



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS
RENOVÁVEIS**



DAYSE PEREIRA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE ENERGÉTICA DOS PROCESSOS DO ATERRO
SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA/PB**

JOÃO PESSOA - PB

2020

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO /

DAYSE PEREIRA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE ENERGÉTICA DOS PROCESSOS DO ATERRO SANITÁRIO
METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA/PB**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Profª PhD Monica Carvalho

Coorientador

Prof. PhD Ricardo Chacartegui.

JOÃO PESSOA – PB

2020

N244a Nascimento, Dayse Pereira do.

Análise energética dos processos do aterro sanitário
metropolitano de João Pessoa/PB / Dayse Pereira do
Nascimento. - João Pessoa, 2020.

89 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.

Coorientação: Ricardo Chacartegui.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Biogás. 2. Resíduos sólidos urbanos. 3. Cogeração.
4. Aterro sanitário. 5. Geração de eletricidade. 6.
Fontes renováveis. I. Carvalho, Monica. II.
Chacartegui, Ricardo. III. Título.

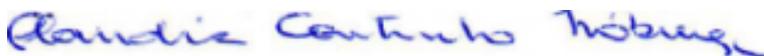
UFPB/BC

CDU 662.767.2(043)

DAYSE PEREIRA DO NASCIMENTO**ANÁLISE ENERGÉTICA DOS PROCESSOS DO ATERRO SANITÁRIO
METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA/PB**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 07/07/2020



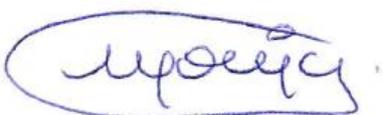
Prof^a Dr^a Cláudia Coutinho Nóbrega

UFPB



Prof. Raphael Abrahão, PhD

UFPB



Orientadora: Prof^a Monica Carvalho, PhD

UFPB



Coorientador externo: Prof. Ricardo Chacartegui, PhD

(*Universidad de Sevilla*)

JOÃO PESSOA – PB

2020

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu filho Gabriel Henrique.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu esposo, Diego Henrique Jorge Cavalcanti, que nunca me deixou desistir, mesmo nos momentos mais difíceis. Por todo incentivo, paciência, colaboração e compreensão em todas as etapas.

Ao meu filho, Gabriel Henrique Pereira Cavalcanti, por todos os momentos que deixei de estar com ele para me dedicar ao mestrado. E mesmo assim, recebia-me com a frase: “Mamãe estava com saudades”

A minha mãe, Judite Pereira, por tê-la como exemplo de mulher que conseguiu vencer a pobreza, estudar e hoje possuir duas graduações. E por sempre me incentivar a seguir nos caminhos acadêmicos, sem ela nada disso seria possível.

Aos meus sogros Almira Jorge do Espírito Santo Cavalcanti e Eraldo de Almeida Cavalcanti Junior por todo incentivo, paciência e compreensão.

Aos meus irmãos Gilka Pereira e Marcelo Pereira de Santana, meus sobrinhos que de maneira direta e indireta contribuíram com esta conquista.

A Prof.^a PhD Mônica Carvalho, pelas horas dedicadas na minha orientação, colaboração, conhecimento e todo incentivo para que este trabalho fosse realizado.

Ao Prof^o PhD Ricardo Chacartegui, pelas contribuições.

A Prof.^a Dr.^a Claudia Coutinho Nóbrega, pelas contribuições como membro da pré-banca e pelas visitas ao Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.

Ao Prof. Dr Raphael Abrahão, pelas contribuições e ensinamentos como membro da pré-banca.

As minhas amigas de curso Mayara e Susane, por todas as contribuições para a dissertação e por todo companheirismo presente em todas as horas.

Aos meus colegas de curso Monijany, Cleiton, Michel, pelo companheirismo, amizade em todos os momentos de alegria e sofrimento que passamos juntos.

E a todos que de alguma forma contribuíram para que esta etapa pudesse ser concluída, o meu muito obrigada!

À CAPES, pelo suporte financeiro dado à realização deste trabalho.

RESUMO

A sociedade atual busca caminhos para chegar a uma sociedade sustentável, na qual tenha um crescimento econômico aliado à conservação ambiental. Uma das maiores problemáticas enfrentadas pelas prefeituras brasileiras é adotar políticas de gerenciamento adequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU), a fim de evitar a proliferação de doenças e a contaminação ambiental. A Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, (Lei nº12.305/2010), determina que os RSU devem ser encaminhados ao aterro sanitário, sendo possíveis fontes de energia. A cidade de João Pessoa/PB destina seus RSU ao Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), onde é feita a queima do biogás coletado no aterro (sem aproveitamento). O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema de captura de biogás para geração de energia elétrica no ASMJP. Para isso, foram coletados os dados de RSU depositados no ASMJP, para assim, aplicar métodos que quantifiquem a geração de biogás no aterro. Três métodos foram aplicados: USEPA, IPCC e GasSim; o método GasSim, desenvolvido pela agência ambiental do Reino Unido foi o método mais refinado e, portanto, foi o escolhido para a estimativa da produção de biogás. Foram formulados três cenários para geração de biogás no ASMJP (mais provável, otimista e pessimista), para futuras análises de sensibilidade. Foi observado que o ASMJP possui uma geração de biogás considerável, chegando a gerar 11.277,28 t/ano no seu pico de produção que ocorrer no ano de encerramento das suas atividades (2028). O potencial de geração do biogás pode ser otimizado, caso ocorra uma melhor separação do RSU depositado no referido ASMJP (aumentando a proporção de matéria orgânica) e ainda assim, aumentar a vida útil do aterro. Motores Jenbacher e Caterpillar foram selecionados para análise mais detalhada, em virtude da disponibilidade *online* de manuais dos fabricantes. Após estabelecer as restrições de produção e operação dos motores, foi selecionado o motor Jenbacher 620 GS-BL (F21) devido maior produção de eletricidade ao longo da sua vida útil. Com a escolha do motor foi idealizado uma planta de cogeração, que a partir de 2019 o valor dos gatos reduz significativamente devido a amortização dos equipamentos. Após 16 anos de operação, a planta de cogeração passar a dar lucros, ao final da vida útil do aterro, a soma total dos resultados líquidos anuais é de pouco mais de R\$ 29 milhões positivos.

Palavras chave: Biogás. Resíduos sólidos urbanos. Cogeração. Aterro Sanitário. Geração de Eletricidade. Fontes Renováveis

ABSTRACT

The current society is looking for ways to reach a sustainable society, in which economic growth is combined with environmental conservation. One of the biggest problems faced by Brazilian municipalities is to adopt policies for the adequate management of Urban Solid Waste (USW) in order to avoid the proliferation of diseases and environmental contamination. The National Policy on Solid Waste (Law No. 12.305/2010) in Brazil determines that USW should be sent to the landfill, and possible sources of energy. The city of João Pessoa / PB destines its USW to the Metropolitan Sanitary Landfill of João Pessoa (ASMJP), where the biogas collected in the landfill is currently being burned (no use). The objective of this work is to verify the technical and economic viability of the implementation of a biogas capture system for electric power generation in ASMJP. For this, the USW data deposited in the ASMJP were collected, in order to apply methods that quantify the biogas generation in the landfill. Three methods were applied: USEPA, IPCC and GasSim; the GasSim method developed by the UK environmental agency was the most refined method and therefore was chosen for the estimation of biogas production. Three scenarios for biogas generation in the ASMJP (more likely, optimistic and pessimistic) were formulated for future sensitivity analyzes. It was observed that the ASMJP has a considerable biogas generation, generating 11277,28 t/year in its peak production that occurs in the year of its activities (2028). The biogas generation potential can be optimized if a better separation of the USW deposited in the ASMJP (increasing the proportion of organic matter) and still increase the life of the landfill occurs. Jenbacher and Caterpillar engines were selected for further analysis because of the availability of manufacturer's manuals online. After setting the engine production and operating restrictions, the Jenbacher 620 GS-BL (F21) engine was selected due to higher electricity production, which could reach 21313080,00 kWh over its life cycle. With the choice of the engine was designed a cogeneration plant, which from 2019 the value of cats reduces significantly due to the equipment amortization. After 16 years of operation, the cogeneration plant starts to make a profit, at the end of the life of the landfill the total sum of annual net results is a little over R\$ 29 million positive.

