combinar com as necessidades de fábricas/indústrias, se energia é vendida a elas, e usar preços maiores de venda devido à habilidade do sistema híbrido de fornecer energia quando necessário (USEPA & NREL, 2013).

Se uma unidade de geração já está operacional no local, esta estratégia poderia provavelmente reduzir requisitos de interconexão e custos em relação à instalação apenas de um sistema fotovoltaico, já que muitos dos equipamentos de interconexão e requisitos regulatórios já estariam operando no local. Além disso, se a produção de gás de aterro diminui, o sistema solar fotovoltaico pode ser aumentado para aproveitar a capacidade de transmissão existente no local (USEPA & NREL, 2013).

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). Nos próximos itens, aspectos e formas de instalação quanto a sistemas solares fotovoltaicos em aterros de RSU são abordados.

2.4.1 Recalques

A engenharia geotécnica convencional define recalque como a deformação positiva do terreno ocasionada a partir da aplicação de cargas externas ou de seu próprio peso. Em relação a aterros de RSU, esses recalques podem ser definidos como deslocamentos verticais descendentes da superfície do aterro, provocados por cargas externas, peso próprio dos resíduos ou camada de cobertura e principalmente, devido à degradação biológica dos resíduos depositados (MELO et al, 2014). McDougall (2011) citado por Simões e Catapreta (2013), discute os principais fatores que influenciam nos recalques em aterros, que incluem a composição dos resíduos; peso unitário inicial, índice de vazios e teor de umidade; dimensões do aterro; métodos de compactação; sequência de preenchimento; pré-tratamento dos resíduos (incineração, compostagem, e outros); níveis de lixiviados, flutuações e recirculação; temperatura; existência de sistemas de coleta e extração de gases; características da cobertura final; e o clima.

Conforme Melo et all (2014) nestes casos a matéria orgânica presente no interior da massa de resíduos é o maior contribuinte para ocorrência dos recalques, e quanto maior sua concentração, maior será o recalque. Em aterros de resíduos sólidos urbanos, os recalques são devidos à perda de massa sólida dos seus constituintes orgânicos ou então devido a rearranjos, distorções e outros fatores que façam com que os resíduos diminuam em volume e massa (MELO et all, 2014).

O recalque que ocorre em aterros sanitários é geralmente separado em três processos de compressão: (1) compressão imediata, (2) deformação mecânica (*mechanical creep*) e (3) biocompressão. A compressão imediata é dependente de esforços (*stress-dependent*) e ocorre rapidamente com um aumento em tensões verticais. Deformação/fluência mecânica e biocompressão são processos dependentes do tempo que ocorrem sob esforços verticais constantes. Deformação mecânica envolve cedência física e reorientação dos componentes dos RSU, enquanto biocompressão é atribuída à decomposição anaeróbia da fração orgânica dos RSU. Quando esta biodegradação da fração orgânica é esgotada, a compactação dos resíduos sólidos urbanos continuará como deformação mecânica do RSU residual (isto é, deformação mecânica final) (BAREITHER E KWAK, 2015).

Dois tipos de recalque que ocorrem em aterros são: recalque uniforme e recalque diferencial. No primeiro caso, que não traz preocupações significativas as instalações fotovoltaicas em aterros, a massa de resíduos no aterro decai de maneira uniforme resultando em recalques que ocorrem a taxas similares ou uniformes ao longo de grandes áreas (USEPA & NREL, 2013). Já o recalque diferencial ocorre devido à natureza heterogênea dos constituintes do aterro e taxas variadas de decomposição. O problema é complicado devido ao fato de que as células adjacentes são completadas em tempos diferentes e o preenchimento frequentemente ocorre no topo de depósitos de resíduos mais antigos. Este tipo de recalque é importante já que pode prejudicar a estabilidade da cobertura final e integridade de elementos geossintéticos (geomembranas, por exemplo) e camadas minerais (como barreiras de argila compactada) (DIXON e JONES, 2005). Em termos de engenharia geotécnica, o recalque diferencial é geralmente mais problemático à integridade de estruturas instaladas sobre a cobertura de aterros que recalque uniforme ou total (SAMPSON, 2009).

Grisolia e Napoleoni (1996) apud Schuler (2010) defendem que os depósitos de RSU recalcam cerca de 10 a 30% somente sob ação de seu peso próprio, e que cerca de 90% dos recalques totais esperados ocorrem nos dez primeiros anos após o fechamento do aterro. Por meio de resultados de ensaios realizados em células experimentais, 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 16.

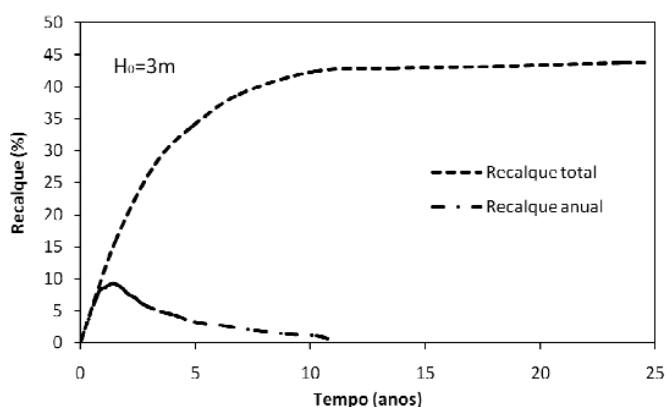


Figura 16. Recalques total e anual em RSU.
Fonte: Gandolla et al (1994) citados por Schuler (2010).

Instalações em aterros sanitários requerem considerações adicionais de projeto devido aos recalques diferenciais, que podem impactar a integridade estrutural e a geração de energia do sistema fotovoltaico. Exemplos de estratégias de posicionamento incluem a instalação do sistema fotovoltaico nas áreas mais antigas do aterro, onde os recalques já ocorreram em sua maior parte devido à degradação da matéria orgânica e teriam as menores taxas de recalque no

futuro, ou ainda a instalação em locais que contenham resíduos de construção, demolição e/ou resíduos industriais, que podem se tratar de locais preferíveis do ponto de vista da ocorrência de recalques. No entanto no Brasil, há normas para aterros de RSU (ABNT NBR 8419/92; ABNT, 1992) e (ABNT NBR 15849/10; ABNT, 2010) e de Resíduos de Construção Civil (ABNT 15113/04; ABNT, 2004). Recomenda-se o monitoramento de recalques e avaliação dos dados relacionados. Atividades de previsão para estimar o potencial de recalques uniformes e diferenciais também podem ser realizadas, já que podem fornecer informações sobre áreas do aterro a se evitar a instalação de conjuntos de painéis solares no contexto de uma avaliação de viabilidade (USEPA & NREL, 2013).

Deve-se levar em conta as características de peso quanto à tecnologia fotovoltaica e o sistema de suporte a serem escolhidos para instalações na cobertura de aterros devido às limitações em relação às capacidades de suporte de peso. Planejadores devem selecionar um sistema solar cujo peso cumulativo seja apropriado dada a profundidade da cobertura do aterro, caracterização dos resíduos, e medidas das declividades dos taludes (SAMPSON, 2009).

Há diversas medidas de engenharia que podem ser usadas para reduzir o potencial de recalques em aterros. Um exemplo é a compactação dinâmica, capaz de aumentar a densidade do material e diminuir recalques diferenciais em aterros de RSU. Remoção seletiva de resíduos também pode ser vista como uma opção. Esses procedimentos são alternativas a serem realizadas antes do fechamento do aterro e são estratégias viáveis para o simultâneo encerramento de aterro e desenvolvimento de projetos. Além de reforços estruturais, após o encerramento do aterro (ou células do aterro), o uso de sistemas de montagem flexíveis para o sistema fotovoltaico pode impedir a ocorrência de danos às instalações causados por recalques (SAMPSON, 2009). Além disso, o uso de geomembranas integradas com painéis fotovoltaicos são sempre uma opção a ser considerada.

2.4.2 Cobertura final

Conforme a ABNT NBR 13.896/1997 (ABNT, 1997), a cobertura final deve minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e também possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro.

Koerner e Daniel (1997) e Vilhena (2010) referem-se aos seguintes componentes básicos de um sistema de cobertura final em aterros de resíduos sólidos urbanos: 1- camada

superficial; 2- camada de proteção (solo disponível localmente); 3- camada de drenagem (areia, pedregulhos ou geossintéticos); 4- camada de barreira hidráulica/gás (geomembrana, revestimento de argila compactada, e/ou revestimento de argila geossintética); 5- camada de coleta de gás (solo ou geossintéticos); e 6- camada de fundação (solo).

Mas nem todas as camadas são necessárias para todas as coberturas finais. Por exemplo, a camada de drenagem pode não ser necessária em uma região árida, ou a presença camada de coleta de gás dependerá se o RSU ou material contaminado está produzindo gases que tornam necessária coleta e gestão do mesmo. Além disso, algumas das camadas citadas podem ser combinadas (KOERNER e DANIEL , 1997)

A camada superficial separa da superfície as camadas subjacentes da cobertura (KOERNER e DANIEL, 1997). Normalmente, essa camada é constituída por uma estrutura de raízes de plantas que protege o sistema da cobertura final da ação de ventos e chuvas, minimizando assim, os processos erosivos. Outros materiais como resíduos de construção são utilizados na camada superficial. Qualquer material que seja considerado seguro e estável para o sistema de cobertura pode ser considerado como um material alternativo (MAGALHÃES, 2005), desde que aprovado pelo órgão de controle ambiental. Outras funções desta camada incluem a promoção da evapotranspiração ou o atendimento a requisitos estéticos ou ecológicos (USEPA & NREL, 2013).

A camada de proteção está localizada logo abaixo da camada superficial, sendo que normalmente não há uma distinção entre elas. Deve ser bem separada das camadas de drenagem e de barreira de modo a impedir o excesso de umidade e secagem das demais camadas abaixo, e também o enraizamento de plantas. A função básica dessa camada é armazenar água que está na camada acima e proteger as camadas subjacentes. Nem todos os aterros utilizam desta camada, de maneira que a camada superficial pode estar diretamente ligada na camada de drenagem ou de barreira (MAGALHÃES, 2005).

A camada de drenagem tem as funções de reduzir a quantidade de água na camada de barreira, de drenar a camada de proteção; portanto, aumentando sua capacidade de armazenamento de água, e também de reduzir e controlar as poro-pressões de água da camada de cobertura de solo, contribuindo para o aumento da estabilidade dos taludes (KOERNER e DANIEL, 1997).

A camada de barreira hidráulica/gás é geralmente vista como a camada que possui os componentes mais críticos de um sistema de cobertura final. Esta camada minimiza a percolação de água pelo sistema de cobertura, bloqueando água diretamente, e também indiretamente através do armazenamento ou drenagem de água nas camadas sobrepostas onde

a água é eventualmente removida por escoamento, evapotranspiração e drenagem interna. Além disso, previne o escape de gases para a atmosfera (KOERNER e DANIEL, 1997).

A camada coletora de gás tem o objetivo de coletar gases devidos à decomposição de materiais depositados (KOERNER e DANIEL, 1997). Esta camada pode ser incluída para ajudar na condução do gás para os sistemas de coleta de gases (USEPA & NREL, 2013).

A camada de fundação, mais funda do sistema de cobertura final, é frequentemente a cobertura provisória já colocada, talvez com alguma compactação adicional antes da construção da cobertura final. Caso não haja cobertura provisória, se a mesma for muito fina, ou se recalque diferencial criou uma superfície irregular, então solo adicional é espalhado e compactado para formar a camada de fundação (KOERNER e DANIEL, 1997 *apud* MAGALHÃES, 2005). Conforme USEPA & NREL (2013), essa camada fornece controle de nivelamento para a cobertura final, capacidade de suporte adequado para as camadas superiores, uma superfície para instalação de geossintéticos, e em alguns casos, uma maneira a ajudar no controle dos efeitos de recalques diferenciais.

Apesar deste tipo de configuração, alguns projetos empregam apenas algumas dessas camadas (IPT, 2000 *apud* MAGALHÃES, 2005). Como observado por Magalhães (2005), aspectos como facilidade de manutenção e viabilidade econômica devem ser considerados. Pelos altos custos associados a este tipo de estrutura, muitas alternativas têm sido propostas, e critérios de seleção têm sido desenvolvidos (BOSCOV, 2006). No Brasil ainda são raros os aterros que utilizam de sistemas de recobrimento final tão sofisticados. Em geral, as coberturas utilizadas no país caracterizam-se por uma camada de solo argiloso pouco erodível, de espessura variando entre 0,6 a 1,5m, sobre a qual é realizada a implantação da vegetação, normalmente espécies gramíneas (MAGALHÃES, 2005).

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).

Durante o processo de planejamento de um sistema solar, 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).

Na preparação de um local do aterro para a construção do sistema solar fotovoltaico, podem ser necessárias atividades de limpeza e nivelamento da superfície de cobertura do

aterro, de modo a ganhar espaço aberto para os conjuntos fotovoltaicos e prevenir possíveis sombras. Estas atividades devem ser feitas de modo a não prejudicar a cobertura final ou acabar expondo os resíduos (SAMPSON, 2009).

2.4.3 Declividade e estabilidade

A análise da declividade e estabilidade de uma área de um aterro é crítica para se avaliar a viabilidade de projetos de energia fotovoltaica em aterros, sendo importante para a seleção dos componentes da tecnologia fotovoltaica e na decisão do projeto e disposição do conjunto fotovoltaico. 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).

Como já mencionado, as características dos RSU são importantes em vários aspectos nas instalações de deposição de resíduos em aterros. Pelo fato de maior parte de um aterro ser composta por RSU, a estabilidade geral dos taludes de um aterro é governada por parâmetros de força e propriedades físicas do RSU. Esses parâmetros são importantes também em interações envolvendo a massa de resíduos e as estruturas do aterro, como camada de cobertura, e sistemas de coleta de gás e lixiviados. Por outro lado, a composição dos resíduos, que afeta o comportamento geotécnico dos RSU, é dependente de fatores como o clima, tecnologia de disposição, a cultura e hábitos da comunidade local. É portanto essencial, que as avaliações de projeto e estabilidade de aterros em cada região sejam baseadas nas condições locais e características geotécnicas dos RSU (MACHADO et al, 2010).

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). Outras fatores a serem considerados incluem carga de vento e requisitos de estabilidade da fundação do sistema (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 (SAMPSON, 2009). Esta orientação (ou azimute) é importante, e desenvolvedores geralmente preferem essas áreas que estejam voltadas diretamente a sul ou norte, dependendo do hemisfério, ou que estejam dentro de um desvio de 20-30 graus, de modo a garantir exposição suficiente ao sol durante o ano (USEPA & NREL, 2013). 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).

Uma alternativa para estes locais de aterros com declividades mais acentuadas é o uso de geomembranas integradas a sistemas fotovoltaicos (*PV-integrated geomembrane*) (USEPA & NREL, 2013). Um exemplo se trata do Aterro *Tessman Road* no Texas-EUA, com declividade lateral de 18 graus (3:1), onde se utilizou de lâminas solares flexíveis aderidas diretamente à cobertura de geomembrana. Devido ao fato de essas lâminas serem leves e fixadas diretamente na cobertura, não houve risco de que o sistema deslizesse (SAMPSON, 2009).

2.4.4 Sistemas de controle de lixiviados, gás de aterro e águas pluviais

Nos sistemas de gás de aterro e lixiviados, alguns fatores a se levar em consideração em sistemas fotovoltaicos em aterros são o peso destas instalações e seu posicionamento. Deve-se avaliar a capacidade de suporte de peso das tubulações e dos sistemas de coleta. Apesar de já existir uma enorme quantidade de peso sobre estes sistemas, considerações devem ser dadas pelos impactos devidos ao peso adicional do sistema fotovoltaico e o peso de caminhões e outros equipamentos que serão utilizados na preparação do local e nas fases de construção da instalação fotovoltaica (USEPA & NREL, 2013).

Durante o estudo de viabilidade devem ser considerados os locais dos sistemas de tubulações de gás e lixiviados, instalações de armazenamento e geração, *flares*, e poços de monitoramento de gás, já que a localidade destas instalações pode impactar na disposição do sistema fotovoltaico. O gás de aterro é explosivo, e se o sistema fotovoltaico é instalado perto demais aos sistemas de operação do gás, o potencial de geração de faíscas do sistema fotovoltaico poderia representar um perigo de explosão. Por essas razões, é importante que estruturas fechadas e condutos usados para gestão do gás de aterro sejam projetados para prevenir concentração ou transporte não adequado de gás (USEPA & NREL, 2013).

De acordo com a USEPA & NREL (2013), considerações sobre a gestão de águas pluviais estão intimamente ligadas ao controle de erosão e sistemas de cobertura vegetal. As coberturas de aterros são tipicamente projetadas para absorver parte do escoamento de águas pluviais na camada vegetativa, fornecendo também possibilidade de que águas adicionais infiltrem a uma camada de solo adjacente onde podem ser levadas a lagoas de retenção e

outras áreas de descarga. É importante avaliar também as legislações e normas aplicáveis e como os componentes do sistema fotovoltaico irão interagir com o sistema de gestão de águas pluviais. Também existe a possibilidade de aproveitar essas águas para limpeza dos próprios painéis fotovoltaicos (USEPA & NREL, 2013).

As condições de operação do aterro devem ser observadas, sendo que no caso de aterros que ainda não tiveram suas atividades de recebimento de resíduos encerradas, o projeto de sistema de gestão de águas pluviais pode ser reavaliado de modo a garantir compatibilidade com o sistema fotovoltaico. A elaboração de um projeto em conjunto com o sistema fotovoltaico com fundação convencional pode economizar tempo e dinheiro a longo prazo, mesmo se este sistema solar não for construído após muitos anos, enquanto aguarda-se a ocorrência dos recalques iniciais do aterro (USEPA & NREL, 2013).

Outros fatores a serem avaliados e considerados durante um projeto incluem engajamento e suporte da comunidade, já que muitos grupos podem querer fazer parte de discussões sobre instalações solares em aterros de RSU; abertura e transparência quanto ao diálogo com a comunidade: a falha quanto a este aspecto pode resultar em atrasos e outros impactos ao progresso do projeto; potenciais impactos visuais e estratégias de mitigação; a necessidade de um acordo de interconexão de sistema conectado à rede, feito normalmente com a concessionária de distribuição local, especificando termos, condições e equipamentos; e análise da possibilidade de uso de sistema de compensação energética (*net metering*), que encoraja o desenvolvimento destes sistemas fotovoltaicos ou outros sistemas de energia renovável de modo a compensar os requerimentos de uso de energia de um local (USEPA & NREL, 2013).

2.4.5 Escolha das estruturas de suporte e tecnologia fotovoltaica

Após a fase em que foram obtidas e analisadas as características do aterro, o próximo passo consiste em selecionar a tecnologia apropriada às condições encontradas. Cada sistema fotovoltaico (considerando módulos, sistema de montagem e sistema de ancoragem) é avaliado quanto à compatibilidade com as condições locais (USEPA & NREL, 2013). Instalações de energia solar em aterros requerem sistemas montados no solo, que frequentemente envolvem estruturas de alumínio ou aço galvanizado que são fixos a fundações de concreto (SAMPSON, 2009).

Normalmente, sistemas de montagem com inclinação fixa são escolhidos para aplicações em aterros (USEPA & NREL, 2013). De acordo com USEPA & NREL (2013)

para aterros que ainda não completaram o processo de encerramento, pode ser desejável selecionar a tecnologia de sistema fotovoltaico integrado a geomembrana.