Keywords: Energy analysis. Landfill. Urban Solid Waste. Cogeneration. Landfill. Electricity Generation. Renewable sources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quantidade de resíduos sólidos urbanos geração na região Nordeste.....	18
Figura 3 - Célula em operação ASMJP	24
Figura 2 - Balança de pesagem do ASMJP	24
Figura 4 - Célula encerrada no ASMJP.....	25
Figura 5 - Estação de tratamento do Biogás ASMJP	25
Figura 6 - Estação de tratamento do chorume ASMJP.....	26
Figura 7 - Produção dos componentes do biogás e suas fases de geração.	27
Figura 8 - Fluxograma para decidir qual método do IPCC utilizar para estimar as emissões de CH ₄ em aterro sanitário de RSU.	39
Figura 9 - Geração anual de biogás, de acordo com os modelos USEPA, para o aterro sanitário metropolitano de João Pessoa.	61
Figura 10 - Emissão e geração anual de CH ₄ , através de método simples e método DPO respectivamente. Para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.	64
Figura 11 - Biogás gerado em três cenários utilizando-se o método GasSim, para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/ PB.	73
Figura 12- Produção de eletricidade em diferentes motores, a partir da produção de biogás estimada no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.	75
Figura 13 - Produção anual de eletricidade do motor Jenbacher JMS 620 GS-F21, instalado no ASMJP.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Gravimétrica média dos Resíduos Sólidos Domiciliares no Brasil.	20
Tabela 2 - Categorias utilizadas na caracterização dos resíduos sólidos de João Pessoa..	23
Tabela 3 - Composição típica de biogás de aterro de RSU.	28
Tabela 4 - Eficiência do sistema de controle.	37
Tabela 5 - Dados padrões para o fator de correção do metano (FCM).	42
Tabela 6 - Incertezas associadas aos parâmetros pré-definidos do IPCC.....	45
Tabela 7 - Velocidade de degradação em função da tipologia do resíduo.	46
Tabela 8 - Constante de degradação.	47
Tabela 9 - Parâmetros utilizados no modelo GasSim.....	50
Tabela 10 - Fração molar dos componentes químicos do biogás	51
Tabela 11 - Entalpia de formação.	52
Tabela 12- Características dos motores Jeanbacher (JMS) e Caterpillar (série G e GG) pesquisados.....	53
Tabela 13 - Temperaturas médias mensais históricas para João Pessoa (CLIMATICUS 4.2, 2005).....	56
Tabela 14 - Resíduos sólidos urbanos recebidos pelo aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/PB, por município, entre 2003 e 2015.....	59
Tabela 15 - Geração anual de CH ₄ e CO ₂ , segundo o modelo USEPA para aterros não- controlados, para o caso de João Pessoa/PB.....	60
Tabela 16 - Geração anual de CH ₄ e CO ₂ , segundo o modelo USEPA para aterros controlados, para o caso de João Pessoa/PB.....	60
Tabela 17 - Taxas de geração de CH ₄ para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB, modelo USEPA.....	61
Tabela 18 - Quantidade de CH ₄ emitido, através do método simples do IPCC, para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.	62
Tabela 19 - Quantidade de CH ₄ gerado, através do método DPO do IPCC, para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.....	63
Tabela 20 - Geração de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB....	66
Tabela 21 - Cenário otimista para geração de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.....	68

Tabela 22 - Cenário pessimista de geração de biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.	70
Tabela 23 - Energia disponível produzida anualmente no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.	74
Tabela 24- Funcionamento do motor JENBACHER JMS 620 GS-F21.	76
Tabela 25 - Especificações técnicas do motor Jenbacher 620 J GS (GE POWER, 2016).	78
Tabela 26 - Quantificação do calor útil para tratamento de lixiviado.	78
Tabela 27 - Calor cogeração pelo motor Jenbacher 620 J GS-C21 de acordo com a produção de biogás no ASMJP.....	79
Tabela 28 - Gastos anuais associados com a planta de cogeração.	80
Tabela 29 - Balanço econômico para o sistema de cogeração.	81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	17
3.2 ATERRO SANITÁRIO.....	20
3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE JOÃO PESSOA	22
3.4 BIOGÁS DE ATERRO	26
3.5 USOS DO BIOGÁS DE ATERRO	29
3.5.1 Geração de Eletricidade.....	29
3.5.2 Uso direto do biogás gerado em aterro sanitário	30
3.6 BENEFÍCIOS DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DE ATERRO	31
3.6.1 Benefícios ambientais do aproveitamento do biogás de aterro.	31
3.6.2 Benefícios econômicos associados ao aproveitamento do biogás de aterro.....	32
4. METODOLOGIA.....	34
4.1 MODELO LANDGEM (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA).	35
4.1.1 Estimativa de emissões de gases não controlados.....	35
4.1.2 Estimativa de emissões de gases controlados.....	37
4.2. MÉTODO DO GRUPO INTERGOVERNAMENTAL PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE).	38
4.2.1 Métodos simples para estimativa de geração de CH ₄	39
4.2.2 Método DPO para estimativa de geração de CH ₄	41
4.3 MODELO GasSim	45
4.3.1 Taxa de geração de metano (K).....	49
4.3.2 Carbono orgânico degradável COD (X).....	49

4.4 GERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR.....	50
4.4.1 Cálculo da energia contida no biogás	51
4.4.2 Análise dos motores a biogás	53
4.4.3 Determinação do calor útil de acordo com o meio transmissor de calor.....	54
4.4.4 viabilidade econômica para planta de cogeração.	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	59
5.2 EMISSÕES ANUAIS, MÉTODO USEPA.....	59
5.3 EMISSÕES ANUAIS, MÉTODO IPCC.....	62
5.4 EMISSÕES ANUAIS, MÉTODO GasSim.....	65
5.5 ENERGIA DISPONÍVEL ANUALMENTE NO ATERRO.....	73
5.6 MOTOR A BIOGÁS E PLANTA DE COGERAÇÃO	76
6. CONCLUSÕES	84
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o adensamento da população em ambientes urbanos proporcionam uma facilidade no acesso a bens e serviços de melhor qualidade, mas em contrapartida aumenta também o volume de resíduos sólidos gerados nas cidades urbanizadas, intensificado a problemática enfrentada pelas prefeituras, em dispor os seus rejeitos de forma adequada. O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos tem como objetivo principal a qualidade de vida da sociedade, dependendo basicamente de políticas públicas que tenham em seu escopo aspectos legais, financeiros, sociais e ambientais.

O aterro sanitário é o destino mais comum para a eliminação de resíduos sólidos gerados nas cidades (KOMILIS *et al.*, 1999). Os aterros continuam a ser muito atraentes, porque são a alternativa mais barata para os produtos de gestão de resíduos urbanos e para os utilizadores finais (EL-FADEL *et al.*, 1997; RENOU *et al.*, 2008).

Apesar de ser um bem econômico, esta prática pode causar diferentes impactos ambientais negativos. Depois que os resíduos sólidos são depositados no aterro, iniciam-se processos bioquímicos e físicos complexos, levando à produção de emissões líquidas e gasosas. Produz-se lixiviado, que contém componentes solúveis e produtos de degradação dos resíduos. O dióxido de carbono, o metano e outros gases de efeito estufa são gerados durante a estabilização da fração orgânica de resíduos sólidos, e os componentes voláteis tendem a ser emitidos na atmosfera (AL-JARRAH; ABU-QDAIS, 2006). Desta forma, as principais preocupações relacionadas aos aterros são os riscos à saúde, danos à vegetação, odores desagradáveis, aterros sanitários, incêndios e explosões, poluição das águas subterrâneas, poluição do ar e aquecimento global.

Em relação ao aquecimento global, o IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) citou a recuperação de metano de aterro sanitário (CH₄) como uma das principais tecnologias e práticas de mitigação disponíveis comercialmente no setor de gestão de resíduos. A colheita de gás de aterro (biogás, que é majoritariamente constituído por metano) é uma importante estratégia de gestão de resíduos, uma vez que o metano é um gás componente do efeito de estufa com maior potencial de aquecimento global do que o dióxido de carbono. O biogás é produzido pela decomposição de biomassa (materiais orgânicos) em aterros e é considerado uma valiosa fonte de energia renovável. Contribuindo para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e fontes não renováveis, diversificando a matriz energética brasileira, contribuindo para a sustentabilidade da matriz energética.

Os diferentes usos do biogás incluem caldeiras (JAFFRIN et al, 2003), aplicações térmicas diretas (EPA, 2008a; EPA, 2008b) (fornos, secadores de lodo, etc), evaporação de lixiviados (SANPHOTI et al, 2006), geração de eletricidade com motores a gás (ROMERO, et al, 2013; CARESANA, et al, 2011) ou com células de combustível para cozinhar (Olmedo, *et al*, 2014) ou como combustível para veículos (NADALETTI, et al, 2015; BÖRJESSION, et al, 2008).

Assim sendo, este trabalho teve como motivação quantificar o biogás gerado no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, para a partir deste, apontar o melhor motor comercialmente disponível no mercado, para fazer a conversão energética e contabilizar os custos para funcionamento da planta de cogeração.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é verificar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema de captura de biogás para geração de energia elétrica no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Obter, tratar e interpretar informações sobre os resíduos sólidos depositados no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.
- Quantificar o biogás gerado no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa por meio de metodologias consolidadas.
- Analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de biogás gerado no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa para geração de energia elétrica.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) Lei nº 12.305/2010, em seu art. 3º, inciso XVI entende-se como resíduos sólidos todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, propõe-se 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 (BRASIL, 2010).

A Norma Brasileira 10004 (ABNT, 2004) estabelece como definição de resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos, cujas particularidades tornem inviáveis seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível (PARAÍBA, 2014).

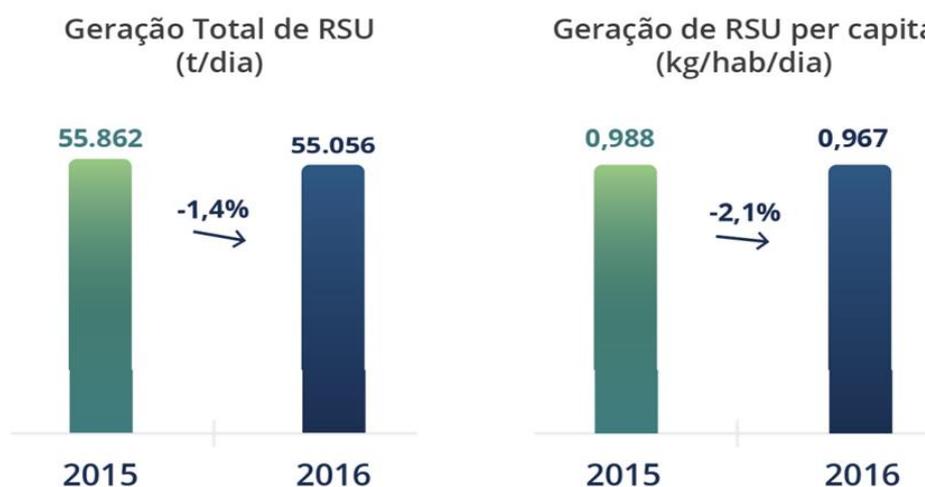
Na literatura existe outras formas de classificação dos resíduos sólidos, distintas da ABNT, dentre as quais se destaca a classificação quanto a origem do resíduo. O resíduo doméstico ou residencial é originado da vida diária das residências. Normalmente constituídos por restos de alimentos (cascas de frutas, verduras etc.), produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens. Contém, ainda, alguns resíduos que podem ser tóxicos (PARAÍBA, 2014).

O conceito de gestão ambiental consiste em administrar de forma harmoniosa os recursos existentes em uma região ou ambiente, para assim, satisfazer as necessidades humanas, mantendo a qualidade de vida e a disponibilidade dos recursos naturais para as futuras gerações (ZUQUETTE, 1993).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2017) a região Nordeste gerou, em 2016, a quantidade de 55.056 toneladas/dia de RSU, das quais 79% foram coletadas. Esse volume tende a crescer nos

próximos anos, devido ao crescente consumo de produtos industrializados nas cidades. A Figura 1 mostra a geração de resíduos sólidos urbanos e o comportamento da geração de RSU ambos na região Nordeste.

Figura 1 – Quantidade de resíduos sólidos urbanos geração na região Nordeste.



Fonte: ABRELPE, 2016.

No Brasil, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010, a qual trata da disposição final dos resíduos sólidos, conforme o Art. 4º, capítulo I das disposições gerais da Lei nº 12.305:

A Política Nacional de Resíduos Sólidos reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. (BRASIL, 2010.)

A PNRS prevê que a responsabilidade compartilhada será implantada de forma individual e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Os Resíduos Sólidos Urbanos em conjunto com o serviço público de limpeza urbana são coletados e encaminhados para disposição final no Aterro Sanitário Metropolitano. Por conta do ainda precário sistema de coleta seletiva, muitos materiais com potencial de ser reciclado são aterrados sem o devido tratamento. Isso resulta na diminuição da vida útil do aterro, sem contar que prejudica toda

a cadeia de reciclagem, interferindo na atividade dos catadores (PREFEITURA MUNICIPAL DE JOÃO PESSOA, 2014).

Segundo o Plano de Regionalização da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Estado da Paraíba (2017), as ações de planejamento e gestão no manejo dos resíduos sólidos urbanos têm como objetivo geral o cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos regulamentada pelo Decreto Nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010, relativo aos resíduos urbanos, destacando-se:

- Ampliação da participação da sociedade na gestão dos resíduos sólidos urbanos;
- Participação formal dos catadores na modelagem socioeconômica;
- Introdução e consolidação de processos tecnológicos viáveis e assimiláveis pelos municípios;
- Criação de condições e subsídios para a sustentabilidade ambiental e econômica financeira dos sistemas; redução dos riscos de impacto sobre a sociedade e meio ambiente e mitigação dos existentes, por meio do manejo adequado dos resíduos sólidos urbanos e seus efluentes;
- Articulação dos estudos e projetos das ações estruturais com o Plano de Saneamento Ambiental e/ou Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos, quando existentes. (POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, DECRETO Nº 7.404, 23/12/2010)

O descarte indevido dos RSU é uma fonte de poluição ambiental, que polui o ar, o solo e os corpos hídricos. O gerenciamento desses resíduos tem como objetivo principal a qualidade de vida da sociedade, dependendo basicamente de políticas públicas que tenham em seu escopo, aspectos legais, financeiros, sociais e ambientais. A disposição final dos RSU produz emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, com o aumento da população e do grau de urbanização, torna-se clara a necessidade de um correto gerenciamento da disposição final de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2016). A disposição final mais adequada para os RSU é dispor em aterro sanitário, podendo este ser considerado como um reator biológico, onde as principais entradas são RSU e água, e as principais saídas são os gases e o chorume (BRASIL, 2016).

Segundo Martins (2017), a composição gravimétrica dos resíduos especifica as contribuições de cada tipo de resíduo sólido, bem como o peso relativo de cada uma das frações. Esta especificação permite conhecer as características gerais dos resíduos e seu comportamento quando submetidos a determinado tratamento, valorização ou deposição em aterros sanitários (MARTINS, 2017). A composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil permite, portanto, visualizar de um modo geral a participação de diferentes materiais, porém esta composição varia muito por estados, uma vez que está

diretamente relacionada aos hábitos, economia, consumo e descarte da população local (ABRELPE, 2011).

A Tabela 1 mostra os dados da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares no Brasil, segundo a Abrelpe (2011).

Tabela 1 - Composição Gravimétrica média dos Resíduos Sólidos Domiciliares no Brasil.

COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA MÉDIA DOS RDO DO BRASIL		
MATERIAL	PARTICIPAÇÃO (%)	QUANTIDADE (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, Papelão e Tetra Pak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria Orgânica	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251
TOTAL	100,0	55.534.440

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2011.

3.2 ATERRO SANITÁRIO

Segundo a norma NBR 8.419 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1984), aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à 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 e em intervalos menores, se necessário. (PARAÍBA, 2014).

Para Aterro Sanitário de Pequeno Porte, prevê-se a projeção da população e de resíduos sólidos para um horizonte de 30 anos, de modo a garantir um período de vida útil, capaz de garantir sustentabilidade econômica em prol dos investimentos e gastos operacionais envolvidos na utilização da tecnologia. Como envolve mais aspectos de proteção ao meio ambiente, visando diminuir os impactos ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos, o Aterro Sanitário Convencional é indicado para faixas populacionais maiores, cujo volume de produção seja grande e cuja emergência por uma alternativa adequada para resolução da disposição final adequada, seja mais evidente (PARAÍBA, 2014).

O detalhamento do projeto executivo para a implementação de um Aterro Sanitário Convencional deverá contemplar os seguintes aspectos:

- Estudo de seleção de área;
- Estudo de viabilidade do empreendimento;
- Projeto de infraestrutura de acesso e circulação;
- Projeto geométrico de conformação das células de resíduos com seus respectivos sistemas de drenagem de biogás, percolados e áreas superficiais;
- Projeto de exploração de jazidas de solos para material de cobertura;
- Projeto de áreas de descarte de solo excedente;
- Projeto de operação diária/mensal do aterro sanitário, definindo-se coberturas temporárias e definitivas nas células acabadas;
- Projeto de sistemas de tratamentos do lixiviado;
- Projeto de recuperação e/ou queima de biogás;
- Projeto de monitoramento geométrico e ambiental;
- Projeto de obras complementares, incluindo edificações (escritório, refeitório, vestiário etc.), balança, cercas, defensas e guaritas;
- Licenciamento ambiental;
- Aquisição de equipamentos.

Segundo Tarazona (2010), a utilização do aterro sanitário tem como objetivo não poluir ou degradar o meio ambiente, evitando assim, a contaminação das águas superficiais, águas subterrâneas e controlando as emissões dos gases emitidos à atmosfera, reduzindo os impactos ambientais e à saúde pública.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos Lei nº12.305/2010 (Brasil, 2010), a partir das definições de resíduos sólidos, rejeitos, destinação final e disposição final, a PNRS deixa claro que os novos sistemas a serem implantados deverão respeitar uma ordenação básica de processos até o descarte final dos rejeitos. Esta ordenação básica pode ser descrita da seguinte maneira: os resíduos deverão ser reaproveitados e/ou tratados e, caso não possam ser aproveitados, deverão ser dispostos em aterros sanitários juntamente com rejeitos, para assim aumentar a vida útil dos aterros e diminuir a extração de matéria prima para produção de novos produtos.