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. Cinco tipos de sistemas de ancoragem são normalmente usados para suportar sistemas fotovoltaicos nestas áreas em específico (USEPA & NREL, 2013):

- **Lajes de concreto (*concrete slabs*):** as lajes são construídas sobre a cobertura do aterro ao longo da área onde o sistema de montagem será colocado, como pode ser visto na Figura 17. 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);



Figura 17. Exemplo de sistema de ancoragem tipo laje de concreto.
Fonte: USEPA & NREL, 2013

- **Fundação helicoidal (*auger/helical pier supports*):** este tipo de sistema, ao contrário das fundações por estacas, usam geralmente motores hidráulicos de torque para *parafusamento* no solo. 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. Ressalta-se que a cobertura final deve conter no mínimo 60 cm de 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);

- **Bases rasas de concreto vertido e bases de concreto pré-fabricadas (*shallow poured concrete footers and pre-fabricated concrete footings*):** 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 em uma base de libras por polegada quadrada (*psi - pounds-per-square inch*), mas em comparação com outros sistemas de ancoragem podem fornecer maior estabilidade para os declives mais íngremes (USEPA & NREL, 2013);
- **Sistemas autobalastrados (*ballasted systems*):** este é o sistema de ancoragem mais utilizado para sistemas fotovoltaicos em aterros. É composto tipicamente de uma bandeja plana (*flat tray*) ou bloco de concreto que é colocado na cobertura do aterro, sem penetração, com a estrutura de suporte do conjunto fotovoltaico anexada à bandeja ou bloco de concreto (*concrete ballast foundation*). Em sistemas com bandejas (*tray-based systems*), o material de lastro – usualmente blocos de concreto pré-fabricados – é colocado sobre a bandeja. O peso do material de lastro mantém o sistema fotovoltaico no lugar e protege-o contra elevações provocadas pelo vento e deslizamentos. 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. Enquanto estes sistemas de ancoragem se tornam mais comuns para sistemas fotovoltaicos, um número crescente de fabricantes oferece produtos especiais para condições específicas de cada local. 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. A Figura 18 mostra exemplos deste tipo de sistema de ancoragem (USEPA & NREL, 2013).

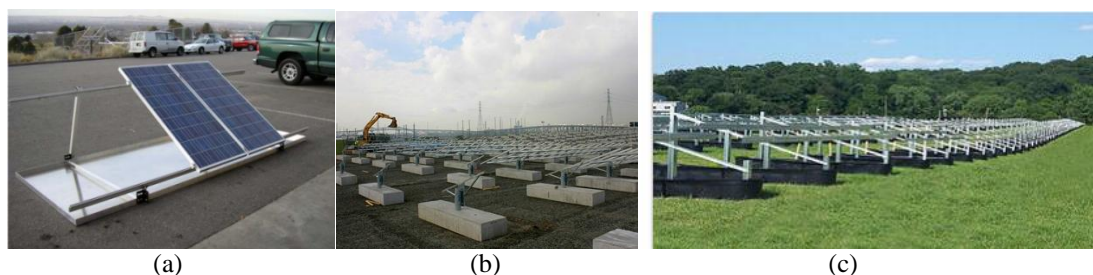


Figura 18. Exemplos de sistemas autobalastrados (*ballasted systems*) em estrutura com bandeja (a) e estrutura de concreto pré-moldada (b) ou concreto a ser vertido no local (c).

Fonte: (a) Messics, 2010; (b) USEPA & NREL, 2013; (c) GameChage Racking (2015).

Esses sistemas balastrados são mais frequentemente usados em instalações onde penetração no solo não é aconselhada ou permitida (SMALLEY, 2015), como é o caso de aterros de RSU.

- **Geomembranas integradas a sistema fotovoltaico:** solução emergente em tecnologia fotovoltaica para aplicações em aterros. É uma cobertura de aterro, tipicamente composta por uma poliolefina termoplástica (TPO), e pode ser usada no 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. Contudo, podem ter sua aplicação em aterros em que se considera a renovação ou recolocação da cobertura final existente. Geomembranas com sistema fotovoltaico integrado são ancoradas por meio de um sistema de ancoragem por valas. Âncoras horizontais/pesos adicionais podem ser colocados para segurar a geomembrana em locais em que as forças do vento ou clima os tornarem necessários. 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, reduz custos de erosão e manutenção do solo. Contudo, estão amplamente limitadas a aterros no processo de encerramento, e estão disponíveis por um número limitado de fabricantes com opções limitadas quanto a tecnologia do painel fotovoltaico. Mas outros fornecedores estão começando a entrar no mercado oferecendo uma seleção de ângulos de inclinação integrados ao material da geomembrana, além de outras tecnologias para os painéis (USEPA & NREL, 2013).

Conforme *Conestoga-Rovers & Associates* e *British Columbia Ministry of Environment* (2011), o benefício principal desta cobertura com geomembrana integrada a sistema solar consiste de sua habilidade em aumentar a coleta de gás de aterro devido à sua baixa permeabilidade enquanto produz energia renovável, e de sua capacidade de diminuir o escape deste gás. Existem também algumas desvantagens, como as citadas por Perera (2011): aumento do fluxo de pico de água, bolhas de gás visíveis, acesso veicular limitado, suscetibilidade a soerguimento pelo vento.

O uso destas geomembranas pode substituir um sistema de cobertura final tradicional, como mostrado a Figura 19 (*American Academy of Environmental Engineers & Scientists*, 2012). A cobertura final tradicional mostrada na Figura 19 é baseada nas regulamentações federais dos Estados Unidos, mais especificamente na "40 CFR Part 258" ou "Subtitle D Federal revised criteria" que estabelece critérios mínimos para aterros de RSU, conforme USEPA (2015c). Esta regulamentação estabelece que o sistema de cobertura final deve ter uma camada de infiltração que contenha no mínimo 18 polegadas (cerca de 45 cm) de material argiloso e uma camada capaz de sustentar o crescimento sustentável de plantas nativas de no mínimo 6 polegadas (cerca de 15cm).

Subjacentes a estas camadas geralmente há também uma camada de fundação sobre os resíduos, então uma camada de argila compactada ou geomembrana, e uma camada de drenagem (HOCK, 2013).

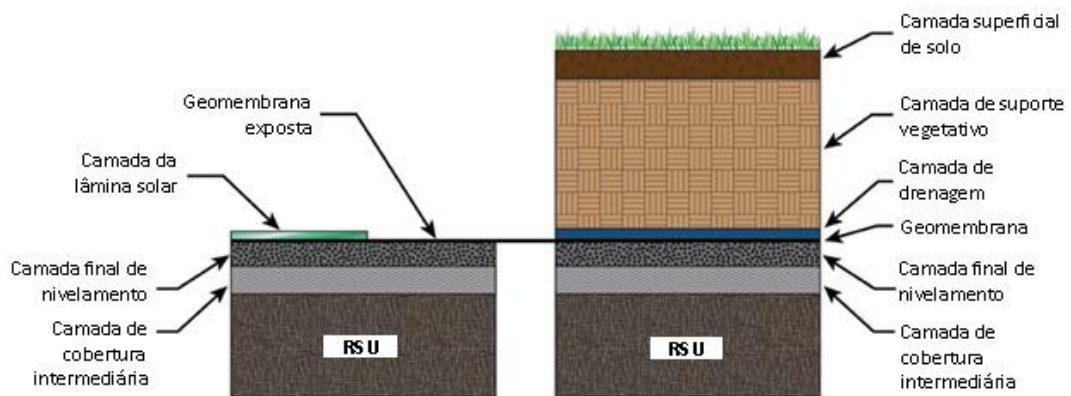


Figura 19. Cobertura solar vs. cobertura final tradicional.

Fonte: Traduzido de *American Academy of Environmental Engineers & Scientists*, 2012.

O peso geral de um sistema fotovoltaico convencional, sendo determinado pelo peso agregado do sistema de ancoragem, sistema de montagem, e módulos fotovoltaicos selecionados é um critério chave de projeto para projetos fotovoltaicos em aterros. Baseando-se no peso do sistema e no projeto do sistema de ancoragem, cargas pontuais de peso morto (*dead weight*), que são a força que o peso do sistema impõe à cobertura do aterro, podem ser calculadas. Essa carga do sistema fotovoltaico precisa ser comparada à capacidade de suporte de peso da cobertura do aterro, que é uma função da profundidade da cobertura e de sua composição, e da composição da massa de resíduos na célula do aterro. Tipicamente, a capacidade de suporte de peso de coberturas de aterros podem suportar cargas pontuais de peso morto de até 7 psi (*pounds per square inch*, ou libras por polegada quadrada), embora cargas pontuais de até 5 psi são preferíveis por alguns desenvolvedores de sistemas solares em aterros. Tecnologias fotovoltaicas alternativas, como as geomembranas, são leves e servem

como parte da cobertura final, e mesmo que suas características de peso ainda precisem ser analisadas como parte do processo de execução do projeto, elas não constituem um problema significativo (USEPA & NREL, 2013). No Anexo A, é possível verificar de maneira resumida quais as melhores práticas para instalações solares em aterros.

Algumas empresas já oferecem soluções específicas para aterros, embora não localizadas no Brasil atualmente. Algumas delas incluem a PV Navigator Ltd. ®, Solar FlexRack®, GameChange Solar®, Schletter®, Nuance Energy®.

2.4.6 Alguns casos de instalações solares em aterros

Nos EUA, tomado como o país de exemplo para análises deste trabalho em 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. Até o momento a Iniciativa *RE-Powering* identificou 151 instalações relacionadas a energia renovável em 144 destes locais, somando uma capacidade cumulativa instalada de 1.046 MW. Estes tipos de instalações foram identificadas em 35 estados e territórios, sendo que a maioria delas se concentra em Massachusetts. Dos projetos identificados, 82% são projetos fotovoltaicos, enquanto que 61% da capacidade instalada provêm de sistemas eólicos (USEPA, 2015a).

Instalações eólicas tendem a ser mais populares em grandes áreas de terras contaminadas, como áreas de mineração, e instalações solares são a tecnologia dominante em áreas menores, como aterros de RSU. Conforme tendências atuais, a maioria dos sistemas vende a energia produzida para a rede (um total de 100 sistemas). Das 151 instalações, 80 delas são projetos eólicos e solares em aterros. Em relação à propriedade das áreas, a maioria delas são municipais (61), e as privadas somam 50 (USEPA, 2015a). De acordo com a USEPA (2015a) uma tendência crescente consiste no reuso de aterros encerrados para grandes projetos solares fotovoltaicos.

Aterro Tessman Road

Em 2008, no aterro de RSU Tessman Road (San Antonio, Texas-EUA) iniciou-se com seu encerramento, a cobertura inovadora com geomembranas integradas a sistema solar fotovoltaico, conhecida como *Solar Energy Cover* em inglês, para cobrir uma área de 2,27 ha nos taludes voltados ao sul e com inclinação igual a 18°. A cobertura com geomembrana, que

foi completada em 2009, além de servir como uma cobertura do aterro, também serve como uma superfície para instalação de painéis fotovoltaicos flexíveis (TANSEL et al, 2010).

A cobertura de energia solar, ou *solar energy cover*, é capaz de reduzir a infiltração, proteger o solo dos ventos e erosão, proteger a cobertura de danos devidos a chuvas com pedras de granizo, exposição ao sol, e variações de temperatura. Baseado nesses benefícios, a Comissão de Qualidade do Meio Ambiente do Texas aprovou o uso dessa cobertura com geomembrana em substituição à cobertura convencional requerida, que incluiria a camada de drenagem com geomembrana, camada de suporte vegetativo e camada superior de solo. Os serviços de projeto de engenharia foram realizados pela empresa *HDR Engineering Inc.*(TANSEL et al, 2010). De acordo com Firestone (2010), o projeto utilizou de geomembranas de poliolefina termoplástica de 1,52 mm da Firestone, que foram instaladas após a terraplanagem e compactação de 60,96 cm de solo sobre os resíduos. Foram instalados ainda 24 respiradouros de gás passivos ao longo da cobertura de geomembrana.

Em relação aos cabos elétricos, estes foram instalados nas trincheiras de ancoragem para a geomembrana. Interessante destacar o fato de que o sistema de energia solar complementa uma planta que utiliza o gás de aterro para conversão em energia (TOWNSEND et al, 2015). A Figura 20 mostra uma visão geral da instalação.



Figura 20. Tessman Road Landfill
Fonte: Geosynthetics, 2009

Um total de 1050 lâminas fotovoltaicas flexíveis da (0,25 polegadas, ou 6,35 mm de espessura) foram anexadas diretamente à geomembrana. Utilizou-se o modelo Uni-Solar PVL-128 com características de potência entre 128W e 144 W. A construção do projeto foi iniciada em dezembro de 2008 e concluída em abril de 2009. A produção estimada de eletricidade do conjunto fotovoltaico de potência de 135 kW, é de 182.319 kWh. De acordo com a Republic Services (s.d.), o projeto foi o primeiro a utilizar painéis solares flexíveis em cobertura com geomembrana, ou cobertura solar, em aterro nos Estados Unidos.

Aterro Hickory Ridge

No aterro de RSU de Hickory Ridge (Atlanta, Georgia-EUA), em 2011, aproximadamente 7.000 painéis solares flexíveis tiveram sua instalação finalizada sobre geomembrana termoplástica exposta em uma área de cerca de 4 ha (TOWSEND et al, 2015). Utilizou-se no aterro o mesmo sistema alternativo de cobertura com geomembrana integrada a sistema fotovoltaico do aterro Tessman Road. Os serviços de projeto de engenharia também foram realizados pela empresa HDR. Os painéis solares foram instalados no platô do aterro e nos taludes laterais, que apresentam um ângulo de cerca de 18 graus em relação à horizontal. O aterro iniciou o aceite de resíduos em 1992 e seu encerramento definitivo foi permitido em 2009 (ROBERTS, s.d.).

O projeto e instalação do sistema fotovoltaico foi completado sob um orçamento de US\$ 10 milhões. Cuidados típicos de pós-encerramento do aterro são evitados, economizando mais de US\$ 1,5 milhão de dólares ao longo deste período (30 anos) (AMERICAN ACADEMY OF ENVIRONMENTAL ENGINEERS & SCIENTISTS, 2012). A Figura 21 mostra a visão geral do aterro antes e depois da instalação da cobertura solar.



Figura 21. Cobertura solar do aterro de Hickory Ridge em uma área 4 ha, de uma área total de 16,2 ha. Fonte: HDR, s.d.

Utilizou-se módulos do modelo Uni-Solar PVL-144 posicionados sobre geomembrana fabricada pela Carlisle Energy Services (PAULSON, 2011). Os painéis, com carga distribuída de apenas 3,6 kg/m², possuem garantia de 20 anos com 90% da capacidade nominal original e continuará a gerar eletricidade além do período de garantia. O projeto da cobertura solar do aterro recebeu um estímulo de US\$ 2 milhões por meio de um programa de estímulo federal. Além disso, uma cobertura solar (*solar energy cover*), como já citado anteriormente neste trabalho, não inclui gastos com atividades relacionadas com uma cobertura tradicional, como corte de grama, fertilizantes, controle de erosão e manutenção da cobertura (ROBERTS, s.d.). Conforme Green (2013), a energia produzida pelo sistema é vendida para a companhia de

energia de Atlanta-EUA.

Além do sistema solar, o biogás produzido no aterro de Hickory Ridge é utilizado em uma planta de cogeração (CHP) de 6,5 MW, e produz 100% da necessidade energética da empresa Coca-Cola®. O metano coletado é limpo e entregue à planta CHP através de um duto de 9,65 km (MASENERGY, 2015; SIMET, 2012).

Aterro Pennsauken

O aterro de RSU Pennsauken, localizado em Pennsauken, New Jersey, que instalou módulos fotovoltaicos com estrutura rígida e não utilizou geomembranas como cobertura final, ao contrário dos aterros apresentados anteriormente, utilizou como sistema de ancoragem para o sistema solar fotovoltaico, o sistema autobalastrado nas superfícies planas, e bases de concreto pré-fabricadas para os taludes laterais (TANSEL et al, 2010). Estes sistemas de ancoragem foram projetados como não-penetrativos (MESSICS, 2010). O ano de conclusão do projeto foi em 2008, de acordo com a USEPA (2015a).

O aterro ainda se encontra em operação, com a maior parte dos resíduos constituindo-se de resíduos volumosos, de construção e demolição (TANSEL et al, 2010). Conforme USEPA (2015a), o aterro é descrito como destino de RSU, resíduos comerciais e industriais não perigosos. O aterro consiste de três células distintas. Uma delas operou entre 1960 e 1982, e contém cerca de 2,3 milhões de toneladas métricas de resíduos sólidos cobrindo 15,8 ha, com instalação de painéis fotovoltaicos (2006-2008) cobrindo cerca de 4,1 ha do total de 15,8 ha. A outra área (que também recebeu instalações fotovoltaicas) foi operada entre 1981 e 1990, e a última área está ativa desde 1990, com data de encerramento esperada para 2019 (TANSEL et al, 2010).

Na área mais antiga, painéis foram instalados nos taludes laterais e na área de platô, enquanto que na segunda área, as instalações solares foram feitas apenas no platô. A capacidade do sistema, que utilizou tecnologia solar cristalina, é de 2,1 MW (TANSEL et al, 2010). Nas Figuras 22 e 23 pode-se observar imagens das instalações do aterro. Além do sistema fotovoltaico, uma planta utilizando gás de aterro para conversão em energia iniciou suas operações em 2004 (MESSICS, 2009 citado por TOWNSEND et al, 2015). A energia produzida tanto pelo sistema solar quanto pelo sistema de aproveitamento energético do gás de aterro fornece eletricidade para a uma empresa vizinha ao aterro (MESSICS, 2010).



Figura 22. Instalações solares nas superfícies planas.

Fonte: Messics, 2010



Figura 23. Instalações solares nos taludes. Percebe-se a utilização de estruturas de aço para colocação dos módulos fotovoltaicos.

Fonte: Messics, 2010

Conforme Townsend (2015), recomendações e lições aprendidas durante o projeto no aterro incluíram: a instalação em taludes mais antigos minimizou necessidades de nivelamento e terraplanagem; instalação em taludes voltados a sul maximizaram a produção de energia; e em relação aos custos, estes variaram de US\$ 7 - US\$8 por watt para instalação em platô, e de US\$8- US\$9 por watt para instalação nos taludes laterais.

Nellis Air Force Base

O local contém uma instalação solar ocupando uma área total de 56,7 ha, incluindo 13,4 ha de um aterro fechado. Este operou entre 1958 e 1966, contendo resíduos de demolições, borra de tinta, madeiras de construção e outros resíduos sólidos. O aterro recebeu em 1996 uma cobertura com solos nativos e poços para monitoramento de águas subterrâneas. O sistema solar instalado, de 14MW de potência, consiste de 72.416 painéis solares com sistema de rastreamento em um eixo, como pode ser visualizado na Figura 24, e fornece um quarto das necessidades energéticas da base (USEPA, 2009a).



**Figura 24. Sistema solar com rastreamento em um eixo utilizando na Nellis Air Force Base, Nevada-EUA.
Fonte: USEPA & NREL, 2013**

A construção de parte do sistema solar sobre o aterro permitiu o benefício do uso de uma área que poderia continuar sem uso por décadas (USEPA, 2009a). Conforme *The White House* (2009) o sistema solar teve sua instalação completa em dezembro de 2007. O sistema usou módulos de silício cristalino (USEPA & NREL, 2013).

Fort Carson Army Base

O aterro encerrado, que contém em sua maior parte resíduos de construção, ocupa uma área de 6,1 ha e esteve operacional de 1965 a 1973. Por ser de uso restrito, o aterro foi um candidato ideal para uma instalação solar. Em 2007, o local foi preparado para o sistema recebendo uma cobertura de 60 cm de solo, ajustes para facilitar a drenagem e uma mistura de sementes nativas. O sistema solar de 2MW, mostrado na Figura 25, cobre o total de 4,9 ha, e foi concluído em 2008 (USEPA, 2009b). Conforme Sampson (2009), mais de 27.876 painéis com a tecnologia de filme fino de 72,5W, com estrutura rígida, foram utilizados.



**Figura 25. Sistema fotovoltaico de inclinação fixa no aterro em Fort Cason, Colorado.
Fonte: USEPA & NREL, 2013.**

Stafford Hill Solar Farm – Aterro Rutland

Um projeto inovador que envolve sistema solar sobre aterro iniciou sua operação em Rutland, Vermont-EUA. O sistema de 2 MW, conectado à rede, localiza-se no aterro encerrado de Rutland. O projeto é único por incluir inversores e baterias para armazenamento. Há dois tipos de baterias sendo utilizadas, de chumbo-ácido (3,2 MWh) e de íon-lítio (1MWh). No caso de uma emergência, a energia armazenada seria direcionada para uma escola local, que serve como um abrigo para a comunidade. De acordo com o Departamento de Energia dos EUA, o projeto é o primeiro *microgrid* estabelecido utilizando apenas da energia solar e armazenamento por baterias, sem acesso a outros combustíveis. O desenvolvedor do empreendimento designou Rutland como uma “cidade teste do futuro”, e o projeto Stafford Hill é parte de um esforço maior de testar maneiras inovadoras de integrar instalações solares à rede. O projeto recebeu um suporte total de 285.000 dólares do Departamento de Serviços Públicos de Vermont e do Escritório de Distribuição de Energia e Segurança Energética do Departamento de Energia americano (*U.S. DOE Office of Electricity Delivery and Energy Reliability*) (USEPA, 2015a).

Estudo realizado em aterro localizado em Monterey Park na California-EUA

De acordo com PV Navigator (2013), não tem sido realizadas avaliações compreensivas de um sistema de suporte solar instalado em um aterro encerrado para analisar o efeito geotécnico em relação à integridade da cobertura do aterro, o efeito no crescimento da vegetação, e a análise da energia gerada por tal sistema nessas áreas. Então, o referido autor realizou essas análises com um sistema piloto em Monterey Park, California no seguinte local: *Operating Industries Incorporated Landfill*. Um sistema solar e equipamentos para monitoramento foram instalados na plataforma superior ou platô do aterro por um ano.

O aterro operou entre 1948 e 1984, e recebeu aproximadamente 30 milhões de toneladas de RSU e mais de 300 milhões de galões (cerca de 1,14 milhões de metros cúbicos) de resíduos líquidos. O sistema de cobertura do platô consiste de uma camada de fundação de 60 cm, revestimento geossintético de argila e 60 cm de uma camada de solo recoberta com vegetação (BENSON e LAFOUNTAIN, 2003).

A Figura 26 mostra como o sistema solar foi instalado. Foram usadas três unidades, sendo que uma das unidades (Unidade 3) foi a que conteve os painéis solares e toda a instrumentação elétrica necessária para gerar e monitorar a eletricidade. Tipicamente, o peso

de uma unidade como esta é de aproximadamente 910 kg. Nas outras unidades, pesos foram adicionados para replicar este peso (PV NAVIGATOR, 2013).



Figura 26. Unidades instaladas no estudo.
Fonte: Traduzido de PV Navigator, 2013.

Dados geotécnicos coletados durante o projeto demonstraram que o sistema solar com suportes não contribuiu para recalque adicional nem comprometeu a integridade da cobertura do aterro. A energia anual média gerada pelo sistema conferiu com os valores de produção do fabricante, e o crescimento da vegetação sob o sistema solar foi apenas levemente impactada. Não houve penetração na cobertura causada pela base de apoio do sistema solar. Era esperado que os efeitos geotécnicos causados pela colocação das unidades solares com suporte não afetariam a cobertura do aterro já que estes são normalmente projetados para suportar cargas muito mais pesadas. Além disso, esperava-se também que o recalque não seria significativo já que o local já passou por processo significativo de biodegradação uma vez que os resíduos foram dispostos há mais de 20 anos (PV NAVIGATOR, 2013).

3 METODOLOGIA

3.1 O estudo de caso

No município de Itajubá, sul de Minas Gerais, está localizado o aterro sanitário do CIMASAS (Consórcio Intermunicipal dos Municípios da Microrregião do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário), alvo de estudos deste trabalho. O aterro possui uma área total de 56,93 hectares, sendo que desta área total foi delimitada uma área de 29,95 hectares a ser efetivamente utilizada para implantação do projeto. O terreno restante, com uma área de 26,98 hectares, foi definido como área de reserva técnica ou de expansão futura do aterro sanitário. Outra finalidade desta área de reserva técnica é a estocagem de material terroso excedente dos serviços de terraplanagem e a de empréstimo de material terroso, se necessário, para implantação de etapas posteriores ou para operação do empreendimento (GONÇALVES, 2007).

Atualmente, são 11 os municípios integrantes do Consórcio, sendo eles Itajubá, Brazópolis, Cachoeira de Minas, Delfim Moreira, Piranguçu, Piranguinho, Maria da Fé, Marmelópolis, Santa Rita do Sapucaí, São José do Alegre, e Wenceslau Brás. É possível observar na Figura 27 algumas imagens do local, atentando-se para a presença de drenos de gás e sistema de tratamento de lixiviados.

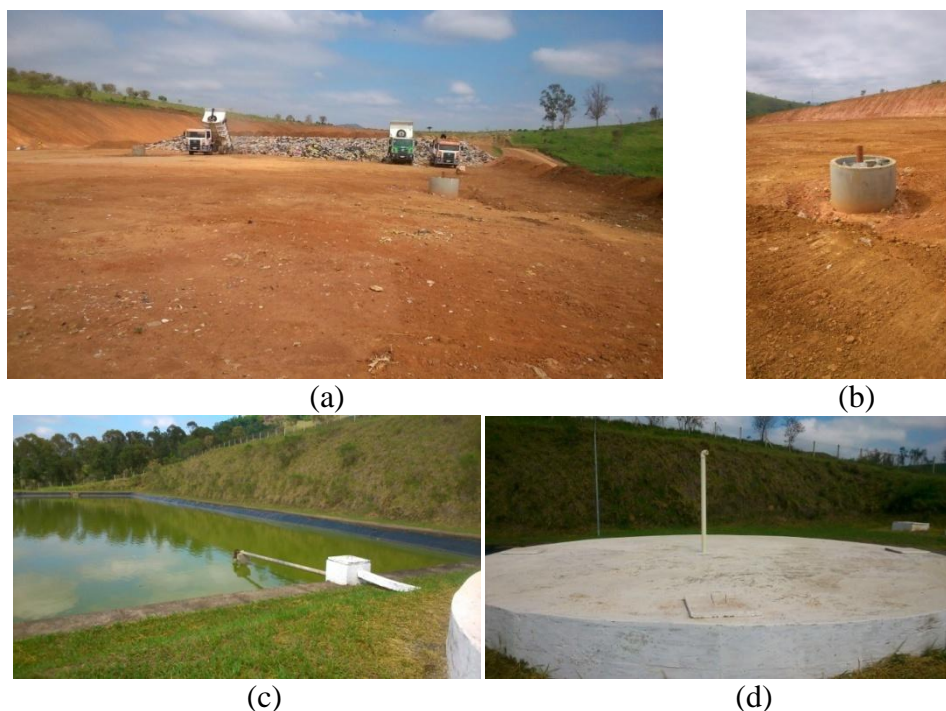


Figura 27. Aterro sanitário do CIMASAS em Itajubá-MG. (a) RSU sendo depositados; (b) dreno de gás de aterro; (c) e (d) sistema de tratamento de lixiviados.

Fonte: Autor.

Uma análise foi realizada para verificar a possibilidade de aproveitamento da área do presente aterro por meio da instalação de projetos para geração de eletricidade usando o gás de aterro e também energia solar. Na Figura 28 é mostrado que objetiva-se que haja aproveitamento energético durante o período que o aterro recebe resíduos, após o encerramento das atividades do aterro sanitário, além de durante o período de recalque considerado.

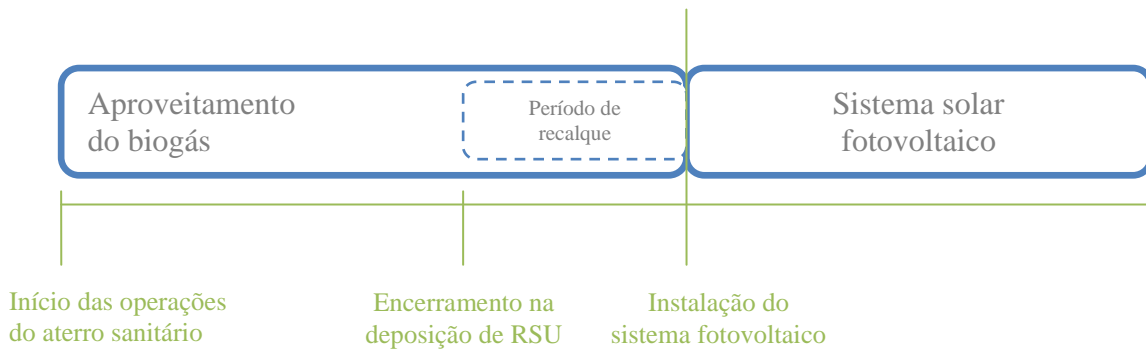


Figura 28. Exemplo de período de planejamento para aproveitamento da área do aterro em estudo.

No caso deste estudo, a operação do aterro sanitário se daria por 20 anos, com período de recalque de 10 anos. O sistema fotovoltaico seria instalado após esse período na plataforma superior do aterro, e operaria por 25 anos, a ser instalado utilizando preferencialmente de sistema autobalstrado como fundação. Tratam-se de projetos a longo prazo que podem trazer benefícios ao operador do aterro sanitário inclusive após o período de recebimento de resíduos.

3.2 Projeção da população

Para estimativa das populações das cidades integrantes do CIMASAS, foram utilizados dados do IBGE: Censo Demográfico de 1991, Censo Demográfico de 2000 e Censo Demográfico de 2010. Utilizou-se de método apresentado por Qasim (1985 apud VON SPERLING, 2014) para a projeção das populações das cidades integrantes do CIMASAS.

Para execução dos cálculos de projeção populacional, uma série de modelos podem ser aplicados. Na Tabela 2 são mostrados alguns modelos, apresentados por Qasim (1985 apud Von Sperling, 2014).

Tabela 2. Projeção Populacional. Métodos com base em fórmulas matemáticas.

Método	Taxa de Crescimento	Fórmula da Projeção	Coefficientes (se não for efetuada análise de regressão)
Projeção Aritmética	$\frac{dP}{dt} = K_a$	$P_t = P_0 + K_a \cdot (t - t_0)$	$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0}$
Projeção Geométrica	$\frac{dP}{dt} = K_g \cdot P$	$P_t = P_0 \cdot e^{K_g \cdot (t - t_0)}$ ou $P_t = P_0 \cdot (1 + i)^{(t - t_0)}$	$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_0}{t_2 - t_0}$ ou $i = e^{K_g} - 1$
Taxa Decrescente de Crescimento	$\frac{dP}{dt} = K_d \cdot (P_s - P)$	$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot [1 - e^{-K_d \cdot (t - t_0)}]$	$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2}$ $K_d = \frac{-\ln[(P_s - P_2)/(P_s - P_0)]}{t_2 - t_0}$
Crescimento Logístico	$\frac{dP}{dt} = K_1 \cdot P \cdot \left(\frac{P_s - P}{P_s}\right)$	$P_t = \frac{P_s}{1 + c \cdot e^{-K_1 \cdot (t - t_0)}}$	$P_s = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2}$ $c = (P_s - P_0)/P_0$ $K_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[\frac{P_0 \cdot (P_s - P_1)}{P_1 \cdot (P_s - P_0)} \right]$

Fonte: Qasim (1985 apud Von Sperling, 2014).

Sendo que:

$\frac{dP}{dt}$ = taxa de crescimento da população em função do tempo;

P_0, P_1 e P_2 = populações nos anos t_0, t_1 e t_2 (hab);

P_t = população estimada no ano t (hab); P_s = população de saturação (hab);

K_a, K_g, K_d, K_1, i, c = coeficientes (a obtenção dos coeficientes para análise da regressão é preferível, já que se pode utilizar toda a série de dados existentes, e não apenas P_0, P_1 e P_2).

Neste trabalho, o método da taxa decrescente de crescimento foi adotada. Este parte da premissa de que, na medida em que a cidade cresce, a taxa de crescimento torna-se menor. A população tende assintoticamente a um valor de saturação (Qasim, 1985 apud Von Sperling, 2014).

3.3 Geração de resíduos sólidos e de biogás

A geração de resíduos sólidos foi calculada a partir de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2013) e da população em 2013. A divisão entre esses

valores resulta no índice de geração per capita. Considerou-se que sobre este índice incidirá uma taxa de crescimento de 1% ao ano, conforme sugerido por Barros (2012), e os dados entre 2015 e 2035.

Com os dados da projeção de resíduos sólidos em mãos, pode-se então calcular a geração de biogás no aterro, utilizando neste caso o programa LandGEM® da USEPA (2005). Os parâmetros de entrada k e L_0 considerados foram os valores padrão utilizados pelo programa, a saber: $k = 0,05 \text{ ano}^{-1}$ e $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{ton}$, e a porcentagem de metano presente no gás de aterro foi considerada como sendo de 50%.

3.4 Geração de energia pelo gás de aterro

Para estimar o potencial de geração de energia elétrica com o uso do gás de aterro, alguns fatores devem ser levados em consideração, como a vazão de gás, eficiência de coleta de gás no aterro, eficiência da tecnologia de conversão utilizada, poder calorífico do gás. Estes fatores são utilizados para encontrar as potências e energias passíveis de serem geradas (SANTOS, 2015), conforme as equações 2 e 3, modificadas de CETESB (2006):

$$P_{dis} = Q_{gás} \cdot PC \cdot \eta \cdot E_c \cdot 1000 / 365 \cdot 24 \cdot 3600, \quad (2)$$

$$E = P_{dis} \cdot 8760. \quad (3)$$

Em que: P_{dis} = potência disponível anualmente (kW), $Q_{gás}$ = vazão anual de gás (m^3/ano), PC = poder calorífico do biogás (MJ/m^3), η = rendimento da tecnologia de conversão energética (%), E_c = eficiência da coleta de gás no aterro (%), e E = energia disponível anualmente (kWh).

A Equação 2 foi utilizada considerando os seguintes parâmetros: poder calorífico do biogás de $16,8 \text{ MJ}/\text{m}^3$; utilização de motor ciclo Otto com eficiência de 33%; eficiência de coleta de gás no aterro de 65%. Este último valor foi baseado conforme artigo de Silva, Freitas e Candiani (2013), que realizaram análise de fuga de biogás no Aterro Bandeirantes (16%) e Aterro Caieiras (35%). Selecionou-se o valor com maiores emissões fugitivas para os cálculos deste trabalho, portanto eficiência de coleta de 65%.

Mas deve ser realizada a escolha de um valor de potência para grupo(s) gerador(es) que ao mesmo tempo resulte na maior produção de energia e que seja economicamente viável. Neste ponto, aplicou-se o método escalonado para aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários proposto por Santos (2015), com a diferença de que no presente trabalho, não foi considerada troca durante o período de funcionamento. Este método se baseia, conforme o autor citado, na aplicação de grupos geradores operando a plena carga.

No método escalonado, a escolha da potência do primeiro grupo gerador corresponde à potência que, quando combinada com o tempo de disponibilidade de vazão de gás para suprimento a este gerador (Δt), resulta na máxima produção energética (P_{ME} - Figura 29; Equação 2). O tempo de disponibilidade Δt pode ser obtido pela interseção entre cada valor de potência com a curva de potência disponível do aterro (cuja equação de melhor ajuste pode ser obtida com ajuda do software Microsoft® Excel®). A partir deste primeiro grupo gerador, geradores adicionais podem ser escolhidos como sendo aqueles que promovam um maior incremento energético ao aterro, como exemplificado na Figura 30 (SANTOS, 2015).

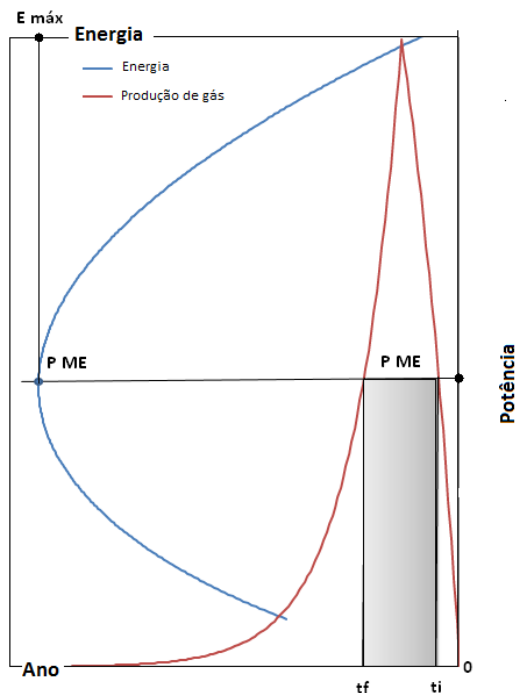


Figura 29. Potência de máxima produção energética (P_{ME}).
Fonte: Santos, 2015.

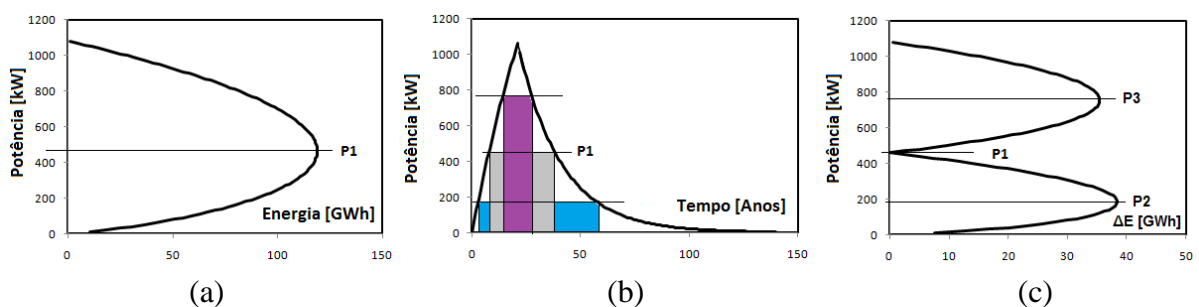


Figura 30. Escalonamento dos grupos geradores. (a) Definição da potência de maior produção energética P_1 ; (c) Potências intermediárias (P_2 e P_3); (b) Implantação destas potências na curva de produção de gás de aterro. Fonte: Santos, 2015.

O cálculo do incremento energético (ΔE_1) que seria proporcionado pela implantação de mais um módulo gerador de potência P calculado pelas equações 4 e 5, são deduzidas a partir da Figura 30 (b). A potência P que implicar no máximo ΔE_1 será a escolhida para implantação do segundo grupo gerador (P_2 - Eq. 6). A mesma lógica pode ser então aplicada

na determinação da potência e acréscimo de energia devido à implementação dos demais módulos de geração (SANTOS, 2015).

$$\text{Se } P < P_i, \Delta E = P \cdot (t_{i1} - t_i + t_f - t_{f1}) = P \cdot (\Delta t - \Delta t_1) \quad (4)$$

$$\text{Se } P > P_i, \Delta E = (P - P_i) \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$P_2 = P \rightarrow \text{Máx } \Delta E_1 \quad (6)$$

Conforme Santos (2015), com o aumento de grupos geradores, aumenta a produção energética, mas também o investimento nesses grupos, assim como os custos de operação e manutenção (O&M), o que indica a existência de um ponto ótimo, onde a receita do acréscimo de energia devido a novos grupos geradores passa a não superar os custos incrementais.