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE JOÃO PESSOA

No município de João Pessoa, por mais de 40 anos, os RSU tiveram como disposição final o lixão do Roger, em uma área de 17 hectares, localizado no centro da cidade, cravado no meio do mangue. Após o fechamento do lixão em 2003, a área vem passando por um processo de recuperação ambiental, sendo constantemente monitorado e acompanhado tecnicamente para evitar possíveis impactos (EMLUR, 2014).

A cidade de João Pessoa possui coleta diária dos resíduos sólidos urbanos e públicos gerados pela população, no entanto, a Autarquia Especial de Limpeza Urbana (EMLUR) é o órgão responsável pela limpeza, dispondo de pessoal qualificado, patrimônio e receitas próprias, autonomia financeira, administrativa e técnica (EMLUR, 2014). Todo esse resíduo é destinado ao Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), sendo operado por uma concessionária e atendendo cinco municípios (João Pessoa, Cabedelo, Bayeux, Santa Rita, Lucena, Conde) que fazem parte do consórcio intermunicipal. O município de Lucena nunca depositou seus resíduos no ASMJP, utilizando lixão para destinação final dos seus resíduos.

Existem, também, sete núcleos de coleta seletiva nos bairros de Cabo Branco, Bessa, Bairro dos Estados, Jardim Cidade Universitária, Mangabeira, Roger e a Central de triagem. Na cidade, também funciona o projeto desenvolvido pela EMLUR o chamado Acordo Verde, que atende bairros da Zona Sul (Água Fria, Anatólia, Bancários, Castelo Branco, Cidade dos Colibris, Jardim Cidade Universitária, Jardim São Paulo, José Américo e Mangabeira). Nele, o morador faz um acordo simbólico onde entra com a separação do lixo e a prefeitura com a coleta porta a porta, feita pelos agentes ambientais, antigos catadores informais. Já no ASMJP funciona uma associação composta por antigos catadores do Lixão do Roger, que fazem uma triagem dos resíduos que chegam ao aterro dos bairros onde não possuem coleta seletiva (EMLUR, 2016).

Para o município de João Pessoa, desde 1998, seis caracterizações foram realizadas para seus resíduos sólidos (1998, 2001, 2003, 2006, 2011 e 2016); a caracterização mais recente foi feita pela EMLUR. (MARTINS, 2017), utilizando a metodologia francesa MODECOM, que especifica a composição do resíduo sólido e estima a porcentagem dos componentes potencialmente recuperáveis.

A Tabela 2 mostra as categorias utilizadas na caracterização dos resíduos sólidos de João Pessoa.

Tabela 2 - Categorias utilizadas na caracterização dos resíduos sólidos de João Pessoa.

CATEGORIAS	COMPONENTE
Resíduo Verde	Poda em Geral
Fração Orgânica	Restos de Alimentos e de Preparo
Papel	Jornal, Revistas, Papeis em Geral
Papelão	Caixas, Embalagens, entre outros
Plástico	Sacola, PET, Descartáveis e Embalagens
Vidro	Vidrarias, Exceto Espelho
Metal	Ferrosos e Não Ferrosos: Latinhas, entre outros
Tecido	Roupas, Retalhos, Lençóis, entre outros
Inflamáveis	Couro, Madeira, Borracha
Higiene Pessoal	Papel Higiênico, Absorvente, Fraldas, entre outros
Resíduo Especial	Hospitalar, Pilhas, Aerossol, Tintas, entre outros.
Inerte	Pedra, Osso, Cerâmica, Porcelana, entre outros
Finos	Resíduos Inferiores à 20 mm

Fonte: MARTINS, 2017.

Os RSU depositados no ASMJP constituem-se de fração orgânica (32%), resíduo verde (16%), plástico (10%), finos (10%), material de higiene pessoal (9%), inflamáveis (6%), papelão (5%), papel (3%), vidro (2%), tecidos (2%), especiais (2%), inerte (2%), e metal (1%) (MARTINS, 2017).

As Figuras 2 a 6 mostram, respectivamente, a balança de pesagem ASMJP (Fig. 2), célula em operação no ASMJP (Fig. 3), célula encerrada no ASMJP (Fig. 4), estação de tratamento do biogás no ASMJP (Fig. 5) e a estação de tratamento do chorume no ASMJP (Fig. 6).

Figura 2 - Balança de pesagem do ASMJP



Fonte: Autor, 2017.

Figura 3 - Célula em operação ASMJP



Fonte: Autor, 2017.

Figura 4 - Célula encerrada no ASMJP.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 5 - Estação de tratamento do Biogás ASMJP



Fonte: Autor, 2017.

Figura 6 - Estação de tratamento do chorume ASMJP



Fonte: Autor, 2017.

3.4 BIOGÁS DE ATERRO

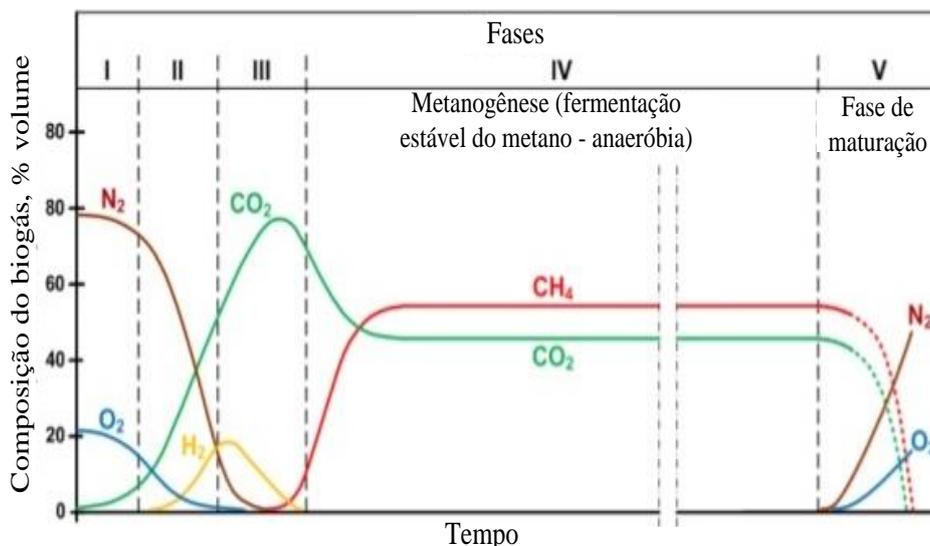
O biogás gerado em aterro sanitário depende do sistema microbiológico existente no substrato (resíduo) que é decomposto, e das variáveis específicas do aterro, como acesso ao oxigênio para o aterro e o teor de umidade. Este processo ocorre em diferentes fases distintas, durante a vida do aterro, e é afetado por diferentes fatores:

- **Composição física:** caracteriza-se por diferentes materiais que compõe o RSU (papel, papelão, resíduos de comida, madeira, tecidos, borracha e couro, folhas, plásticos, vidros, metais, entre outros). A porcentagem de cada um destes materiais influi diretamente no potencial de geração de CH_4 , devido ao seu potencial de biodegradabilidade. Os resíduos de comida são os que apresentam maior biodegradabilidade devido a seu alto conteúdo de matéria orgânica, a qual será mais rapidamente decomposta.
- **Composição química:** a produção de biogás é acelerada com aumento de nutrientes de origem orgânica.
- **Umidade:** depois da composição dos resíduos sólidos, este é o fator mais influente na produção de gases nos aterros de RSU, já que o teor de umidade é essencial para o processo de decomposição.
- **Temperatura:** existe uma relação direta entre a intensa atividade biológica e o nível de temperatura. Cada classe de microrganismos tem um intervalo tolerável para sua sobrevivência.
- **pH:** o intervalo ótimo do pH para as bactérias é de 6,7 a 7,5. Com o intervalo ótimo de pH, pode se obter uma alta taxa de crescimento de bactérias metanogênicas, aumentando a produção de CH_4 . (TARAZONA, 2010)

Outros fatores também podem influenciar a produção de biogás de aterro, como características físicas, tamanho das partículas, densidade, homogeneidade, potencial de óxido-redução, forma de construção e operação do aterro, e as dimensões do aterro.

A Figura 7 mostra os componentes produzidos na geração de biogás em suas diferentes fases e a variação dos componentes.

Figura 7 - Produção dos componentes do biogás e suas fases de geração.



Fonte: Traduzido de *UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA*, 2016.

Na Figura 7, a descrição das fases segue USEPA (2016):

A Fase I ocorre na presença de bactérias aeróbicas, que consomem oxigênio ao quebrar as cadeias moleculares longas de carboidratos complexos, proteínas e lipídeos que constituem os resíduos orgânicos. O subproduto primário deste processo é o dióxido de carbono. Esta fase continua até que o oxigênio disponível seja esgotado.

Na Fase II há um processo anaeróbio, que não requer oxigênio. As bactérias convertem os compostos criados pelas bactérias aeróbicas em ácidos acético, láctico e fórmico e álcoois, tais como metanol e etanol. A medida que os ácidos se misturam com a umidade presente no lodo e o nitrogênio é consumido, o dióxido de carbono e o hidrogênio são produzidos.

Na Fase III as bactérias anaeróbicas consomem os ácidos orgânicos produzidos na Fase II e formam o acetato, um ácido orgânico. Este processo faz com que o aterro se torne um ambiente mais neutro com bactérias produtoras de metano, que consomem o dióxido de carbono e acetato.

Na Fase IV a composição e as taxas de produção de biogás permanecem relativamente constantes. O biogás geralmente contém aproximadamente 50 - 55% de metano em volume, 45-50% de dióxido de carbono e 2 -5% de outros gases, tais como sulfetos. O biogás é produzido a uma taxa estável na Fase IV, tipicamente por cerca de 20 anos. (USEPA, 2016)

O biogás, por ter um elevado teor de CH_4 , pode ser aproveitado no aterro sanitário em diversas formas. Porém, sua principal aplicação é como combustível em motor de combustão interna a gás, que movimenta um gerador de energia elétrica, podendo ser direcionada para outros fins. Entre as aplicações estão: produção de calor de processo, secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em Estação de Tratamento de Esgoto, queima em caldeiras, aquecimento de granjeias, iluminação a gás, tratamento de chorume e outras finalidades (ICLEI, 2009).

O gás gerado no aterro é composto por vários gases, alguns presentes em grandes quantidades como o metano, o dióxido de carbono e outros em quantidades de traços. Os gases presentes nos aterros de resíduos incluem o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) (BORBA, 2006).

A Tabela 3 mostra a composição típica do biogás gerado no aterro sanitário.

Tabela 3 - Composição típica de biogás de aterro de RSU.

COMPONENTE	(%)
Metano (CH_4)	45-58
Dióxido de Carbono (CO_2)	35-45
Nitrogênio (N_2)	1-20
Oxigênio (O_2)	1-5
Hidrogênio (H_2)	1-5
Vapor de Água (H_2O)	1-5
Outros Gases	1-3

Fonte: Adaptado de TARAZONA, 2010.

O biogás captado no aterro sanitário pode ser aproveitado, podendo ser utilizado na geração de calor e/ou trabalho mecânico. Deste modo, evitam-se as emissões diretas de gases a atmosfera e abrem-se possibilidades e oportunidades para incluir o aterro sanitário no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). A proposta do MDL é a implantação de um projeto, em um país em desenvolvimento, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir para o desenvolvimento sustentável local. Cada tonelada

de GEE que deixa de ser emitida ou retirada da atmosfera é transformada em unidade de crédito de carbono, chamada Redução Certificada de Emissões (RCE) que poderá ser negociada no mercado mundial (ICB, 2014).

3.5 USOS DO BIOGÁS DE ATERRO

Os projetos de geração de energia a partir do biogás entraram em cena pela primeira vez em meados dos anos 1970 e tiveram notoriedade durante a década de 1990 demonstrando a sua eficiência, confiabilidade e redução de custos (USEPA, 2016).

A promulgação de créditos fiscais federais e exigências regulatórias para a coleta e controle do biogás para aterros de grande porte nos Estados Unidos também ajudou a estimular o crescimento de projetos de energia a partir do biogás (USEPA, 2016).

Outros fatores que podem ter contribuído para alavancar a quantidade de projetos para aproveitamento de biogás incluem as preocupações com mudanças climáticas globais e as demandas sociais pelo uso mais intenso de energias renováveis.

A base de dados do *Landfill Methane Outreach Program* sobre aterros sanitários e projetos de energia com biogás descreve o desenvolvimento de projetos de energia em aterros sanitários nos Estados Unidos e possui 652 projetos registrados em 48 estados no território dos Estados Unidos (USEPA, 2016). Cerca de 75% desses projetos geram eletricidade, enquanto o restante são projetos de uso direto onde o biogás é usado como energia térmica (USEPA, 2016). As seções 3.5.1 e 3.5.2 baseiam-se em USEPA (2016).

3.5.1 Geração de Eletricidade

As três tecnologias mais usadas para gerar eletricidade a partir do biogás são: os motores de combustão, turbinas a gás e microturbinas, com ampla gama de potência de acordo com os objetivos (USEPA, 2016).

A maioria (mais de 75%) das instalações de geração de eletricidade, a partir do biogás, usam motores de combustão interna, que são bem adequados para projetos entre 800 kW e 3 MW. As turbinas a gás são mais susceptíveis de serem utilizadas para grandes projetos, geralmente 5 MW ou maiores. As microturbinas são mais comuns em projetos menores que 1 MW.

As aplicações de cogeração proporcionam uma maior eficiência, por isso, vem crescendo em número. Além de produzir eletricidade, esses projetos recuperam e utilizam

o calor gerado simultaneamente. A cogeração pode usar tecnologia de motores de combustão interna, turbinas a gás ou microturbinas.

Outras tecnologias de geração de eletricidade incluem caldeira com turbinas a vapor e aplicações de ciclo combinado. Na caldeira com turbina a vapor, o biogás é queimado em uma grande caldeira para que alimente uma turbina para gerar eletricidade.

No ciclo combinado, as aplicações combinam uma turbina a gás com uma turbina a vapor, a turbina a gás queima o biogás e a turbina a vapor utiliza o vapor gerado a partir do escape da turbina de gás para gerar eletricidade. As aplicações de caldeiras com turbinas a vapor e de ciclo combinado atingem maior escala do que a maioria dos projetos de eletricidade que utilizam motores de combustão interna, utilizando biogás. (LMOP, 2016).

3.5.2 Uso direto do biogás gerado em aterro sanitário

O uso direto do biogás pode oferecer uma alternativa econômica para o abastecimento de combustíveis ou instalações localizadas num raio de 5 km de um aterro sanitário (LMOP, 2016). Em algumas situações, pode ser economicamente viável, com base na quantidade de biogás recolhido, na procura do combustível e do preço do combustível que o biogás irá substituir. Algumas fábricas escolheram sua localização perto de um aterro para justamente aproveitar o biogás, que é rentável quando comparado com o combustível que seria utilizado.

Caldeiras são o tipo mais comum de uso direto de biogás e muitas vezes podem ser facilmente convertidas para usar biogás sozinho ou em combinação com combustíveis fósseis. Aplicações térmicas diretas incluem fornos (cimento, cerâmica ou tijolo), secadores de lodo e aquecedores. Outro uso direto é na evaporação de lixiviados, em que um dispositivo de combustão utiliza o biogás para evaporar o lixiviado (o líquido formado pela degradação da matéria orgânica no interior das células do aterro sanitário). A evaporação do lixiviado pode reduzir o custo de tratamento e eliminação de lixiviados (LMOP, 2016).

O aproveitamento de biogás está se tornando mais comum, e quando limpo/tratado e purificado (dióxido de carbono e remoção de impurezas), pode ser diretamente injetado em um gasoduto de gás natural. Também estão crescendo em popularidade projetos em que o biogás de aterro sanitário fornece calor para processos de produção de combustíveis

alternativos (*e.g.*, biodiesel ou etanol). Em alguns casos, o biogás é usado diretamente como matéria-prima para um combustível alternativo (*e.g.*, gás natural comprimido, gás natural liquefeito ou metanol).

3.6 BENEFÍCIOS DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS DE ATERRO

O desenvolvimento de projetos energéticos a base do aproveitamento de biogás de aterro é uma maneira eficaz de reduzir emissões de GEE, melhorar a qualidade do ar local e controlar odores. Esta seção resalta os importantes benefícios ambientais e econômicos derivados do aproveitamento energético de biogás de aterro, em relação a comunidade, o aterro em si e o usuário final da energia.

3.6.1 Benefícios ambientais do aproveitamento do biogás de aterro.

Os aterros sanitários são a terceira maior fonte de emissões antrópicas de metano (USEPA, 2016), sendo o metano um poderoso gás de efeito estufa com vida atmosférica curta (~ 12 anos) (IPCC, 2013). Como todos os aterros sanitários geram metano, há muitas oportunidades para reduzir estas emissões por queima direta (tocha) ou coleta de biogás para geração de energia.

Há redução direta na emissão de GEE porque durante sua vida operacional, um projeto de energia a partir de biogás capturará 60-90% do metano gerado por um aterro, esta aviação é decorrente do projeto, do sistema e da eficiência do sistema de controle do biogás (LMOP, 2016). O metano capturado é convertido em água e CO₂ quando o gás é queimado para produzir eletricidade ou calor. Também há reduções indiretas na emissão de GEE, pois a produção de energia a partir de biogás substitui o uso de recursos não-renováveis (*e.g.*, carvão, petróleo ou gás natural) que seriam necessários para produzir a mesma quantidade de energia. Para projetos de eletricidade, evita-se a combustão de combustíveis fósseis em usinas, liberando menos poluentes para a atmosfera, incluindo o dióxido de enxofre (que contribui para precipitação da chuva ácida), particulados (uma preocupação da saúde respiratória) e óxidos de nitrogênio (que contribuem para poluição local). Embora o equipamento que queima biogás para gerar eletricidade gere algumas emissões, como o óxidos de nitrogênio, os benefícios ambientais globais obtidos, incluem

a redução direta do metano, redução indireta do dióxido de carbono e redução indireta de outras emissões e poluentes atmosféricos.