3.5 Geração de eletricidade por sistema solar fotovoltaico

O potencial de produção de energia pelo sistema solar fotovoltaico instalado em aterro sanitário foi avaliado separadamente do sistema de aproveitamento energético do gás de aterro. Foi considerado que sua instalação deve ocorrer dez anos após o encerramento da disposição de resíduos em área do aterro do CIMASAS, quando os recalques tendem a uma estabilidade, como discutido anteriormente. Os seguintes passos foram seguidos para dimensionamento do sistema fotovoltaico:

- ✓ avaliação das características do local da instalação do sistema e do projeto;
- ✓ seleção do módulo fotovoltaico;
- ✓ determinação da potência e seleção do inversor;
- ✓ avaliação da energia possível de ser gerada pelo sistema proposto.

O programa PVSyst®, de origem suíça, foi utilizado no auxílio ao dimensionamento do sistema. Trata-se de um programa comercial, mas que permite seu uso em um período de testes durante 30 dias, utilizado para realização das análises neste trabalho. Nele, é possível realizar as fases de dimensionamento em um único ambiente. Como observado por Landeira (2013), as ferramentas utilizadas pelo programa são de domínio público e bem descritas na literatura relacionada ao tema, como Haberlin (2012) e Mayfield (2010), que apresentam os passos para o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede, além dos já mencionados Pinho e Galdino (2014) e GreenPro (2004).

Este software é usado para o estudo, dimensionamento e análise de dados de sistemas fotovoltaicos completos, simula projetos conectados à rede, isolados, de bombeamento de água, e sistemas fotovoltaicos em corrente contínua ligados à rede. Inclui extensiva base de

dados meteorológicos e de componentes de sistemas fotovoltaicos (PVSyst, 2012).

Como supracitado, a área considerada para instalação do sistema fotovoltaico foi a área da plataforma superior do aterro. Conforme planejamento feito nos estudos para o aterro (MONTEIRO e COSTA, 2006), a área da plataforma superior deve ser de 7540,55 m². Nesta área, está prevista a presença de 13 dispositivos entre drenos de gases e poços de monitoramento. Ao redor desses pontos, é considerada uma distância de 3 metros, formando uma circunferência a ser mantida livre. Considera-se também uma distância de segurança de 3 metros a ser mantida do talude do topo do aterro, para possibilitar, por exemplo, atividades de manutenção e limpeza. Descontando-se essas áreas de segurança, chega-se à área final de 6050 m².

Foi verificado o fator de utilização da área do terreno onde a usina deve ser instalada. Este fator é dado pela razão entre a área do módulo e a área na superfície plana necessária para sua instalação. As usinas de energia solar são tipicamente construídas com um fator de utilização de área entre 35% e 45% (VILLALVA E GRAZOLI, 2012). Buscou-se maximizar o fator de aproveitamento da área disponível.

Para escolha da potência do inversor ou inversores, considerou-se para verificação o Fator de Dimensionamento de Inversores (FDI), que representa a relação entre a potência nominal em corrente alternada do inversor (P_{Nca}) e a potência de pico do gerador fotovoltaico (P_{FV}), dado pela Equação 7 (PINHO E GALDINO, 2014):

$$FDI = \frac{P_{Nca} (W)}{P_{FV} (Wp)} \quad (7)$$

De acordo com Pinho e Galdino (2014), valores inferiores de FDI recomendados por fabricantes e instaladores situam-se na faixa de 0,75 a 0,85, enquanto que o limite superior é de 1,05; contudo, de uma forma conservadora a potência do inversor pode ser igual à potência nominal P_{FV} do gerador fotovoltaico.

Foi considerado o uso de um inversor da fabricante Ingeteam® com o modelo Ingecon Sun 400 TL M320 DCAC Outdoor. E adotou-se o módulo tipo policristalino da Canadian Solar®, modelo CS6K 260P. Suas características do módulo fotovoltaico são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características do módulo fotovoltaico.

Característica	Valor	Característica	Valor
Potência máxima	260W	Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,12 A
Eficiência	16,18%	Comprimento	1,650 m
Tensão de máxima potência (V_{MPP})	30,40 V	Largura	0,992 m
Corrente de máxima potência (I_{MPP})	8,56 A	Área do módulo	1,637 m ²
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	37,50 V	Peso	18,2 kg

Os módulos fotovoltaicos normalmente possuem garantias de operar por um período de 25 anos com no mínimo 80% de sua potência nominal ao final deste período, e algumas vezes por 30 anos a 70% (IEA, 2014). Thevenard e Pelland (2013) em seus estudos afirmam ser razoável assumir que a degradação de um módulo estará tipicamente entre 0,3% e 0,8% ao ano. Jordan e Kurtz (2012) ao reunir da literatura aproximadamente 2000 taxas de degradação, medidos em módulos individuais ou sistemas inteiros, verificaram um valor médio de 0,5% ao ano, valor este adotado neste trabalho. Quanto aos inversores, estes devem ser trocados em períodos menores, normalmente a cada dez anos, período adotado neste trabalho.

A Taxa de Desempenho (ou *Performance Ratio*) do sistema, definida como a relação entre o desempenho real do sistema sobre o desempenho máximo teórico possível, também foi verificada. Essa relação é um parâmetro para avaliar a geração de energia elétrica de determinado sistema fotovoltaico, por levar em consideração a potência real do sistema sob condições de operação e todas as perdas envolvidas (Pinho e Galdino, 2014). Conforme Marion et al (2005), devido a perdas pela temperatura do módulo fotovoltaico, os valores deste parâmetro são maiores no inverno que no verão e normalmente ficam entre 60% e 80%. Segundo IEA (2014), sistemas bem dimensionados alcançam uma taxa de desempenho médio de 80% a 90% ao longo do ano.

Em relação aos custos dos módulos e do inversor, que constituem a maior parte do total de investimentos em um sistema solar fotovoltaico, estes foram baseados na sequência de cálculo proposta no estudo realizado pela ABINEE (2012), considerando o uso de equipamentos importados. Como observado por Landeira (2013), existem revistas especializadas no setor solar fotovoltaico, como a *PV Magazine* e a *Photon* que publicam regularmente os preços dos equipamentos como módulos e inversores de vários parques fabris no mundo. O preço internacional adotado para o inversor e para os módulos foram adotados conforme PHOTON (2015). A Tabela 4 mostra quais seriam os custos para esses equipamentos considerando a incidência de impostos e encargos.

Tabela 4. Custos dos módulos e inversores

Variáveis	Módulos (410 kW)	Inversores (408 kW)
Custo (€/W)	0,59	0,11
Custo (€)	241.900,00	44880,00
Frete + Seguro internacional (€): 5% do Custo	12.095,00	2.244,00
CIF (€) = Custo + frete + seguro	253.995,00	47.124,50
(A) Imposto de Importação (12% do CIF para módulos e 14% para inversores)	30.479,40	6.597,36
(B) IPI (0% para módulos e 15% para inversores); incide sobre CIF + (A)	0,00	8.058,20
(C) PIS (1,65% "por dentro ¹ "); incide sobre CIF + (A) + (B)	4.772,58	1.090,23
(D) COFINS (7,6% "por dentro ¹ ") incide sobre CIF + (A) + (B)	23.398,33	5.081,44
(E) ICMS 18%; incidente sobre CIF + (B)	55.755,00	12.113,17
(F) Total impostos (€); (A+B+C+D+E)	114.405,30	32.940,39
(G) Taxas diversas (Siscomex, AFRMM, Armaz.) = 12% (F)	13.728,64	3.952,85
(H) Despachante (importadora)*	1.644,00	1.644,00
(I) Custos de internalização (F+G+H)	129.777,94	38.537,24
CUSTOS FINAIS	Módulos	Inversores
Custo (€); (CIF + I)	383.772,94	85.661,24
Taxa de câmbio (R\$/€)	3,73**	
Custo (R\$)	1.431.473,06	319.516,43
Custo (R\$/W)	3,49	0,78

Fonte: Adaptado de ABINEE (2012).

¹ "Imposto por dentro" é aquele cujo valor imputado ao contribuinte compõe a própria base de cálculo (ALMEIDA, 2003).

* custo atualizado com base no IGP-M, por meio da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil.

** cotação do dia 23 de junho de 2017.

A alíquota do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) sobre módulos fotovoltaicos foi considerada como sendo de 0%, de acordo com a Tabela de Incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados (NCM 8541.40.32) aprovada pelo Decreto nº 7.660, de 23 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011).

Há de se levar em conta que além dos módulos e inversores, um sistema solar fotovoltaico consiste também dos chamados componentes de balanço do sistema (em inglês *balance of system components*), que incluem as estruturas de suporte, cabos elétricos,

equipamentos para controle, proteção e segurança e sistema de monitoramento (USEPA & NREL, 2013), além dos custos relativos a projetos de engenharia, licenciamentos e instalação do projeto (ABINEE, 2012).

Estes custos dependem das condições específicas de cada instalação, mas o valor adotado como a soma do custo dos módulos e inversores, foram aqueles executados por ABINEE (2012), o que resulta em R\$ 2,61/W. Este valor está próximo aos valores apresentados em IRENA (2015), em que os custos de balanço do sistema (*BoS*) estão estimados em uma média de US\$ 0,80/W na China e US\$ 0,84/W na Alemanha, ou considerando câmbio de R\$ 3,33 por dólar (cotação do dia 23/06/2017), R\$ 2,66/W e R\$ 2,80, respectivamente. Na Tabela 5 é mostrado quanto cada componente do sistema fotovoltaico contribui para o preço total do projeto proposto.

Tabela 5. Custos do sistema fotovoltaico.

Itens	Custos (R\$/W)	Porcentagem
Módulo	R\$ 3,49	51%
Inversor	R\$ 0,78	11%
BoS	R\$ 2,61	38%
Total	R\$ 6,89	100,0%

A exemplo de comparação, tomando como exemplo a Alemanha, estudo realizado por Fraunhofer ISE (2015) (tendo como foco projetos a partir de 1MW) mostra que os módulos representam 55% dos custos do sistema, os inversores contribuem com 11% do preço final e os custos de balanço do sistema com 34%. Segundo IRENA (2015), a estimativa média global dos custos totais de um sistema (*utility-scale*) instalado ficou em torno de US\$ 2,00/W (R\$ 6,66/W para um câmbio de R\$ 3,33 por dólar) em 2014. Para a América do Sul e América Central, os valores ficaram entre US\$ 1,35/W e US\$ 5,00/W (R\$ 4,50 e R\$ 16,65 para um câmbio de R\$ 3,33 por dólar).

Para os custos de operação e manutenção (O&M) do sistema considerou-se que estes seriam iguais a 1% do custo total do investimento. Este foi o valor médio entre os empreendimentos que comercializaram energia solar no 2º Leilão de Energia Reserva que ocorreu em 2015, e é similar aos verificados em leilões já ocorridos para a fonte fotovoltaica (MME/EPE, 2016).

3.6 Análise de viabilidade econômica

De modo a verificar a viabilidade econômica dos empreendimentos propostos, foi analisado o fluxo de caixa por meio do Valor Presente Líquido (VPL). Quando o VPL, dado

pela Equação 8, resulta em um valor positivo, o empreendimento é viável economicamente.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} - I. \quad (8)$$

Onde FC se refere ao fluxo de caixa, i à taxa de desconto, n à vida útil do projeto.

Foi realizada também uma análise considerando a negociação de créditos de carbono para o empreendimento usando gás de aterro, baseando-se nas Equações 9 e 10 modificadas por Santos (2015) de CETESB (2006):

$$CC_{queima} = Q_{CH_4} \cdot f_1 \cdot \eta_{queima} \cdot Vc \cdot \rho \quad (9)$$

$$CC_{geração} = FE_v \cdot E \cdot Vc \quad (10)$$

Em que CC_{queima} se refere ao crédito de carbono devido à combustão nos queimadores e motores (R\$), Q_{CH_4} à vazão de gás, f_1 ao fator de equivalência entre uma tonelada de CO_2 e CH_4 igual a 21, η_{queima} à eficiência da queima (90%), Vc ao valor dos créditos de carbono, ρ à massa específica do metano ($0,67 \text{ kg/m}^3$), $CC_{geração}$ ao crédito de carbono pela geração de eletricidade (R\$), FE_v ao fator de emissão evitada adotado como sendo a média dos fatores de emissão do sistema interligado nacional (SIN) em 2015 = $0,1244 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$ (BRASIL, 2016), e E = energia gerada (MWh). Foi realizada também, a análise quanto ao custo nivelado de energia, ou LCOE, encontrado pela Equação 11:

$$LCOE = \sum_{t=0}^n \frac{C_n / (1+i)^t}{E_n / (1+i)^t}, \quad (11)$$

onde C_n representa os custos no período t , E_n a energia gerada no período t , i a taxa de desconto, e n ano.

Nos dois sistemas, verificou-se a variação do VPL considerando o preço por unidade de energia praticado em leilão da ANEEL, e caso fosse aplicado o preço, ou tarifa da concessionária de energia para consumidores incluídos no Grupo B-Subgrupo B3 e no Grupo A-Subgrupo A4 com estrutura tarifária horo-sazonal Verde.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de sistema de aproveitamento energético de gás de aterro

4.1.1 Projeção da população e geração de resíduos sólidos

A partir dos dados do IBGE e do método de projeção da população da taxa decrescente de crescimento, foi possível elaborar um gráfico (Figura 31) que mostra o crescimento populacional considerando todos os municípios integrantes do CIMASAS. O uso do método citado resultou em valores inferiores aos outros métodos, mas este foi escolhido de modo a se considerar valores mais conservadores, assim como realizado por Silva (2012).

Além disso, a partir dos valores obtidos da projeção populacional, foi possível estimar também a geração de resíduos para o período de 2015 a 2035.

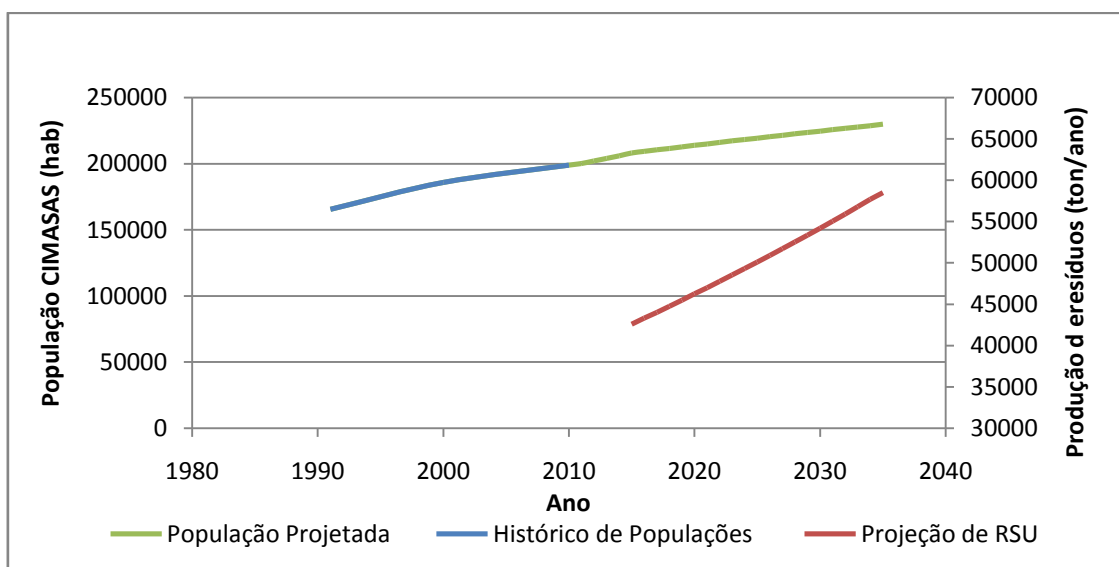


Figura 31. Projeção da população e produção de resíduos (ton/ano) para o CIMASAS.

4.1.2 Gás de aterro: geração e potencialidade energética

Com os valores da produção de resíduos, fez-se a projeção da geração de biogás no aterro ao longo dos anos, conforme Figura 32.

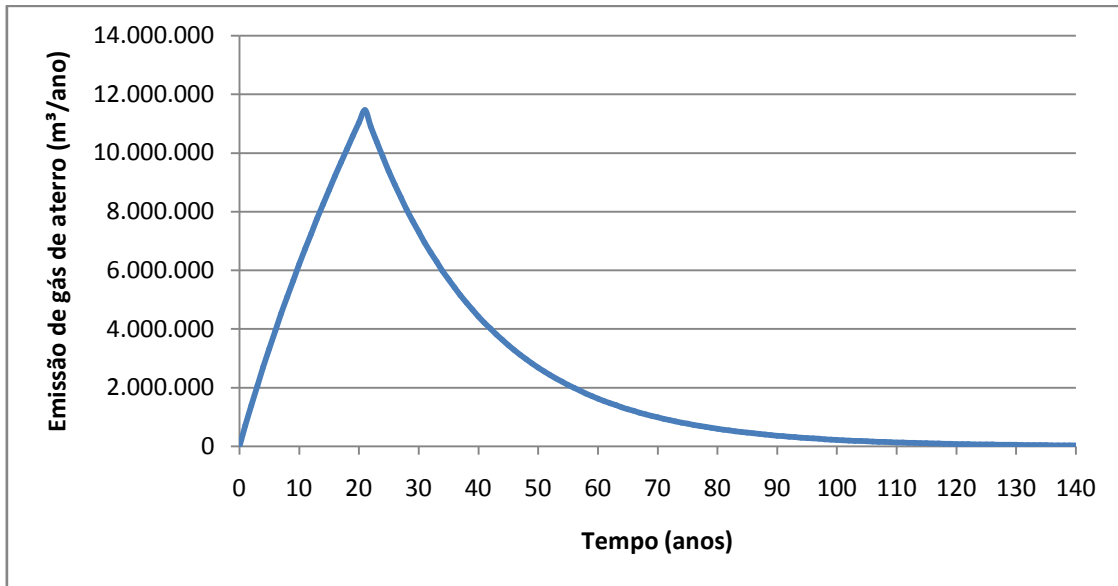


Figura 32. Gráfico da emissão de gás de aterro ao longo dos anos.

Com estes valores da emissão de biogás é possível obter uma curva de potência, como demonstrado na Figura 33.

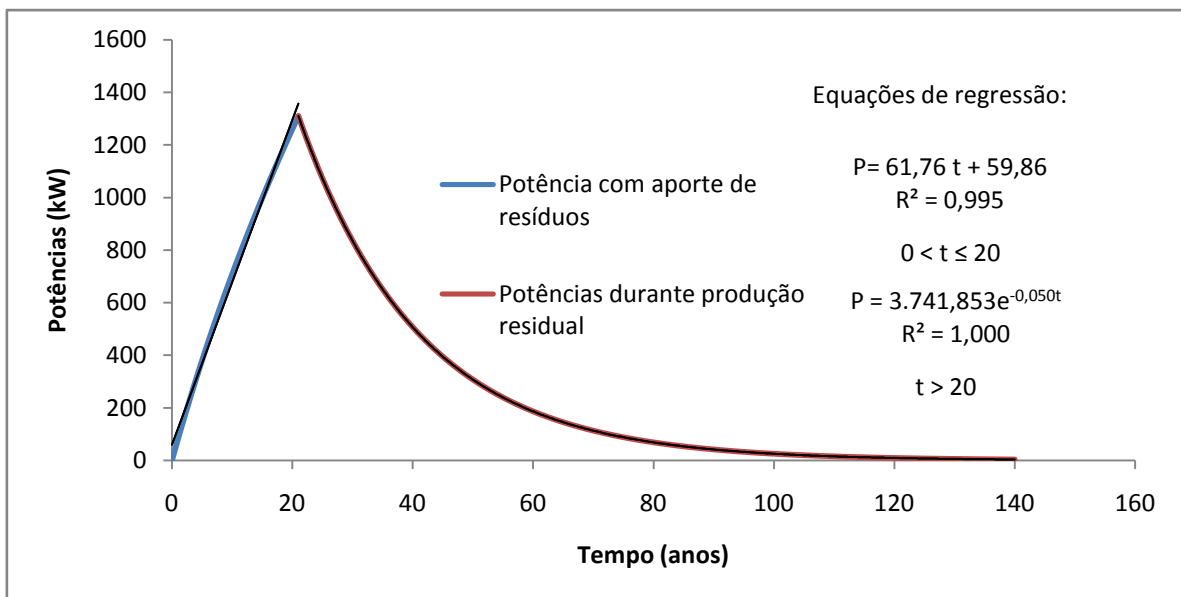


Figura 33. Gráfico da variação de potências disponíveis ao longo dos anos no aterro.