Outros benefícios ambientais originados com a coleta e combustão do biogás são a redução dos odores do aterro sanitário (causados geralmente por sulfatos presentes no gás). A coleta do biogás também melhora a segurança ao reduzir a migração de gás para estruturas, onde o gás acumulado pode criar riscos de explosão.

3.6.2 Benefícios econômicos associados ao aproveitamento do biogás de aterro.

Os aterros sanitários podem receber receitas da venda do biogás ou da venda da eletricidade gerada com biogás. Dependendo de quem é o proprietário dos direitos de propriedade sobre o biogás, o aterro também pode ser elegível para créditos de energia, créditos e incentivos fiscais, e comércio de emissões de GEE. Todas estas fontes potenciais de receita podem ajudar a compensar os custos capitais do projeto de aproveitamento do biogás. Se o aterro for obrigado a instalar um sistema de controle, o uso do biogás como recurso energético pode ajudar a compensar o elevado custo inicial, associado ao sistema de controle (USEPA, 2016).

Empresas e outras organizações, como universidades e instalações governamentais, podem alcançar economias significativas nos custos de energia ao escolher o biogás como fonte direta de combustível. As empresas podem se beneficiar também indiretamente, por meio da exposição aos meios de comunicação do uso de energia renovável (CARVALHO; FREIRE; BRITO, 2016; FREIRE *et al.*, 2016).

Os projetos desenvolvidos para geração de energia, a partir de biogás, podem também beneficiar a economia local. Temporariamente, com a criação de empregos para a fase de construção e logo com geração de empregos a longo prazo para o funcionamento da usina de geração de energia. Projetos de energia necessitam de engenheiros, empresas de construção, fornecedores de equipamentos e utilitários, e usuários finais para a energia produzida.

Alguns materiais podem ser comprados localmente e empresas locais são contratadas para construção, perfuração de poços, instalação e outros serviços. Além disso, alojamento e refeições para os trabalhadores proporcionam um aumento na movimentação da economia local. Parte do dinheiro pago aos trabalhadores e empresas locais é gasto localmente em bens e serviços, resultando em benefícios econômicos indiretos. Em alguns

casos, novos negócios são criados, tais como: fábricas de tijolo e cerâmica, estufas ou estúdios perto do aterro sanitário para usar o biogás.

4. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido no Aterro Sanitário Metropolitano, localizado na cidade de João Pessoa, estado da Paraíba. O aterro possui um potencial de capacidade de 1.100 t/dia de resíduo, com uma proporção de 23% de material reciclável. Este aterro possui uma vida útil de aproximadamente 25 anos (LIMA *et al.*, 2003).

Após entrar em contato via ofício¹ com as prefeituras dos municípios que fazem parte do consórcio, foi informado que as cidades de Lucena e Cruz do Espírito Santo não enviam seus resíduos para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa e que ainda, utilizam de lixões como destinação final dos resíduos sólidos. Os demais não responderam às solicitações feitas no ofício, assim como, não se obteve dados da FOXX e os contatos com a EMLUR não foram exitosos. Porém, utilizou-se os dados de Pimentel (2017) que forneceu os dados necessários.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), um modelo de geração de gás de aterro fornece uma estimativa do metano ou gás de aterro gerado a partir de um volume de resíduos específico, ao longo do tempo. O modelo consegue descrever, de maneira simples, as alterações que ocorrem durante a decomposição dos resíduos em um aterro (ABRELPE, 2013). Em inglês, utiliza-se o termo *landfill gas* (LFG) para se referir especificamente ao gás gerado em aterros. Porém, observa-se que na literatura, em português, tanto o termo "gás de aterro" quanto "biogás" são utilizados para se referir ao gás produzido pela decomposição dos resíduos sólidos em aterros.

Existem diferentes métodos descritos na literatura para estimar a geração de biogás em aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, que podem ser categorizados em modelos de ordem zero, de primeira ordem, multifásicos e de segunda ordem (OONK, BOOM, 1995). Os modelos de primeira ordem são os modelos de geração de biogás mais comumente aplicados atualmente.

¹ João Pessoa ofício n° 26112015-001/1991228, Cabedelo ofício n° 18042016-001/1991228, Lucena ofício n° 18042016-004/1991228, Bayeux ofício n° 18042016-002/1991228, Santa Rita ofício n° 18042016-005/19991228, Cruz do Espírito Santo ofício n° 18042016-003/1991228.

4.1 MODELO LANDGEM (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA).

O modelo de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários está sendo mundialmente empregado e desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency – USEPA*) (USEPA, 2005; FAOUR; REINHART; YOU, 2007; FRIIS, 2012).

O LandGEM é um modelo considerado como padrão, e é aplicado para estimar as emissões de biogás em aterros regulados pela USEPA, dentro da Lei do Ar Limpo (*Clean Air Act*).

A emissão de metano (CH₄) em aterros de RSU pode ser estimada por meio de modelos matemáticos que preveem a degradação de RSU ao longo do tempo. O modelo se baseia em reações de decaimento de primeira ordem, onde o potencial de emissão de metano é calculado com base na quantidade de RSU depositados a cada ano. Aqui se aplicou o *Landfill Air Emissions Estimation Model* (LandGem, versão 2.01), que possui duas categorias, uma para aterros que não possuem sistema de controle do biogás (emissões não controladas) e outra metodologia empregada em aterros que possuem um sistema de captura de biogás para queima ou para geração de energia (TARAZONA, 2010). As descrições seguem Usepa (2005), Faour, Reinhart e You (2007), Tarazona (2010) e Friis (2012).

4.1.1 Estimativa de emissões de gases não controlados.

As emissões não controladas em aterros sanitários de RSU são encontradas em aterros que não possuem um sistema de controle dos gases, onde muitas vezes ocorre apenas a queima. Não há caldeiras a vapor, turbinas a gás ou motores a combustão interna. Para calcular a quantidade de CH₄ produzido, é:

$$Q_{CH_4} = L_0 \cdot R \cdot (e^{-Kc} - e^{-Kt})$$

Q_{CH_4} , refere-se a quantidade de gás produzido (m^3/ano), L_0 é o potencial de geração de CH_4 por tonelada de lixo (m^3/t_{RSU}^{-1}), R é a média de resíduos depositados no aterro (t_{RSU}/ano), K é a constante de geração de CH_4 (ano^{-1}), c é o tempo desde o encerramento do aterro (anos) utiliza-se $c = 0$ para aterro sanitário ativos, e t é o tempo decorrido desde o início da disposição do resíduo no aterro (anos).

Para casos onde não se tem informações detalhadas dos resíduos depositados no aterro de RSU, o R estima-se dividindo o total de lixo recebido pela idade do aterro.

O coeficiente K varia em função da umidade do resíduo, tipo de resíduo, disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento do processo anaeróbico, PH e temperatura; estas variáveis irão determinar o tempo de geração de metano e o tempo de vida dos aterros (CABRERA, 2011). Os valores de referência de K dependem da pluviosidade local (USEPA, 2005): para pluviosidade < 635 mm/ano, $K = 0,02$; para pluviosidade >635 mm/ano, $K = 0,04$.

Para o potencial de geração de metano (L_0), o valor recomendado pela (USEPA 2005) é de $100m^3/t$ de CH_4 por tonelada de resíduo depositado. Porém, Chiemchaisri e Visvanathan (2008) argumentam que, para países em desenvolvimento, com alta parcela de material biodegradável no RSU, deve-se utilizar $L_0 = 170 m^3/t$ e $K = 0.05$. Assim, optou-se por seguir estritamente as recomendações do modelo USEPA.

A Equação 1 foi criada inicialmente para estimar a geração de metano e não para estimar as emissões, pois parte do metano gerado é capturado e degradado nas camadas superficiais do solo. No entanto, dada a dificuldade em avaliar essa degradação que ocorre nas camadas superficiais, considera-se que todo metano gerado é emitido para a atmosfera e formará o biogás emitido pelo aterro sanitário (CABRERA, 2011).

Como a composição do biogás varia com o tempo, o modelo USEPA toma como composição típica do biogás: 55% CH_4 e 40% CO_2 . Para estimar a quantidade de CO_2 emitido para a atmosfera é:

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} \cdot (C_{CO_2\%} / C_{CH_4})$$

Para conhecer as emissões de outros componentes, utiliza-se:

$$NC_i = Q_i \cdot \left[\frac{PM_i \cdot 1atm}{8,205 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 \cdot (273 + T)} \right]$$

Onde NC_i é a emissão anual do contaminante i (kg/ano), Q_i é a emissão anual do contaminante i (m^3 /ano), PM_i é o peso molecular do contaminante i (g/gmol), e T é a temperatura do biogás (caso não se tenha dados disponíveis adota-se $25^\circ C$ e 1 atm).