Verifica-se que as curvas ajustadas para as potências estimadas variam conforme a produção de biogás. Após o encerramento da deposição de resíduos, a geração de gás diminui com tendência a se estabilizar com o passar do tempo, dependendo apenas do valor de k . Portanto, as potências disponíveis também vão diminuindo. Mas, para execução de um empreendimento para uso do gás de aterro, deve-se selecionar valores de potência, ou um valor de potência ótimo, que apresente a maior produção de energia, e ao mesmo tempo seja economicamente viável. Analisou-se a energia que poderia ser gerada por cada valor de

potência. Na Figura 34 é possível observar que o tempo de disponibilidade de cada potência é variável. Além disso, observa-se que a potência que resultaria na maior produção energética (P_{ME}) é de 570 kW, e que seria possível obter esta potência por um período de 30 anos, como pode ser verificado pela linha traçada no centro da Figura 34.

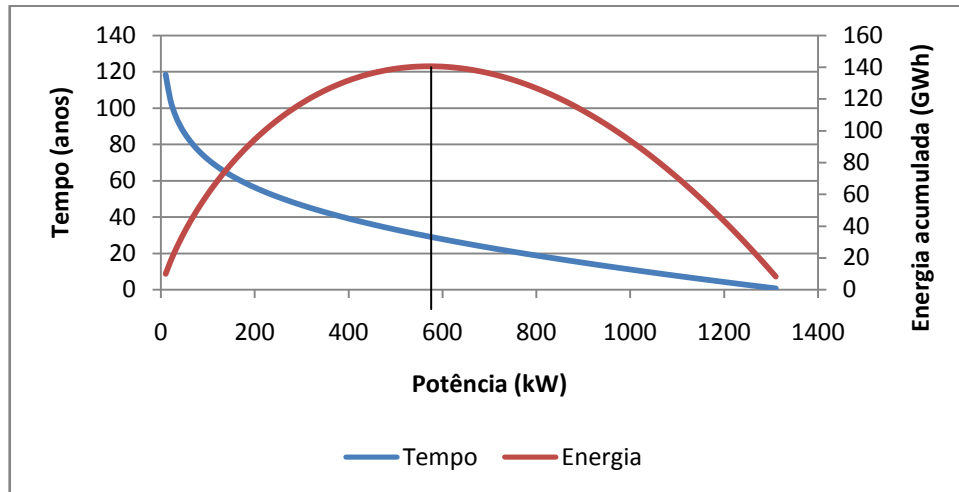


Figura 34. Relação entre potências, tempo de disponibilidade e energia gerada.

Após a determinação da potência do primeiro grupo gerador, dá-se continuidade ao procedimento de Santos (2015), analisando então, a produção de energia incremental devido à implantação de outros grupos geradores. Na Figura 35 é mostrado o incremento energético gerado por cada potência de grupos geradores adicionais. Observa-se que o incremento de energia vai aumentando de modo decrescente quanto maior o número de geradores e que há uma tendência de estabilização a partir de três geradores. Essas constatações vão ao encontro do que foi observado no trabalho de Santos (2015). Para as avaliações de viabilidade econômica foram considerados, portanto, no máximo três grupos geradores.

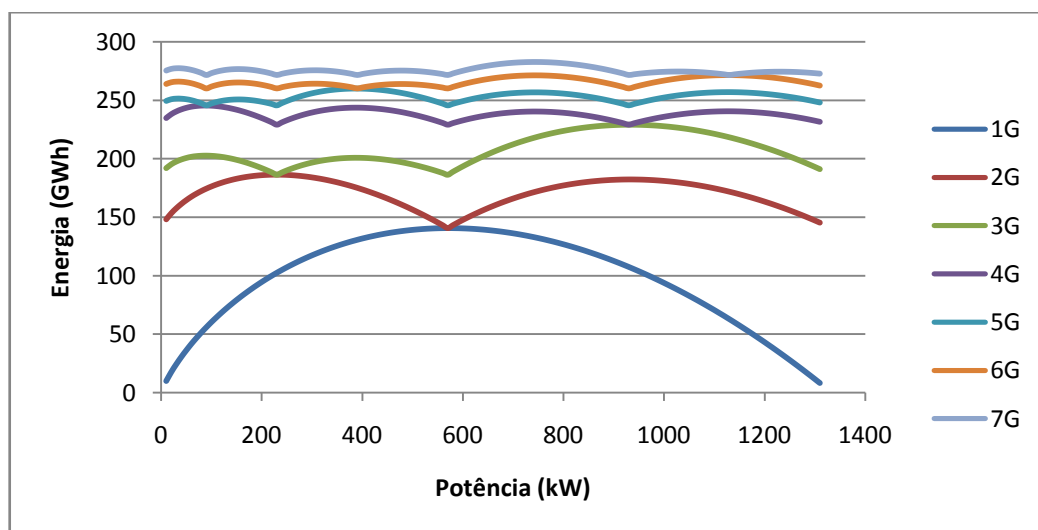


Figura 35. Incrementos energéticos devido à adição de mais grupos geradores.

4.1.3 Análise econômica do aproveitamento energético do biogás

Para a análise econômica, foram considerados os componentes do sistema e respectivos custos apresentados na Tabela 6. Para esta análise considerou-se os dados apresentados pelo programa Biogás da CETESB (2006).

Tabela 6. Equipamentos considerados para uma instalação para aproveitamento energético do biogás em aterro sanitário e respectivos custos.

Componentes	Custo*
Motor ciclo Otto	R\$ 1821/kW
Queimador (<i>flare</i>)	R\$ 364.249/unidade
Compressão	R\$ 910,62/m ³ /h
Tubulação de coleta	R\$ 458,30/m

Fonte: CETESB (2006).

*Os custos foram atualizados com base no IGP-M de 06/2006 para 11/2015 por meio da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil (2015).

Foram considerados também, os custos relativos ao tratamento do gás, em relação à umidade, a H₂S/siloxina e gás carbônico, componentes estes que prejudicam a qualidade do gás. Para cada um dos tratamentos, adotou-se o preço de R\$ 0,02/m³ como adotado em CETESB (2006), atualizado para o período atual. O investimento inicial do projeto foi calculado pela soma dos componentes necessários para instalação e funcionamento da usina no aterro. Os custos de O&M dos equipamentos do sistema de coleta de gás foram adotados como 5% do investimento inicial. Outros valores considerados também incluem comprimento das tubulações de 500m; considerou-se uma taxa de desconto de 12% ao ano. Esses valores foram adotados similarmente a Santos (2015). Quanto aos custos de O&M dos MCI, foram considerados os valores apresentados por NREL (2003). Segundo este autor, pode haver variação entre R\$ 0,03 e R\$ 0,06 por kWh (US\$ 0,008 a US\$ 0,018), dependendo do tamanho do sistema (considerando R\$ 3,33/US\$1); adotou-se o maior valor para os cálculos.

As análises foram realizadas considerando no máximo 3 grupos geradores, para um período de projeto de 30 anos, de modo a incluir também o período de recalque. Inicialmente, considerou-se o uso de um grupo gerador, que iria iniciar seu funcionamento no oitavo ano, com potência do equipamento de 570 kW (vide Figura 36).

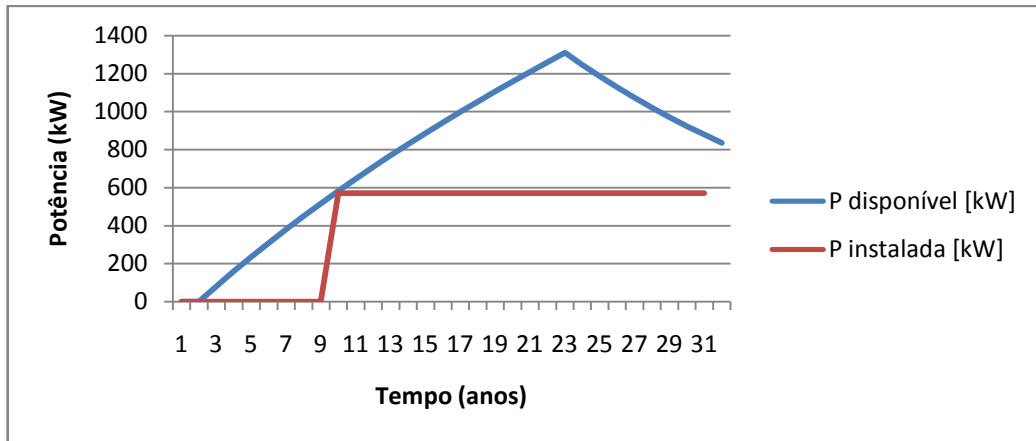


Figura 36. Planejamento de sistema de aproveitamento do biogás utilizando um grupo gerador.

No caso do uso de dois grupos geradores, o primeiro deles, com potência igual a 230 kW, iniciaria sua operação no 3º ano, e o segundo, com 340 kW, operaria a partir do 8º, conforme apresentado na Figura 37.

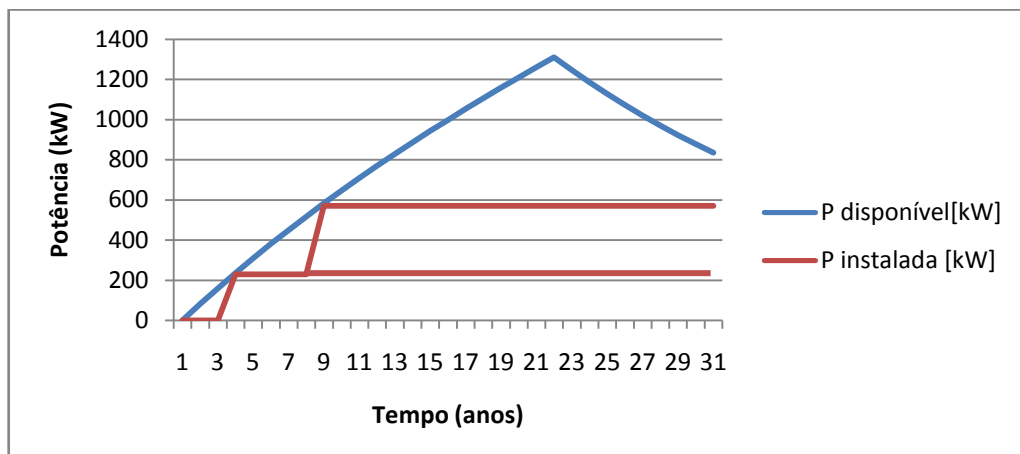


Figura 37. Planejamento de sistema de aproveitamento do biogás utilizando dois grupos geradores.

E considerando o uso de três grupos geradores, o primeiro gerador (230 kW) funcionaria a partir do 3º ano, o segundo (340 kW) a partir do 8º ano, e o terceiro (360 kW) a partir do 14º ano (vide Figura 38).

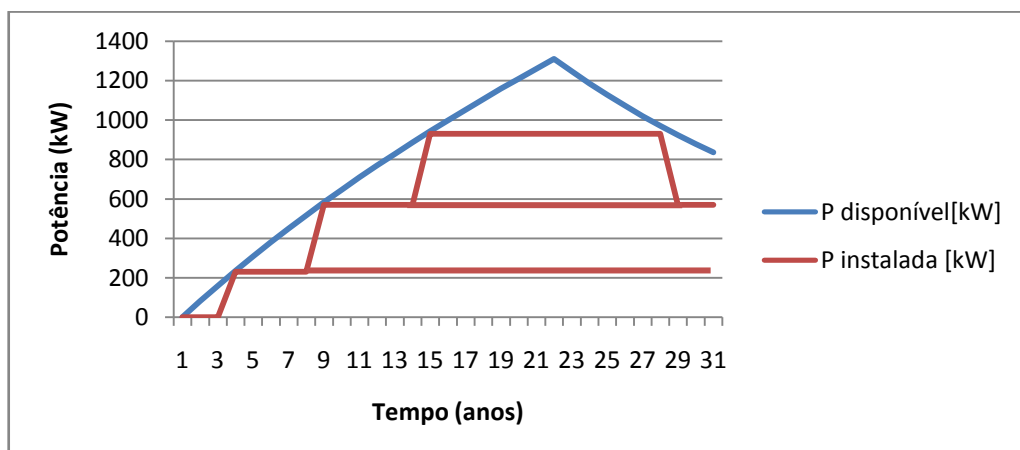


Figura 38. Planejamento de sistema de aproveitamento do biogás utilizando três grupos geradores.

Analisou-se a viabilidade econômica para os três casos, com modificações no número de grupos geradores, ou seja, considerando-se o uso de um, dois e três grupos geradores. Os custos nivelados da energia para operação durante os trinta anos, são os seguintes: R\$ 211,16/MWh para um grupo gerador, R\$ 206,29 para dois grupos geradores, e R\$ 192,62 para três grupos geradores. Inicialmente, o preço considerado para venda da energia produzida foi de R\$ 218,00/MWh, valor próximo aos praticados no mercado livre de energia. Esse valor corresponde ao praticado no Leilão A-3/2015 pela ANEEL (2015b).

Em um primeiro momento, a análise da viabilidade econômica foi realizada desconsiderando a venda de créditos de carbono. A partir desta consideração, na Figura 39 é mostrado que a produção de energia ao longo dos anos com três geradores seria maior, e a utilização de um gerador produziria mais energia que o uso de dois geradores. Mas observa-se na Figura 40 que, neste, o cenário que se mostra mais viável economicamente é quando se faz o uso de um gerador. Isso pode ser explicado pelo fato de que com mais geradores, aumentam os gastos como em relação aos investimentos iniciais, custos de manutenção e tratamento. E o preço de R\$ 218,00/MWh acaba não trazendo maiores vantagens do ponto de vista econômico, quanto ao uso de mais geradores.

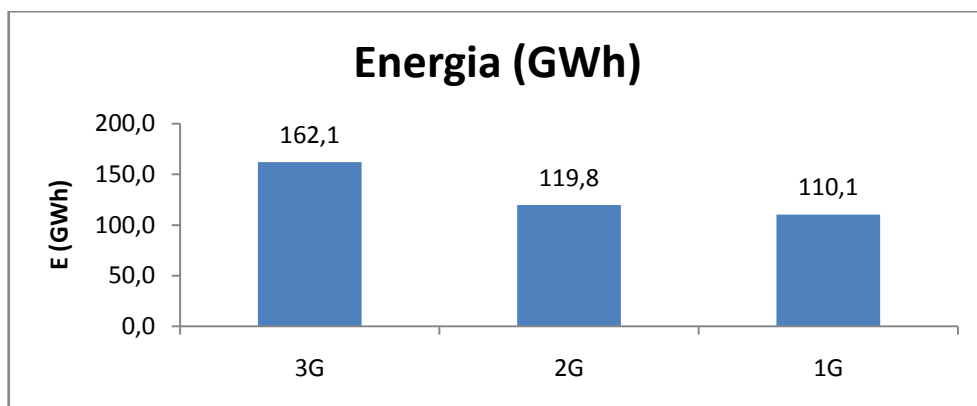


Figura 39. Energia gerada (GWh) considerando três, dois e um grupo gerador.

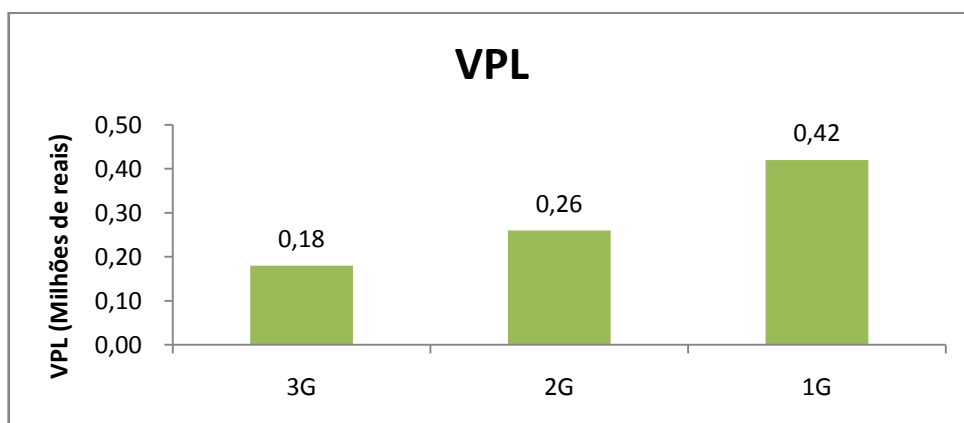


Figura 40. Resultados da análise econômica (VPL) considerando três, dois e um gerador.

Uma alternativa para melhorar a viabilidade de um projeto como este de aproveitamento do biogás de aterro, ainda considerando o preço de venda a 218,00/MWh, é a venda de créditos de carbono. Considerando o valor de €4,86 por tonelada, de 23 de março de 2016 (INVESTING, 2016) e a cotação de R\$ 3,73 por euro, chega-se à conclusão que o projeto continuaria mais viável quando da instalação de um gerador, como mostra a Figura 41.

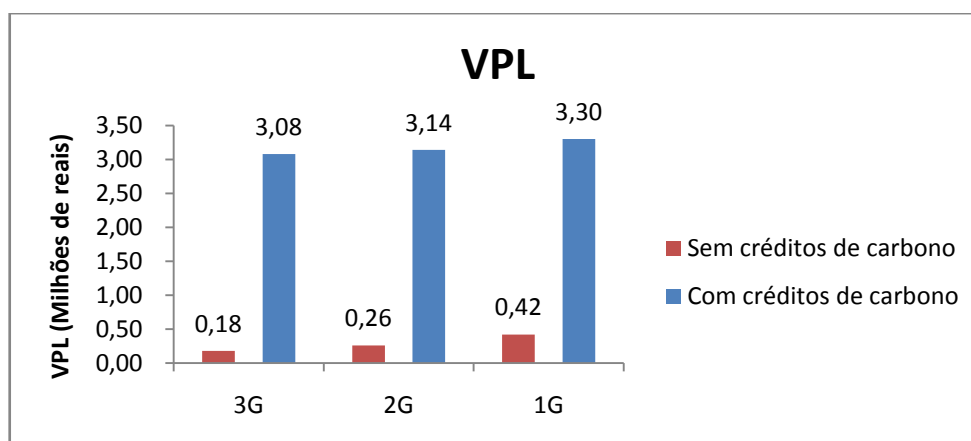


Figura 41. Resultados da análise econômica considerando três, dois e um gerador, comparando os casos sem e com venda de créditos de carbono.

Outro cenário também foi verificado considerando o sistema como de autogeração distribuída, no caso, minigeração, com compensação de energia, tendo em vista a Resolução ANEEL 482/2012 modificada pela Resolução ANEEL 687/2015. A energia poderia ser utilizada, por exemplo, no abastecimento dos prédios públicos do município em análise. Nesta situação, o valor pago anteriormente à instalação do sistema, fora custos de disponibilidade ou demanda, poderia ser considerado como se fosse uma receita, já que haveria geração da própria energia.

Para isso, inicialmente adotou-se, para verificar como o VPL se comportaria, tarifas aplicadas ao Subgrupo B3, pela companhia de distribuição de eletricidade da cidade de Itajubá-MG, a CEMIG, com o valor R\$ 561,22/MWh (junho de 2017, sem impostos) (CEMIG, 2017). Este valor, sem impostos, se assemelha aos aplicados ao Subgrupo B1. Desconsiderou-se a venda de créditos de carbono.

Observa-se na Figura 42 um incremento significativo do VPL, com inversão de preferência para o uso de três grupos geradores. Percebe-se o resultado positivo ao consumidor quando considera-se o mecanismo de compensação de energia previsto nas resoluções supracitadas. Verifica-se que o valor da tarifa, mesmo sem considerar impostos, traria resultados bastante positivos. Adicionando impostos como PASEP/COFINS e ICMS, alcançando portanto um valor de tarifa R\$ 717,76/MWh, os resultados se mostrariam ainda

mais atrativos ao consumidor, com o uso de três geradores sendo o mais viável.

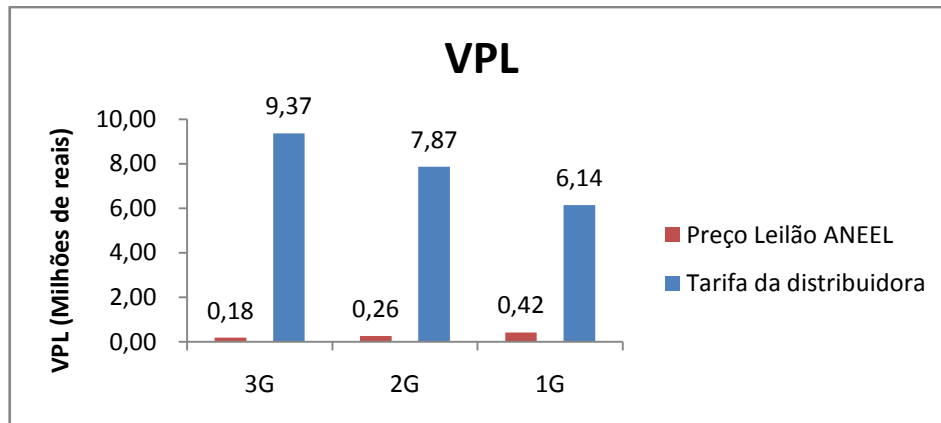


Figura 42. Resultados da análise econômica considerando a venda de energia no mercado regulado e no mercado livre.

Dada a variação do VPL em cada caso, foi elaborado um gráfico (Figura 43) para as opções de usar um, dois, ou três grupos geradores, sem haver venda de créditos de carbono, de acordo com o preço de venda, ou tarifa, da energia produzida. Pode-se observar que os projetos apresentariam viabilidade a partir de um valor ao redor de R\$ 210,00 para todas as opções. A opção de usar três grupos geradores passa a se tornar a opção mais interessante a partir de um valor ao redor de R\$ 245,00/MW. E, a partir deste mesmo patamar, o uso de apenas um grupo gerador passa a ser o mais desvantajoso.

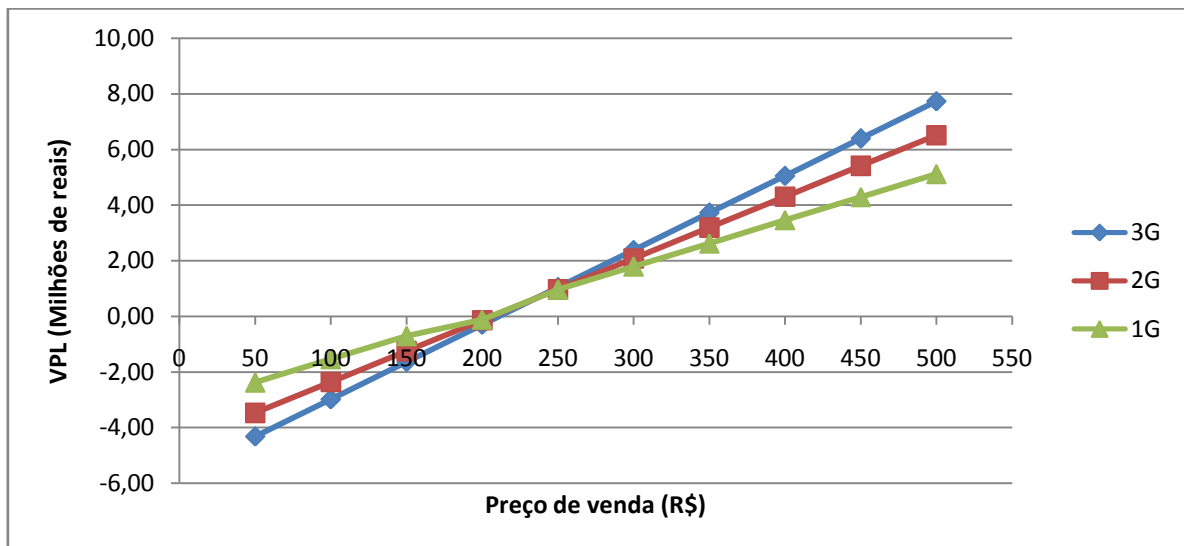


Figura 43. Relação entre a variação de valores da tarifa de energia e o VPL.

Caso o consumidor esteja incluído no Grupo A-Subgrupo A4 Verde, como o Centro Administrativo de Itajubá, o sistema continuaria apresentando VPL positivo. Neste caso, devem ser utilizadas as tarifas aplicadas no consumo fora de ponta, de R\$ 355,28/MWh (sem impostos) e R\$ 454,38/MWh (com impostos); no consumo no horário de ponta de R\$

1251,63 MWh (sem impostos) e R\$ 1600, 75/MWh (com impostos); e tarifa aplicada à demanda, de R\$ 9,06/kW (sem impostos) e R\$11,63/MWh (com impostos). Esses valores são referentes também ao mês de junho de 2017, conforme CEMIG (2017).

Considerando que 90% do consumo ocorre no horário fora de ponta, como o que ocorre no Centro citado anteriormente, e utilizando os valores sem impostos, portanto menores, o VPL chegaria a R\$ 6,26 milhões para três grupos geradores, R\$ 5,30 milhões para dois grupos geradores, e R\$ 4,21 milhões para um gerador. Como a maioria do consumo se dá no horário fora de ponta, a maior influência se dá em relação à tarifa atribuída a este período.

Neste subgrupo A4, com estrutura tarifária horo-sazonal Verde, a tarifa do horário fora de ponta, que costuma corresponder a cerca de 30% da tarifa do horário de ponta quando se verificam dados da CEMIG, é menor, portanto o VPL também reduzirá, apesar de continuar positivo. Quando verifica-se a variação do VPL com a variação das tarifas utilizadas neste caso, percebe-se o mesmo comportamento apresentado na Figura 43. Ou seja, a partir de determinado valor de tarifa, mesmo abaixo dos valores atuais, o uso de três geradores sempre se mostra o mais economicamente atrativo. Neste caso, esse fato ocorreria com valores de R\$ 680/MWh para consumo no horário de ponta e R\$ 193/MWh no horário fora de ponta.

Os resultados mostram que este primeiro sistema proposto para o aterro sanitário de Itajubá é viável. No próximo item é avaliada a viabilidade para instalação de um sistema solar fotovoltaico após o encerramento das atividades do aterro.

4.2 Análise do sistema solar fotovoltaico

4.2.1 Características do local e do sistema

Na plataforma superior do aterro, verificou-se que poderiam ser instalados um total de 1575 módulos fotovoltaicos, o que seria equivalente a uma potência nominal de 410 kW, resultando em um fator de utilização igual a 45%. Quanto à escolha da potência do inversor, e para as simulações de produção de energia foi considerado o FDI próximo a 1. Para tanto, foi escolhida a potência de um inversor de 408 kW. Na Tabela 7, verifica-se a configuração do sistema proposto.

Tabela 7. Características do sistema solar fotovoltaico proposto

Variáveis	Valor	Variáveis	Valor
Número de módulos	1575	Potência nominal dos módulos	410 kW
Módulos em série	21	Potência do inversor	408 kW
Conexões em paralelo	75		

Após a definição das características do sistema solar fotovoltaico, foi possível verificar qual seria a produção de energia do sistema. A Tabela 8 mostra os resultados para o primeiro ano de operação do sistema proposto.

Tabela 8. Resultados de geração do sistema no primeiro ano de operação

Geração (MWh)	641
Produção específica (kWh/kWp/ano)	1565
Taxa de desempenho	83,1%

O valor de geração de 641 MWh já considera perdas devidas aos sombreamentos próximos (-2,3%); fator IAM (*Incidence Angle Modifier*) (-2,0%); perdas pelo nível de irradiância (-0,6%) e temperatura (-9,6%); às diferenças de desempenho que ocorrem entre condições de teste e condições reais de operação dos módulos (-1,0%); perdas de eficiência no inversor (-1,8%).

Considerando que o sistema solar fotovoltaico irá operar durante 25 anos, a Figura 44 traz quais seriam os resultados para cada ano de produção de energia para uma taxa de degradação dos módulos de 0,5 % ao ano.

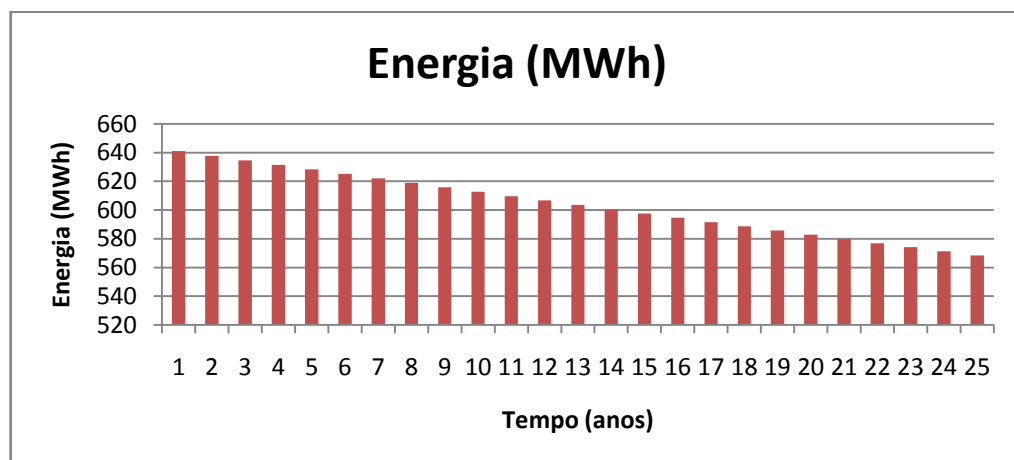


Figura 44. Produção de energia ao longo de 25 anos de funcionamento.

4.2.2 Análise econômica da implantação do sistema fotovoltaico

Para as análises realizadas para o sistema, foram considerados inicialmente, dados conforme os mesmos patamares dos dias atuais, como preços dos equipamentos do sistema fotovoltaico, carga de impostos, taxas e contribuições, cotações de moedas estrangeiras. Em um primeiro momento que toda a energia gerada seria vendida pelo preço adotado de R\$ 297,75/MWh, ou R\$ 0,298/kWh, sendo este o preço médio de venda da energia fotovoltaica

no 2º Leilão de Energia de Reserva de 2015. Neste caso, as análises realizadas mostraram que o sistema não se mostra economicamente viável, apresentando um VPL negativo de -R\$ 1,75 milhão. O investimento para o sistema proposto seria de R\$ 2.821.499 .

O preço nivelado resultaria em um valor de R\$ 603,24/MWh. Em documento elaborado por MME/EPE (2014) são apresentadas algumas referências internacionais do preço da energia fotovoltaica: considerando o LCOE, a Agência Internacional de Energia estabeleceu para 2014 um preço entre US\$ 119/MWh e US\$ 318/MWh (considerando o câmbio do dólar a R\$3,33/US\$ do dia 23/06/2017, os valores ficariam entre R\$ 396,27/MWh e R\$ 1.058,94/MWh); o Instituto Fraunhofer, entre US\$ 100 e US\$ 178, em 2013 (considerando o câmbio do dólar a R\$ 3,33/US\$, entre R\$ 333,00/MWh e R\$ 592,74/MWh); na China em 2013, o preço estava entre US\$ 79/MWh e US\$ 145 (ou R\$ 263,07/MWh e R\$ 482,85/MWh). Os valores estão relativamente próximos ao encontrado neste trabalho.

Havia em tramitação no Brasil um Projeto de Lei (PL 8322/2014), embora arquivado em 2016, que propunha a isenção de impostos para equipamentos e componentes de geração de energia solar. A proposta original deste projeto de lei seria apenas a isenção de imposto sobre importação para alguns equipamentos, como os painéis fotovoltaicos, mas uma alteração foi proposta de modo a isentar outros componentes do Imposto sobre Produtos Industrializados – IPI (os módulos já são isentos deste imposto), além da possibilidade de isenção de PIS e Cofins (OLIVEIRA, 2016).

Considerando que haveria isenção de tais impostos (IPI, PIS e Cofins), sobre módulos fotovoltaicos e que os inversores também seriam isentos, um novo cenário (2) foi avaliado. Neste caso, a carga de tributos, taxas e contribuições sobre módulos e inversor, cairia de 42%, para 32%. Considerando o mesmo valor de venda de energia (R\$ 297,75/MWh ou R\$ 0,297/kWh) o preço do sistema ficaria em R\$ 6,43/W e o VPL alcançaria o valor ainda negativo de R\$ 1,53 milhão ou seja, 13 % mais favorável que anteriormente, mas ainda economicamente inviável.

Analisou-se também para este sistema fotovoltaico, o caso de haver compensação de energia, em que a eletricidade produzida poderia ser utilizada pelo consumidor. Assim, em um primeiro momento, como considerado no sistema a biogás, verificou-se a viabilidade do sistema com os mesmos preços pagos à distribuidora de energia considerando o consumidor incluído no Grupo B, ou seja, R\$ 561,22/MWh (sem impostos) e R\$ 717,76/MWh (com impostos). A carga de tributos, taxas e contribuições sobre módulos e inversor foi considerada novamente como de 42%. Neste cenário, a viabilidade do sistema é alcançada, com VPL positivo de R\$ 242 mil, quando se considera com o valor da tarifa de energia de R\$

717,76/MWh, ou seja, com impostos. Como é mostrado na Figura 45, o sistema passaria a se mostrar economicamente viável a partir de valores ao redor de R\$ 665/MWh.

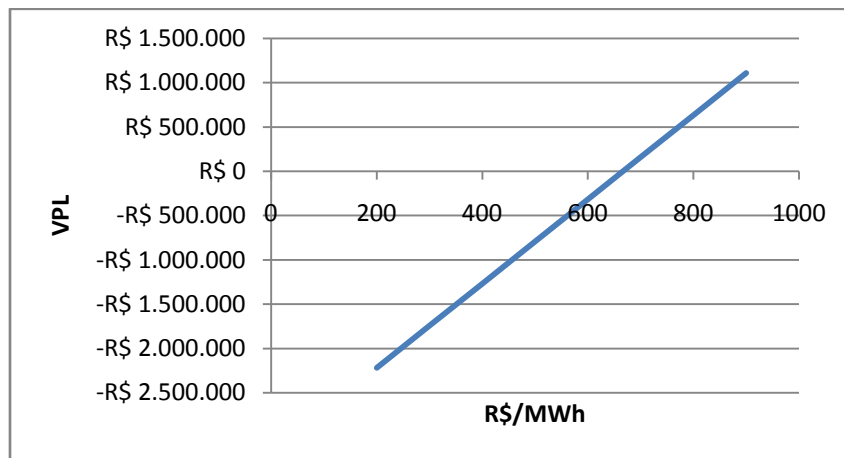


Figura 45. Variação do VPL conforme valor pago por MWh.

Percebe-se que a viabilidade econômica do sistema está relacionada diversos fatores e seria afetada por um deles ou uma combinação, como do preço dos equipamentos tais como os módulos e inversores; preço pago pela energia produzida; carga tributária; e, por ter sido considerada a importação de módulos e inversores, a cotação da moeda estrangeira. Tendo isto em vista, elaborou-se a Figura 46, em que é possível observar a relação do VPL com o preço do sistema por Watt e o preço, ou tarifa, paga por MWh.

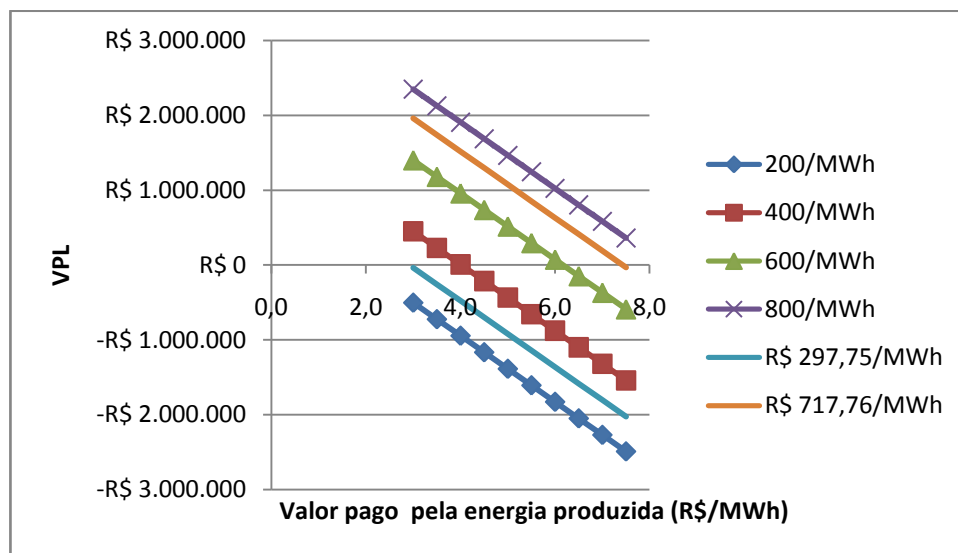


Figura 46. Comportamento do VPL com variação do preço total do sistema (R\$/W) e valor pago por unidade de energia produzida (R\$/MWh).

Verifica-se que quando o valor pago por unidade de energia fica ao redor de R\$ 300/MWh, como verificando anteriormente, a viabilidade econômica é alcançada quando, por exemplo, o valor de sistema fica bem abaixo dos atuais, cerca de R\$ 3,00/W. Aumentando o

valor pago por MWh, a viabilidade é alcançada mesmo com preços do sistema (R\$/W) maiores. Como no caso do pagamento considerado de R\$ 717,76/MWh, em que o VPL deixaria de apresentar valor negativo mesmo com preço do sistema a cerca de R\$ 7,50/W.

Aplicando as tarifas do subgrupo A4, com tarifação horo-sazonal Verde, como feito para o sistema a biogás, considerando que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico seria utilizada toda no horário fora de ponta, e utilizando a tarifa de energia de junho de 2017 com impostos, R\$ 454,38/MWh (CEMIG, 2017), o VPL se mostra negativo (-R\$ 998 mil), considerando o sistema com o mesmo preço de R\$ 6,89/W. Neste preço, a variação da tarifa paga por unidade de energia apresenta comportamento similar (linear) ao apresentado na Figura 45, e o VPL alcançaria valores quando o preço do sistema alcançasse valores próximos a R\$ 4,60/W.