4.1.2 Estimativa de emissões de gases controlados

A estimativa de emissões de gases controlados se aplica a casos onde exista a instalação de um sistema de captura de biogás para queima em tocha ou para a produção de energia elétrica.

Os sistemas de captação não apresentam eficiência de 100%, já que parte do biogás produzido é emitido diretamente para a atmosfera. No caso de desconhecer a eficiência do sistema, o método USEPA sugere adotar o valor de 75% de eficiência de captação. Os dispositivos de controle e/ou utilização do gás gerado no aterro sanitário devem ser considerados. O método USEPA fornece um conjunto de dados padrão mostrados na Tabela 4, onde a eficiência do sistema de controle depende do dispositivo de controle empregado em cada aterro sanitário. Na Tabela 4, COV refere-se a Composto Orgânico Volátil.

Tabela 4 - Eficiência do sistema de controle.

Dispositivo de controle	Contaminante	$n_{cont}(\%)$
Tocha	COV	99,2
Motores de combustão interna	COV	97,2
Caldeiras	COV	98,0
Turbina a gás	COV	94,4

Fonte: Adaptado de CABRERA, 2011.

Para estimar os valores de emissão de CH₄ e CO₂, utilizam-se as Equações respectivamente:

$$EC_{CH_4} = \left(NC_{CH_4} \cdot \left(1 - \frac{n_{col}}{100} \right) \right) + \left(NC_{CH_4} \cdot \frac{n_{col}}{100} \cdot \left(1 - \frac{n_{cont}}{100} \right) \right)$$

$$EC_{CO_2} = UM_{CO_2} + \left(UM_{CH_4} \cdot \frac{n_{col}}{100} \cdot 2,75 \right)$$

EC_{CH_4} são as emissões controladas de metano (kg/ano), NC_{CH_4} são as emissões não controladas de metano (kg/ano), n_{col} é a eficiência do sistema de captação (75% *default*), e n_{cont} é a eficiência do dispositivo de controle (Tabela 4). Na Equação 4, NC_{CO_2} se refere às emissões controladas de CO₂ (kg/ano), UM_{CO_2} são as emissões não controladas de CO₂ (kg/ano) e 2,75 se refere à proporção entre os pesos moleculares de CO₂ e CH₄.

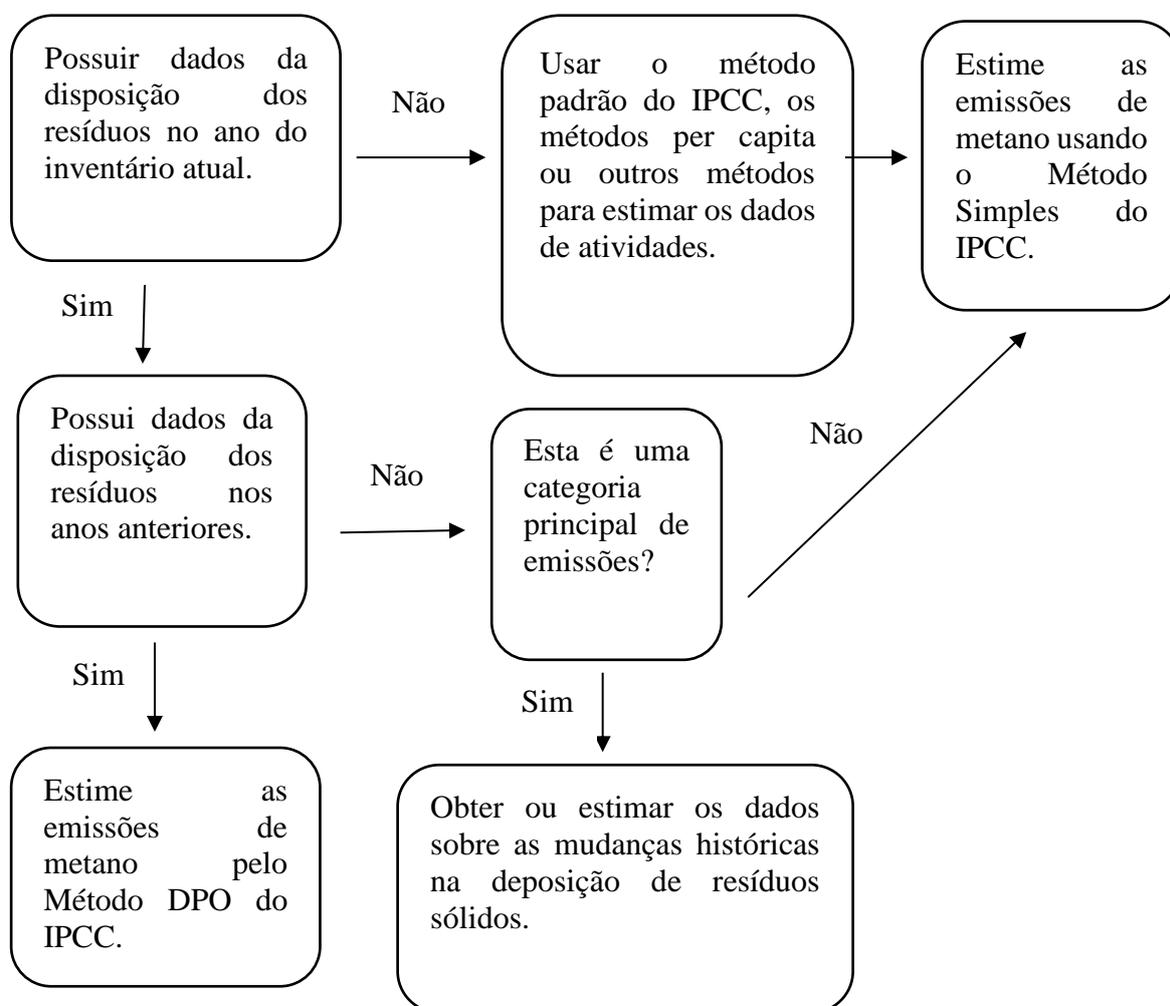
4.2. MÉTODO DO GRUPO INTERGOVERNAMENTAL PARA AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC, *INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE*).

O Grupo Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC) descreve dois métodos para estimar as emissões de metano (CH₄) gerados em aterros sanitários (IPCC, 2013). A diferença entre os dois métodos propostos está em que no método de decaimento de primeira ordem (DPO) as emissões de CH₄ depende do tempo transcorrido após a deposição dos resíduos. Já o método simples compreende que as emissões totais de CH₄ ocorrem no mesmo ano em que se depositam os resíduos no aterro. As seções 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 baseiam-se em (CABRERA, 2011) e (IPCC, 2013).

4.2.1 Métodos simples para estimativa de geração de CH₄.

O método simples permite calcular as emissões de CH₄ a partir da quantidade de resíduo sólido urbano domiciliar, depositado no aterro sanitário, fração de carbono orgânico degradado e a quantidade que se degrada realmente, como também, a fração de CH₄ no gás produzido no aterro sanitário. O método considera que no mesmo ano em que se depositam os resíduos sólidos urbanos domiciliares, todo o CH₄ possível é gerado. Para a escolha do método mais adequado a ser usado, utiliza-se o fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma para decidir qual método do IPCC utilizar para estimar as emissões de CH₄ em aterro sanitário de RSU.



Fonte: Adaptado de Cabrera, 2011.

O método simples não considera as mudanças que podem se produzir com tempo, sendo proposto um fator de correção:

$$\text{Fator de Correção} = \left[\frac{1}{(1 + R) \cdot 1} \right] \cdot \left\{ \frac{11}{[T \cdot 1n(1 + R)]} \right\}$$

R é a taxa de deposição anual de resíduos, T é o tempo de duração da geração do metano. Para se estimar a quantidade de CH₄ emitido, no método simples.

$$CH_4 = [(RSU_{dom} \cdot L_0) - R] \cdot (1 - OX)$$

Onde CH₄ é a quantidade de CH₄ emitido no ano (t/ano), RSU_{dom} é a quantidade de resíduo sólido urbano depositado no aterro sanitário (t/ano), L₀ (x) é o potencial de geração do metano (t_{CH4}/t_{RSU}), R é o CH₄ recuperado durante o ano em toneladas (t/ano) e OX é o fator de oxidação. Para determinar L₀ utiliza-se:

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot COD_F \cdot F \cdot \frac{16}{12}$$

Onde FCM é o fator de correção do metano, COD é a fração do carbono orgânico degradado (tc/t_{RSU}), COD_F é a fração de COD não assimilado, F é a fração por volume de CH₄ presente no gás do aterro sanitário e $\frac{16}{12}$ é a conversão carbono (C) para metano (CH₄).

É importante observar que todos os parâmetros deste modelo podem variar com o tempo, dependendo da disposição dos resíduos no aterro e da sua gestão. (CABRERA, 2011).