Vale dizer que, em relação ao preço dos módulos e inversores, que correspondem a aproximadamente 60% do preço total do sistema, a tendência é de redução, principalmente para os módulos fotovoltaicos, que já apresentaram redução significativa nos últimos anos. Ou seja, conseqüentemente à diminuição do preço do sistema, mesmo valores menores pagos pela energia poderiam trazer resultados positivos financeiramente ao proprietário do sistema.

Fraunhofer ISE (2015), por exemplo, verificou em seus estudos, a partir de histórico de preços, cenários para preços futuros de módulos entre €0,14 e €0,36/Wp (ou R\$ 0,52 e R\$ 1,93/Wp, considerando cotação R\$ 3,73/US\$, do dia 23/06/2017) em 2050. Para 2035, IEA (2014) espera, preços ao redor de US\$ 0,3 e US\$ 0,4 (ou R\$ 0,99 e R\$ 1,33/W, a R\$ 3,33/US\$, do dia 23/06/2017). E mesmo para inversores, Fraunhofer (2015) também verificou que, dependendo do cenário, o preços estariam entre €0,021 a €0,042/W (R\$0,08 a R\$0,16/W, a R\$3,73/€1). De fato, quando se considera os maiores valores para módulos e inversores dos cenários de Fraunhofer (2015), e o valor de tarifa de R\$ 454,38/MWh, o VPL passa a ser positivo (R\$ 302 mil).

Ou seja, a tendência é que as condições para esta tecnologia se tornem cada vez mais favoráveis. E por meio das análises realizadas, verifica-se que é grande o potencial para aproveitamento da área do aterro para produção de energia a partir de fontes renováveis. Seria possível gerar cerca de 162,1 GWh a partir do uso do biogás durante 30 anos, considerando o cenário mais economicamente viável, e 15,1 GWh, durante 25 anos, a partir da instalação de painéis fotovoltaicos.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo analisou o potencial de aproveitamento energético em um aterro sanitário por meio do uso de duas diferentes fontes de energia renovável, verificando o potencial do uso do gás de aterro e a possibilidade de aproveitar a área do aterro para uma instalação solar fotovoltaica após o período de recebimento de resíduos. Este último caso constitui-se de uma técnica relativamente recente que vem sendo aplicada por alguns países. Existe um potencial muito grande de utilizar áreas contaminadas, como aterros sanitários de RSU, aterros de resíduos da construção civil, ou mesmo aterros industriais, como pontos onde poderia haver aproveitamento da área disponível para geração de energia renovável. Isso faz com que estes locais voltem novamente a ser produtivos uma vez que muitas vezes passam a ser subutilizados quando alcança-se sua capacidade máxima de recebimento de resíduos.

Verificou-se que no presente estudo de caso, existe a possibilidade de instalação de um sistema a biogás e também de um sistema solar fotovoltaico ao longo dos anos do aterro sanitário. Os dois sistemas se mostrariam possíveis de serem instalados e apresentariam viabilidade econômica, com melhores resultados quando se considera a tarifa de energia da distribuidora, levando-se em consideração do uso do sistema de compensação de energia tendo, por exemplo, os prédios da prefeitura local como unidades consumidoras. Ambos sistemas poderiam ser classificados como sistemas de minigeração, conforme a Resolução ANEEL 482/2012 modificada pela Resolução 687/2015. Neste caso, os gastos anteriores à utilização da energia gerada pelos sistemas (de autogeração) propostos, poderiam ser considerados como receitas, do ponto de vista econômico.

Inicialmente, foi proposta a instalação do sistema de aproveitamento energético do gás de aterro para conversão em eletricidade. Analisou-se a viabilidade econômica para o uso de um, dois ou três grupo geradores. As análises econômicas foram realizadas para um período de 30 anos, que também abarca o período de recalque do aterro sanitário. O sistema se mostrou viável em todos os cenários. Quando o valor pago por unidade de energia é menor, como os R\$ 218/MWh, o uso de um grupo gerador seria o mais interessante. Mas à medida que este valor aumenta, o uso de três grupos geradores passa então a ser a opção mais financeiramente atrativa, gerando um total de 162,1 GWh nos 30 anos de operação. Valores maiores pagos por unidade de energia beneficiam o uso de três grupos geradores. O uso do sistema como de minigeração distribuída, considerando o mecanismo de compensação de energia é o cenário que apresenta melhores resultados.

Quanto ao sistema solar fotovoltaico, utilizando da área da plataforma superior do

aterro sanitário, onde deva ser utilizado preferencialmente o sistema autobalastrado para fundações de modo a evitar penetração na cobertura final, após o mesmo já ter encerrado suas atividades, e considerando que todas as precauções técnicas seriam tomadas, haveria a possibilidade de instalar um sistema de 410 kW, gerando 15,1 GWh durante o período de 25 anos de operação, utilizando-se de painéis de estrutura rígida, mais eficientes que a tecnologia fotovoltaica em que os painéis são flexíveis. Não houve viabilidade considerando o preço praticado no leilão de energia. Mas quando utiliza-se a tarifa de energia cobrada pela distribuidora local, no caso do consumidor estiver incluído no Grupo B, o sistema passa a alcançar VPL positivo. Há de se considerar que, como o sistema seria instalado após o período de operação do aterro, o mesmo será significativamente beneficiado pela redução do preço de um sistema fotovoltaico, já que os equipamentos, principalmente os painéis, tendem a apresentar grande diminuição em seus preços, como o que vem ocorrendo recentemente.

Para estes sistemas fotovoltaicos instalados sobre áreas de deposição de resíduos, como aterros sanitários de RSU, preferência deve ser dada a fundações que não resultem na penetração da cobertura final do aterro, como os sistemas autobalastrados. Algumas áreas podem apresentar maiores dificuldades quanto a problemas com estabilidade, ou serem mais declivosas. Neste caso há de considerar o uso de painéis fotovoltaicos flexíveis instalados sobre geomembranas, que também vêm apresentando suas aplicações.

Os estudos mostraram que o aterro do CIMASAS poderia gerar ao longo do período de recebimento de resíduos e também após o fim destas atividades, uma quantidade importante de energia a partir do uso de duas fontes renováveis de energia. Outras vantagens de continuar utilizando o local com este tipo de sistema estão a continuidade da geração de recursos na área, um aumento no monitoramento já que estes locais devem continuar recebendo atenção com monitoramento e tratamento dos gases e lixiviados, por vários anos, devido ao seu passivo ambiental.

Ou seja, além do aproveitamento do gás de aterro, há a possibilidade de instalação de um sistema solar, o que traz mais uma oportunidade de uso de um local que poderia vir a ser subutilizado. 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

Algumas sugestões para trabalhos futuros incluem:

- Análise da utilização de um sistema híbrido considerando a utilização do gás de aterro e da energia solar fotovoltaica em aterro sanitário;
- Análise da ocorrência de recalque adicional pela instalação de painéis fotovoltaicos de estrutura rígida na plataforma superior de aterro sanitário, por meio da verificação de dados geotécnicos;
- Análise do potencial brasileiro de instalação de usinas de energia renovável, principalmente sistemas solares fotovoltaicos, sobre áreas de deposição de resíduos, tais como aterros sanitários de RSU.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. 2012. ABINEE, 2012. 176p.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2014. São Paulo: ABRELPE, 2014.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo: ABRELPE, 2013.

ALMEIDA, H.S. **2º Curso de Especialização em direito tributário estadual**. 2003.

Disponível em:

<https://www.sefaz.ba.gov.br/scripts/ucs/externos/monografias/monografia_geraldo.pdf>

Acesso em: 17 fev. 2017

AMBIENTE ENERGIA. **Resíduos sólidos podem gerar 1,3 GW de energia elétrica**.

Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/02/residuos-solidos-podem-gerar-13-gw-de-energia-eletrica/25494>>. Acesso em: 01 de. 2015.

AMERICAN ACADEMY OF ENVIRONMENTAL ENGINEERS & SCIENTISTS. 2012

Excellence in Environmental Engineering and Science Competition Winner. 2012 Honor Award - Environmental Sustainability: Hickory Ridge Landfill Solar Energy Cover.

Disponível em: <http://www.aees.org/e3competition-winners-2012honor-environmentalsustainability.php>>. Acesso em: 08 dez. 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Cadernos Temáticos ANEEL – Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília, DF. Março de 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leilão nº4/2015-ANEEL (Leilão A-3)**. 2015b. Disponível em:

http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/EDITAL_Leil%C3%A3o_A%20-%203_2015%20-%20vers%C3%A3o%20para%20publica%C3%A7%C3%A3o.pdf>.

Acesso em: 23 dez. 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. 2015c.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de informações de geração. **Matriz de energia elétrica**. 2017. Disponível em:
<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>.
Acesso em: 21 jun. 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e Minigeração Distribuída**: sistema de Compensação de Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2ª ed. Brasília: ANEEL, 2016. 31p.

ANP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº8, de 30 de janeiro de 2015**. Estabelece a especificação do biometano contida no Regulamento Técnico nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. 2015.

ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Gerenciamento de resíduos de serviços de saúde**. Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

ABREPLE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. São Paulo: ABRELPE, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: 1992. 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**. 1ª ed. Rio de Janeiro: 1997. 12p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação**. 2ª ed. Rio de Janeiro: 2004. 71p.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão**. 2015. Disponível em:
<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=1>>. Acesso em: 23 dez. 2015.

BANCO MUNDIAL/ESMAP. Energy Sector Management Assistance Programme. **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. 2004. Disponível em: <<http://www.esmap.org/node/1106>>. Acesso em: 17 out. 2015.

BANCO MUNDIAL. **What a Waste: a global review of solid waste management**. Washington: Banco Mundial, 2012. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2015.

BARBOSA, V. EXAME.COM. **A nova era da energia renovável já começou no Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/a-nova-era-da-energia-renovavel-ja-comecou-no-brasil>>. Acesso em: 30 out. 2015.

BAREITHER, C. A.; KWAK, S. Assessment of municipal solid waste settlement models based on field-scale data analysis. **Waste Management**, v. 42, p. 101-117, 2015

BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. 1ed. Rio de Janeiro-RJ/ Itajubá-MG: Interciência/ Acta, 2012. v.1. 376p.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150-164, 2014.

BENSON, B.; LaFOUNTAIN, L. **Liquids collection, management and landfill gas impacts at the OII Landfill**. 2003. Disponível em: <http://www.scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Benson_Liquids_LFG_Impacts_OII.pdf>. Acesso em: 10 de. 2015.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC-USP, 1999.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BOSCOV, M. E. G. . Desafios geotécnicos no projeto e construção de aterros de resíduos. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2006, Curitiba. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica / IV SBMR IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2006. v. 4. p. 145-174.

BOVE, R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and

innovative Technologies. **Energy Conversion and Management**, vol. 47, p.1391-1401, 2006.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 03 ago. 2010a. Seção 1, p.3.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. 2010b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm. Acesso em: 17 dez. 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estudo elaborado pelo Inpe traça o mapa da produção de energiasolar no território nacional**. 2017. Disponível em: <http://www.mcti.gov.br/noticia/-/asset_publisher/epbV0pr6eIS0/content/estudo-elaborado-pelo-inpe-traca-o-mapa-da-producao-de-energia-solar-no-territorio-nacional>. Acesso em: 08 jul. 2017.

BRITO FILHO, L. F., **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

CANAL ENERGIA. **Mais de mil consumidores já fazem uso da geração distribuída no país**. 2015. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Consumidor.asp?id=109013>>. Acesso em: 30 out. 2015.

CASTILHOS JR., A.B. (Coord.). **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 494p.

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Preço de Liquidação das Diferenças tem teto e piso revisados pela ANEEL**. 2015. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticia leitura?contentid=CCEE_360641&_afLoop=3170995699394569#%40%3Fcontentid%3DCCEE_360641%26_afLoop%3D3170995699394569%26_adf.ctrl-state%3Dlve9ek6ti_17>. Acesso em: 31 mar. 2016.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Tarifas e Tributos**. 2017. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/corporativo/Paginas/tarifas.aspx>>. Acesso em: 1 jun. 2017.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Glossário**. 2017a. Acesso em: <<http://ri.cemig.com.br/static/ptb/glossario.asp?idioma=ptb>>. Acesso: 10 jul. 2017.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Biogás - Aterros, versão 1.0**

/ CETESB, Ministério Brasileiro de Ciência e Tecnologia – Software e Manual. São

Paulo, 2006. Disponível em < <http://biogas.cetesb.sp.gov.br/software/> >. Acesso em: 17 dez. 2015.

COELHO, S.T. Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás Proveniente do Tratamento de Esgoto Utilizando um Grupo Gerador de 18 kW. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Políticas Públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio, Brasília. **Anais...** Brasília – DF, 2006. p.140-144.

CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES; BRITISH COLUMBIA MINISTRY OF ENVIRONMENT. **Technologies and best management practices for reducing GHG emissions from landfills guidelines**. 2011.

COSTA, L. EXAME.COM. **Canadian Solar, SunEdison e BYD vão fabricar painéis solares**. 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/negocios/noticias/canadian-solar-sunedison-e-byd-vao-fabricar-paineis-solares>>. Acesso em: 29 out. 2015.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, p. 205-233, 2005.

ELETROBRAS. **Manual de tarifação da energia elétrica**. 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 nov. 2016.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas**. 2003. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 2003.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Leilão de Energia de Reserva de 2014. **Participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: visão geral**. 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%202014/NT_EPE-DEE-NT-150_2014.pdf>. Acesso em: 29 out 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **1º Leilão de Energia de Reserva de 2015**. Participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: visão geral. 2015. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%20\(2015\)/NT_EPE-DEE-NT-127_2015-r0_completo.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20Reserva%20(2015)/NT_EPE-DEE-NT-127_2015-r0_completo.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2015.

FARIA Jr., H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.076>.

FIRESTONE. **Tessman Road Municipal Solid Waste Landfill - San Antonio, TX. Thermoplastic geomembrane proves ideal for first-of-its kind exposed geomembrane solar cap.** 2010.

FRAUNHOFER ISE. **Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems.** Study on behalf of Agora Energiewende. 2015.

GAMECHANGE RACKING. **Pour-in-place Ballasted Ground.** Disponível em: <http://www.gamechangeracking.com/#!pour-in-place-ballasted-ground/cylz>>. Acesso em: 11 dez. 2015

GEOSYNTHETICS. **Landfill cover promotes new energy source.** 2009. Disponível em: <https://secure.ifai.com/geo/articles/0809_f1_cover.html>. Acesso em: 08 dez 2015.

GONÇALVES, A. T. T. **Potencialidade energética dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de Itajubá-MG.** 2007. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

GREEN, M. **Landfill sites find reuse as locations for solar power plants.** The Daily Beast. 2013. Disponível em:

<<http://www.thedailybeast.com/articles/2013/05/19/landfill-sites-find-reuse-as-locations-for-solar-electricity-plants.html>>. Acesso em: 12 out. 2015.

GREEN, M. A. Developments in Crystalline Silicon Solar Cells. In: CONNIBER, G. J.; WILLOUGHBY, (Eds.). *Solar Cell Materials: developing technologies*. Chichester: John Wiley & Sons, 2014, cap.4, p.65-84.

GREENPRO. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação.** 2004. Disponível em: <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

GRUPO DE RESÍDUOS SÓLIDOS - UFPE e BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.** 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produ

tos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2015.

HABERLIN, H. **Photovoltaics: system design and practice**. Chichester: John Wiley & Sons, 2012.

HDR. **World's largest solar energy cover for the Hickory Ridge Landfill**: a sustainable alternative approach for landfill closures. Disponível em: <http://www.socalswana.org/hickory_ridge_landfill_MR_MJU.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2015.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos**: uma abordagem tecnológica. 2004. 190f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

HOCK, P. **A simple guide to building photovoltaic projects on landfills and other waste heaps**. 2013. Disponível em: <http://solarflexrack.com/a-simple-guide-to-building-photovoltaic-projects-on-landfills-and-other-waste-heaps/>>. Acesso em: 08 dez. 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. **Infográficos**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=31&search=minas-gerais>>. Acesso: 15 dez. 2015.

ICLEI. INTERNATIONAL COUNCIL FOR LOCAL ENVIRONMENTAL INITIATIVES. **Manual para aproveitamento do biogás**: aterros sanitários. v. 1. São Paulo: ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de Projetos no Brasil, 2009. 80 p.

IEA PVPS- International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme. **Snapshot of global PV markets**: 2014. IEA: 2015.

IEA PVPS- International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme. **Snapshot of global PV markets**: 2015. IEA: 2016.

IEA – International Energy Agency. **Technology Roadmap**: solar photovoltaic energy. 2014. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2016.

IPCC- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Capacity and Generation**. Installed Renewable Energy Capacity. 2017. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=4&subTopic=16>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable power generation costs in 2014**. IRENA: 2015.

INVESTING. **Crédito Carbono Futuros Dez 16 (CFI2Z6)**. 2016. Disponível em: <<http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

JANUZZI, G. M.; MELO, C. A. Grid-connected photovoltaic in Brazil: policies and potential impacts for 2030. **Energy for sustainable development**, v. 17, p. 40-46, 2013.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. **Photovoltaic degradation rates – an analytical review**. 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. *Final covers for solid waste landfills and abandoned dumps*. 1. ed. Virginia: Asce press, 1997. 256 p.

LANDEIRA, J. L. F. **Análise técnico-econômica sobre a viabilidade de implantação de sistemas de geração fotovoltaica distribuída no Brasil**. 2013. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, p. 3496-3502, 2011.

MACHADO, S. L. et al. Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills. **Waste Management**, v. 30, 2579-2591, 2010.

MACHADO, S. L. et al. Methane generation in tropical landfills: simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, p. 153-161, 2009.

MACIEL, F.J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 333f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MAGALHÃES, A. F. **Avaliação do desempenho de técnicas de bioengenharia na proteção e conservação da cobertura final de taludes em aterros de disposição de**

resíduos sólidos urbanos: estudo de caso para o aterro sanitário de Belo Horizonte, MG. 2005. 169f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MARION, B. **Performance parameters for grid-connected PV Systems.** 2005. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37358.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2015.

MÅRTENSSON, C.; SKOGLUND, M. Solar landfills: a study of the concept in a Swedish setting. 2014. 95f. Dissertação (Mestrado em Energia e Engenharia Ambiental), Universidade Linköping, 2014.

MASENERGY. **Coca-Cola Cogen Plant.** 2015. Disponível em: <<http://www.mas-energy.com/projects/coca-cola-cogen-plant.aspx>>. Acesso em: 12 out. 2015.

MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENERGY RESOURCES. **The guide to developing solar photovoltaics at Massachusetts landfills.** Disponível em: <<http://www.mass.gov/eea/docs/doer/green-communities/pubs-reports/pvlandfillguide.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2015.

MAYFIELD, R. **Photovoltaic design & installation for dummies.** Indianapolis: Wiley Publishing, 2010.

MELO, M. C. et al. Microbiologia de resíduos sólidos urbanos e sua relação com a deformação vertical da massa aterrada. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 225-234, 2014.

MESSICS, M. C. **Case Study Pennsauken Landfill Solar Project.** Renewable Energy at Closed Landfills Workshop. 2010. Disponível em: <<http://www.mass.gov/eea/docs/dep/energy/0110ppl.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2015.

MONTEIRO, M. B.; COSTA, M. B. **Aterro sanitário municipal de Itajubá.** Encerramento do empreendimento. 2006. Relatório Técnico Novo Meio Engenharia & Consultoria Ltda.

BRASIL. MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Arquivos dos Fatores de Emissão.** 2016. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY. **Settlement of FY 2016 purchase prices and FY 2016 surcharge rates under the feed-in tariff scheme for renewable energy.** 2016. Disponível em: <http://www.meti.go.jp/english/press/2016/0318_03.html>. Acesso em: 31 maio 2016.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA/ EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Leilão de energia de reserva de 2014**. Participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos: visão geral. Brasília: EPE, 2014

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA/ EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: EPE, 2015.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA/ EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **2º Leilão de Energia de Reserva de 2015 - Participação dos empreendimentos solares fotovoltaicos**: visão geral. 2016.

MORAES, T. HOJE EM DIA. **Minas se firma como polo gerador de energia solar**. 2015 Disponível em: <<http://www.hojeemdia.com.br/noticias/economia-e-negocios/minas-se-firma-como-polo-gerador-de-energia-solar-1.345030>>. Acesso em: 29 out. 2015

OLIVEIRA, F. FOLHA DE SÃO PAULO. **Em 25 anos, consumidor vai gerar em casa energia equivalente a 6 Itaipus**. 2015. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/08/1673817-em-25-anos-consumidor-vai-gerar-em-casa-energia-equivalente-a-6-itaipus.shtml>>. Acesso em: 29 out. 2015.

OLIVEIRA, J. C. **Comissão aprova isenção tributária para incentivar o uso da energia solar**. 2016. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/MEIO-AMBIENTE/502468-COMISSAO-APROVA-ISENCAO-TRIBUTARIA-PARA-INCENTIVAR-O-USO-DA-ENERGIA-SOLAR.html>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

PAULSON, K. Update: Uni-solar Powers Largest Landfill Solar Cover in the world. Disponível em: <http://globenewswire.com/news-release/2011/10/06/458044/234327/en/UPDATE-UNI-SOLAR-R-Powers-Largest-Landfill-Solar-Cover-in-the-World.html>>. Acesso em: 09 dez. 2015.

PERERA, K. **Exposed geomembrane solar cover design**: a simplified approach to geomembrane anchor design & deployment. Wastecon 2011. Disponível em: <http://community.swana.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=9acb9521-076d-4a73-ba88-51da12646389>>. Acesso em: 08 dez. 2015.

PHOTON. **PHOTON-Newsletter**. 2015. Disponível em: <<http://photon.info/sites/default/files/documents/news/022965068.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2016.

PHOTON. **PHOTON inverter price index**. 2015. Disponível em: <<http://www.photon.info/newsletter/document/92078.pdf>>. Acesso em: 1º fev. 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 2014.

PINTO, J. T. M.; AMARAL, K. J.; JANISSEK, P. R. Deployment of photovoltaics in Brazil: scenarios, perspectives and policies for low-income housing. **Solar Energy**, v. 133, 2016, p. 73-84.

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo. Secretaria Municipal de Serviços. Departamento de Limpeza Urbana. **Conscientização da gestão dos resíduos sólidos no município de São Paulo**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/limpurb_1319723691.pdf>. Acesso em: 21 out. 2015.

POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. Georgia: School of Civil Engineering, 165p, 1985.

PORTAL BRASIL. **Aterros sanitários protegem ambiente de contaminação**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/aterros-sanitarios-protectem-meio-ambiente-de-contaminacao>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

PV Navigator. **California Landfill-based solar projects: evaluating a solar PV racking system**. 2013.

PVSYST. **User's guide PVsyst contextual help**. 2012. Disponível em: <<http://files.pvsyst.com/pvsyst5.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2016.

RAJARAM, V.; SIDDIQUI, F. Z.; KHAN, M. E. **From landfill gas to energy: technologies and challenges**. 1. ed. Leiden: CRC Press, 2011.

REPUBLIC SERVICES. **Landfill for solar energy**. Disponível em: <<http://site.republicservices.com/documents/republic-services-solar-energy-fact-sheet.pdf>>. Acesso em: 12 out 2015.

ROBERTS, M. G. **Hickory Ridge Landfill exposed geomembrane solar cap transforms a landfill into a commercial scale solar energy generation facility**. s.d. Disponível em: <<https://community.swana.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=216f6dde-28ec-4736-b783-e541e86a58e1>> Acesso em: 12 out. 2015.

RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, p. 1027-1030, 2011.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potencial for different sources of biogas in Brazil. **Biomass & Energy**, v. 33, p. 1101-1107, 2009.

SAMPSON, G et al. **Solar power installations on closed lanfills**: technical and regulatory considerations. 2009.

SANTOS, I. F. S. **Proposta de um método para motorização de aterros sanitários para fins de geração de energia elétrica**. 2015. 94f . Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

SCHULER, A. R. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado**. 2010. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SEI. Stockholm Environment Institute. **Driving Technological Innovation for a Low-Carbon Society. Case Studies for Solar Photovoltaics and Carbon Capture and Storage**. Research Report; 2012.

SILVA, T. R. **Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG**. 2012. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Rev. Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n. 2, 95-104, 2013.

SIMET, A. BIOMASS MAGAZINE. **Landfill gas ranks Coca-Cola third in EPA green power users**. 2012. Biomass Magazine. Disponível em: <<http://biomassmagazine.com/articles/7932/landfill-gas-ranks-coca-cola-third-in-epa-green-power-users>>. Acesso em: 12 out. 2015.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. **Waste Management**, v. 33, p. 420-430, 2013.

SMALLEY, J. **What is the best foundation for a ground-mount solar array?**. 2015. Disponível em: <<http://www.solarpowerworldonline.com/2015/08/what-is-the-best-foundation-for-a-ground-mount-solar-array/>>. Acesso em: 11 dez. 2015.

SNIS - Sistema Nacional de informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos, 2013**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2013/DiagRS2013_XLS.zip>. Acesso em: 17 dez. 2015.

SZABÓ, S. et al. A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1291-1300, 2017.

TANSEL, B. et al. **Closed Landfills as Power Parks**: technical and economic feasibility of solar energy harvesting at Florida's closed landfills. 2010.

TANSEL, B.; VARALA, P. K.; LONDONO, V. Solar energy harvesting at closed landfills: energy yield and wind loads on solar panels on top and side slopes. **Sustainable Cities and Society**, v. 8, p. 42-47, 2013.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, v. 32, p.1243–1257, 2007.

THEVENARD, D.; PELLAND, S. Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions. **Solar Energy**, v.91, p. 432-445, 2013.

THE WHITE HOUSE. **Nellis solar power system tour- Nellis Air Force Base Las Vegas NV**. 2009. Disponível em: <<https://www.whitehouse.gov/the-press-office/nellis-solar-power-system-tour-nellis-air-force-base-las-vegas-nv>>. Acesso em: 15 out. 2015.

TOLMASQUIM, M.T. (Org.). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 515p.

TOWNSEND et al. **Sustainable practices for landfill design and operation**. New York: Springer, 1. ed., 2015.

UNESP – Universidade Estadual Paulista. **Formas de disposição de resíduos: aterro sanitário**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res13.html>>. Acesso em: 21 out. 2015.

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

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill Gas**

Emission Model Version 3.02.User's Guide. USEPA, 2005. Disponível em:
<<http://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2015.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **RE-Powering America's Land Initiative: Project Tracking Matrix.** 2015a.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **LFGEnergy Project Development Handbook.** 2015b. Disponível em:
http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdf_full.pdf>. Acesso em: 26 out. 2015.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solid Waste: Laws and regulations.** 2015c. Disponível em:
<http://www3.epa.gov/region9/waste/solid/laws.html#3>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **RE-Powering America's Land:** siting renewable energy on potentially contaminated land and mine sites.Nellis Air Force Base, Nevada Success Story.A Bright future for Nellis Air Force Base. 2009a. Disponível em:

<http://www2.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/success_nellis_nv.pdf>. Acesso em: 15 out. 2015.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **RE-Powering America's Land:** siting renewable energy on potentially contaminated land and mine sites.Fort Cason, Colorado Success Story. 2MW solar array helps to achieve Fort Carson's renewable energy goals. 2009b. Disponível em:
<http://www2.epa.gov/sites/production/files/2015-04/documents/success_fortcarson_co.pdf>. Acesso em: 15 out. 2015.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the United States:** facts and figures for 2012. 2012a. Disponível em:
<http://www3.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/pubs/2012_msw_fs.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2015.

VAN ELK, A. G. H. P. **Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicados a resíduos sólidos:** redução de emissões nadisposição final. (Série mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos, 3), 39p, 2007.

VARALA, P.; TANSEL, B. Foundation design for installing solar harvesting systems on closed landfills. **Geo-Frontiers**, p. 420-429, 2011.

VILHENA, A. **Lixo Municipal:** manual de gerenciamento integrado. 2010. 3 ed. São Paulo.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 4. ed, vol. 1, 2014.

WILLUMSEN, H. **Number and types of landfill gas plants worldwide**. 2004. Disponível em:
<http://deponigas.dk/uploads/media/Number_and_Types_of_LFG_Plants_Worldwide.pdf>.
Acesso em: 01 dez. 2015.

WIRTH, H. **Recent facts about photovoltaics in Germany**. 2015. Disponível em:
<<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/veroeffentlichungen-pdf-dateien-en/studien-und-konzeptpapiere/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2016.

ANEXO A

Sumário das melhores práticas para instalação de projetos fotovoltaicos em aterros		
Fonte: Adaptado de USEPA & NREL (2013)		
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Projeto		
Declividades acentuadas	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidade da fundação/sistema de ancoragem • Altas cargas de vento • Gestão de águas pluviais • Aumento de erosão 	<ul style="list-style-type: none"> • Módulos fotovoltaicos mais leves • Sistemas de montagem com inclinação fixa • Sistemas de ancoragem mais robustos • Geomembrana integrada com sistema fotovoltaico • Nivelamento para minimizar inclinação
Composição dos resíduos e recalque	<ul style="list-style-type: none"> • Recalque diferencial • Acumulação de água • Gestão de águas pluviais • Desalinhamento dos conjuntos fotovoltaicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de previsão (prognóstico) na fase de projeto • Localização estratégica dos conjuntos fotovoltaicos PV (usar áreas mais antigas e áreas contendo resíduos de construção) • Módulos fotovoltaicos mais leves • Sistemas com inclinação fixa que podem acomodar uso futuro de calços para corrigir recalque diferencial • Sistemas de inclinação fixa com possibilidade de ajustes • Geomembrana integrada com sistema fotovoltaico • Compactação da cobertura /compactação do solo
Características da cobertura final	<ul style="list-style-type: none"> • Conformidades com os requerimentos de encerramento e pós-encerramento • Áreas com cobertura final pouco espessa • Compatibilidade com sistema de controle de águas pluviais 	<ul style="list-style-type: none"> • Importar material de preenchimento para aumentar espessura da cobertura • Sistemas de ancoragem leves ou não-invasivos • Sistemas de montagem com inclinação fixa • Geomembrana integrada com sistema fotovoltaico • Projeto estratégico de conjuntos fotovoltaicos para acomodar sistema de gestão de águas pluviais • Uso de calhas de chuva nos conjuntos fotovoltaicos para canalizar o escoamento de águas pluviais

Sumário das melhores práticas para instalação de projetos fotovoltaicos em aterros		
Fonte: Adaptado de USEPA & NREL (2013)		
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Projeto		
Gestão de águas pluviais	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilidade com sistema de gestão de águas pluviais atual • Garantir devido escoamento de águas pluviais para evitar erosão 	<ul style="list-style-type: none"> • Geomembrana integrada com sistema fotovoltaico • Projeto estratégico de conjuntos fotovoltaicos para acomodar sistema de gestão de águas pluviais • Uso de calhas de chuva nos conjuntos fotovoltaicos para canalizar o escoamento de águas pluviais para valas e lagoas de retenção
Carga de vento	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir que o sistema fotovoltaico irá suportar cargas de vento características do local 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar a altura do conjunto • Utilizar sistemas de ancoragem mais robustos • Geomembrana integrada com sistema fotovoltaico
Gerenciamento do material de cobertura	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir consistência com o plano de gestão pós-encerramento • Acesso à cobertura para manutenções 	<ul style="list-style-type: none"> • Permitir distância adequada entre fileiras de conjuntos fotovoltaicos para garantir acesso de equipamentos de manutenção • Aumentar altura do conjunto, se necessário, para garantir acesso ao material de cobertura abaixo dos conjuntos fotovoltaicos
Segurança do local	<ul style="list-style-type: none"> • Prevenir a entrada sem autorização ao sistema fotovoltaico • Proteger contra roubo e vandalismo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cercamento do perímetro • Câmeras de segurança • Iluminação de segurança com sensores de movimento
Integração com sistemas de monitoramento/coleta de gás de aterro, águas pluviais e chorume	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir a compatibilidade do sistema fotovoltaico com os sistemas do gás de aterro, águas pluviais e chorume • Assegurar que o peso do sistema fotovoltaico é compatível com a capacidade de suporte das tubulações de gás de aterro e lixiviados 	<ul style="list-style-type: none"> • Layout estratégico dos sistemas fotovoltaicos com recuos dos sistemas de gás, águas pluviais e chorume • Evitar o uso de equipamentos pesados sobre estes sistemas • Sistemas fotovoltaicos leves • Explorar oportunidades de operar um sistema híbrido utilizando a unidade de geração a partir do gás de aterro e do sistema fotovoltaico
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Construção		
<ul style="list-style-type: none"> • Preparação do local e requerimentos de nivelamento e restrições 	<ul style="list-style-type: none"> • Conformidade com os requisitos de encerramento e pós-encerramento • Garantir conformidade com o projeto de engenharia e 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar se os requisitos regulatórios permitem terraplanagem e obter aprovações necessárias para quaisquer modificações

Sumário das melhores práticas para instalação de projetos fotovoltaicos em aterros		
Fonte: Adaptado de USEPA & NREL (2013)		
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Construção		
	<p>especificações da cobertura do aterro com o plano de gestão do aterro após o encerramento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar penetração da cobertura do aterro 	<ul style="list-style-type: none"> • Trazer material de enchimento, se necessário, para garantir que as características da cobertura estejam em conformidade com os requisitos de cobertura do aterro • Revegetar a cobertura do aterro se a vegetação foi removida durante o processo de terraplanagem; explorar oportunidades para vegetação de baixo crescimento usando espécies nativas • Projeto de sistema de cobertura final alternativa pode requerer aprovação especial de órgão ambiental
Compactação do local	<ul style="list-style-type: none"> • Prevenir ou minimizar recalque diferencial 	<ul style="list-style-type: none"> • Trazer material de enchimento e usar equipamento de compactação do solo para estabilizar e compactar o material, ou determinar um período de recalque do material de enchimento importado de outra área.
Penetração da cobertura final	<ul style="list-style-type: none"> • Conformidade com requisitos determinados da cobertura final • Evitar penetração da cobertura final 	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar se os requisitos regulatórios permitem penetrações e obter aprovações necessárias para quaisquer modificações • Evitar ou minimizar penetração da cobertura final • Projetar sistemas de isolamento para áreas em torno de quaisquer penetrações na cobertura final para evitar a criação de caminhos preferenciais para metano e outros gases • Usar sistemas de montagens de inclinação fixa com sistemas de ancoragem sem penetração ou com penetração mínima • Projeto de sistema de cobertura final alternativa pode requerer aprovação especial de órgão ambiental
Evitar atingir equipamentos de monitoramento e tubulações do gás de aterro e equipamentos de coleta	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar sistemas relacionados ao gás de aterro, águas pluviais e chorume 	<ul style="list-style-type: none"> • Instalação de cercas temporárias ao redor dos sistemas de gás de aterro, águas pluviais e chorume para prevenir contato com

Sumário das melhores práticas para instalação de projetos fotovoltaicos em aterros		
Fonte: Adaptado de USEPA & NREL (2013)		
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Construção		
de águas pluviais e chorume		equipamentos de construção <ul style="list-style-type: none"> Garantir que áreas de circulação de veículos estejam devidamente afastadas dos equipamentos relacionados aos sistemas supracitados, e que veículos permaneçam nos caminhos designados
Controle de poeira	<ul style="list-style-type: none"> Minimizar geração de poeira durante o processo de construção 	<ul style="list-style-type: none"> Usar caminhões pipa para umidificar o solo durante a construção Garantir que os caminhões pipa não sejam muito pesados para a capacidade de suporte do aterro e sistemas de tubulação do gás de aterro e de lixiviados
Gestão de águas pluviais	<ul style="list-style-type: none"> Garantir que o sistema de gestão de águas pluviais não seja impactado ou alterado durante a fase de construção 	<ul style="list-style-type: none"> Obter permissões que venham a ser necessárias anteriormente à construção Minimizar perturbações ao sistema de gestão de águas pluviais durante a construção Se o sistema de gestão de águas pluviais é alterado durante a fase de construção, garantir que o sistema seja corrigido e esteja de acordo com requisitos de engenharia e projeto no plano de gestão pós-encerramento
Segurança do local	<ul style="list-style-type: none"> Evitar acesso não autorizado ao local de construção Proteger contra roubo e vandalismo 	<ul style="list-style-type: none"> Instalar cercas permanentes no perímetro anteriormente à construção Considerar o uso de locais de armazenamento temporário que possam ser trancados para garantir que módulos e outros equipamentos sejam mantidos em segurança Considerar a contratação de serviços de segurança
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Operação e Manutenção		
Conformidade com os planos de operação pós-encerramento, de manutenção e de monitoramento	<ul style="list-style-type: none"> Garantir a observância aos planos de pós-encerramento 	<ul style="list-style-type: none"> Considerar a combinação das inspeções de manutenção do aterro e do sistema fotovoltaico de modo a obter eficiências operacional e de custo Usar o sistema de monitoramento e análise do

Sumário das melhores práticas para instalação de projetos fotovoltaicos em aterros		
Fonte: Adaptado de USEPA & NREL (2013)		
Considerações técnicas	Desafios	Melhores práticas
Operação e Manutenção		
		sistema fotovoltaico para identificar problemas potenciais com recalque no aterro
Lavagem dos módulos e plano de gestão de águas pluviais ou limpeza natural	<ul style="list-style-type: none"> • Limpar os módulos para remover poeiras para maximizar a produção dos sistema fotovoltaico 	<ul style="list-style-type: none"> • Considerar limpeza natural por ação das chuvas • Evitar o uso de produtos químicos de limpeza para aplicações em aterros • Se a lavagem com água é usada e não há água disponível no local, garantir que caminhões pipa não sejam tão pesados para a capacidade de suporte do aterro
Gestão de águas pluviais	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir funcionamento de longo prazo para os sistemas de gestão de águas pluviais 	<ul style="list-style-type: none"> • Conduzir manutenção de rotina para a cobertura do aterro e dos materiais da cobertura do mesmo • Conduzir manutenção preventiva no sistema de gestão de águas pluviais e em equipamentos mecânicos • Conduzir manutenção corretiva (isto é, reparos devidos à erosão e em taludes, e reparos em equipamentos mecânicos)
Gestão do material de cobertura	<ul style="list-style-type: none"> • Assegurar funcionalidade de longo prazo da cobertura do aterro e/ou cobertura vegetativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Conduzir manutenção de rotina da cobertura do aterro (isto é, corte da grama, controle de erva daninha) • Conduzir inspeções periódicas da cobertura do aterro para identificar rachaduras e fissuras no material de cobertura, erosão ou formação de canais pelo escoamento de águas pluviais, ou ocorrência de recalque diferencial • Realizar reparos na cobertura do aterro quando problemas forem identificados
Monitoramento do sistema e solução de problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Assegurar o desempenho ideal do sistema fotovoltaico 	<ul style="list-style-type: none"> • Usar sistema de monitoramento remoto em conjunto com estação meteorológica do local para identificar anomalias no desempenho do sistema e para solucionar e isolar potenciais problemas no sistema fotovoltaico