4.2.2 Método DPO para estimativa de geração de CH₄.

Para aplicar o método, é preciso possuir os dados históricos a respeito da geração de resíduos e as práticas de gestão dos resíduos sólidos. O método está baseado na derivada da equação para calcular as emissões de metano no método simples do IPCC:

$$CH_4 \text{ gerado} = \sum_X [(A \cdot K \cdot RSU_{dom(X)} \cdot L_0(X)) \cdot e^{-K(t-X)}]$$

O CH₄ gerado refere-se a quantidade de CH₄ gerado no ano (t/ano), A é o fator de normalização que corrige o somatório $(1 - e^{-k})$, $RSU_{dom(X)}$ é a quantidade de resíduos sólidos domiciliar gerado no ano (t/ano), K é o valor constante da taxa de geração de metano (ano⁻¹), t é o ano no qual se está avaliando a quantidade de CH₄ gerado, X é o ano considerado desde o início da atividade do aterro sanitário (t) e L₀ é o potencial de geração de metano. Para calcular o metano gerado no aterro sanitário é necessário calcular L₀, que é o potencial de geração de metano:

$$L_0 = FCM_{(X)} \cdot COD_{(X)} \cdot COD_F \cdot F \cdot \frac{16}{12}$$

$FCM_{(X)}$ é o fator de correção do metano no ano x, $COD_{(X)}$ é a fração de carbono degradado no ano x, COD_F é a fração de carbono orgânico degradado não assimilado, F é a fração por volume de CH₄ no gás do aterro sanitário e $\frac{16}{12}$ é a conversão de carbono (C) para metano (CH₄). Para calcular as emissões de metano:

$$CH_4 \text{ emitido} = [CH_4 \text{ gerado} - R_{(t)}] \cdot (1 - OX)$$

Onde $R_{(t)}$ é o CH_4 recuperado durante o ano t (t/ano) e OX é o fator de oxidação.

4.2.3. PARÂMETROS UTILIZADOS NO MÉTODO IPCC

Os parâmetros mencionados nos dois métodos IPCC são descritos a seguir, e seguem Cabrera (2011) e IPCC (2013).

✓ Fator de correção para o metano (FCM)

O IPCC (2013) propõe valores padrões, dependendo do tipo de aterro, específico para a gestão de resíduos sólidos. Os valores *default* (pré-definidos) estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados padrões para o fator de correção do metano (FCM).

Fatores pré-estabelecidos de correção para o metano	
TIPOS DE ATERROS	FCM
Aterro Sanitário	1
Não controlados – profundos (≥ 5 m de resíduos)	0,8
Não controlados – pouco profundos (< 5 m de resíduos)	0,4
Resíduos sólidos não especificado (não incluídos na categoria)	0,6

Fonte: Adaptado de Cabrera, 2011.

O aterro que é propício à decomposição anaeróbia, é definido pelo IPCC (2013) como aquele em que há uma decomposição controlada de resíduos, ou seja, área específica de depósito de resíduos, algum grau de controle na coleta de lixo e com material de cobertura mínima, compactação mecânica ou nivelamento de resíduos. Aqui se considerou o caso específico de aterros sanitários, para os quais se atribui $FCM = 1$.

Segundo Cabrera (2011), considerar $FCM=1$ é demasiado otimista, razão pela qual alguns países como a Noruega utilizam 0,95. Fatores que influenciam a redução do valor de FCM são áreas com menor compactação, superficial, tipo de cobertura ou algum fogo acidental.

✓ Carbono Orgânico Degradável (COD)

É o carbono que pode ser submetido a decomposição bioquímica. Baseia-se na composição dos resíduos e pode ser calculado com base na média ponderada do teor de carbono orgânico degradável em porcentagem e os vários componentes dos resíduos (CABRERA, 2011). A Equação é empregada usando o conteúdo de carbono padrão de resíduos diferentes:

$$COD = (0,4 \cdot A) + (0,7 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,3 \cdot D)$$

Onde A é a fração de RSU composta de papel e têxteis; B é a fração de RSU composta de resíduos de jardinagem, parques e outros elementos perecíveis; C é a fração de RSU composta de restos de alimentos, excluindo a lignina; D é a fração de RSU composta por madeira e palha.

A + B + C + D não necessariamente será igual a um, porque os resíduos sólidos contém materiais como plásticos, metais, e outros materiais que não são degradáveis, mas que também estão incluídos no inventário de resíduos.

✓ Fração de carbono orgânico degradável não assimilável (COD_F)

Corresponde a fração de carbono que é realmente degradado e liberado a partir de aterros na forma de biogás. Um valor padrão COD_F = 0,77 é proposto, mas, atualmente, tem-se observado que este valor está superestimado (IPCC, 2013). Países que preferem incluir a lignina no parâmetro C da Equação 12 utilizam valores baixos de COD_F, entre 0,5 e 0,6, que permitem estimativas confiáveis de geração e recuperação de biogás. O valor de COD_F é baseado no modelo teórico de Tabasaran (1981), onde a variação depende da temperatura na zona anaeróbia da decomposição:

$$COD_F = 0,014 \cdot T + 0,28$$

✓ Fração de CH₄ no gás de aterro (F)

O valor padrão utilizado pelo IPCC é de 0,5, mas pode variar entre 0,4 e 0,6, dependendo de vários fatores, incluindo a composição dos resíduos. Se o material inclui grandes quantidades de gordura ou óleo este valor pode aumentar.

✓ Recuperação de Metano (R)

É a quantidade de metano recuperado e queimado ou utilizado em algum dispositivo de geração de energia. O valor padrão é 0, que pode ser modificado quando houver referências disponíveis, informando o volume de metano recuperado. Aqui se utiliza o valor padrão, já que a intenção é calcular o total de metano gerado e não o valor das emissões de metano, após recuperação.

✓ Fator de oxidação (OX)

Reflete a quantidade de metano que é oxidado na cobertura do solo ou em outros materiais residuais. O valor padrão é 0, mas atualmente em países industrializados com maior controle em aterros sanitários, utiliza-se o valor 0,1; este valor só se justifica em aterros que possuem um sistema de controle muito bem instalado.

✓ Constante de geração (K)

É uma função de diversos parâmetros associados com a composição dos resíduos e das condições do aterro sanitário: K representa a velocidade de degradação da matéria orgânica ou o mesmo que o tempo levado pelo carbono orgânico degradável (COD) presente em resíduos para decompor a metade da sua massa inicial (meia-vida, $t_{\frac{1}{2}}$). O valor da constante de geração é:

$$K = \ln \frac{2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

Medições feitas nos EUA, Reino Unido e Países Baixos indicam valores de K entre 0,03 e 0,2 por ano. (CABRERA, 2011).

Taxas mais rápidas, $K = 0,2$, ou $t_{\frac{1}{2}}$ de aproximadamente 3 anos estão ligadas a condições de alta umidade e materiais rapidamente degradáveis. Taxas mais lentas, $K =$

0,03, ou $t_{\frac{1}{2}}$ de aproximadamente 23 anos, estão associadas ao resíduo seco e a massa de resíduo de degradação lenta.

Para estimar o valor de K, deve-se determinar a composição e estudar as condições ao longo do tempo. Se os dados não estão disponíveis, é sugerido o valor de 0,05 para K, sendo equivalente a uma média de vida, de cerca de 14 anos.

A Tabela 6 mostra as incertezas associadas aos parâmetros do modelo IPCC, quando usados os valores pré-definidos (*default*).

Tabela 6 - Incertezas associadas aos parâmetros pré-definidos do IPCC.

Parâmetro	Incerteza
RSU _{dom}	> +/-10%
COD*	-50% a +20%
COD _F	-30% a +0%
FCM	
=1,0	-10% a 0%
=0,4	-30% a +30%
=0,6	-50% a +60%
F	0% a +20%
R	Dependerá de como se estima o CH ₄ recuperado
OX	Quando diferente de 0, incluir na análise da incerteza
K	-40% a +30%

Fonte: Adaptado de Cabrera, 2011.

* valor máximo padrão esperado é de 0,21.

4.3 MODELO GasSim

A *Environment Agency of England and Wales* (Agência Ambiental do Reino Unido) desenvolveu o modelo GasSim para avaliar as emissões geradas em aterros sanitários (CABRERA, 2011).

O programa consiste em dois módulos que calculam e simulam geração e emissões em aterros, mas o principal problema reside no grande número de parâmetros necessários.

O modelo GasSim, como os anteriores (USEPA e IPCC), se baseia em uma equação de primeira ordem levando em consideração que os resíduos biodegradáveis podem se

enquadrar em três categorias, dependendo da velocidade de degradação, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Velocidade de degradação em função da tipologia do resíduo.

Degradação	Fração
Rápida	Percíveis Finos Resíduos de jardim Tratamento biológico de lamas
Moderada	¼ Papel (excluindo jornais) Madeira Lenço de papel, guardanapos
Lenta	¾ Papel (excluindo jornais) Jornais Têxteis

Fonte: Adaptado de Cabrera, 2011.

O modelo GasSim está baseado nas Equações respectivamente:

$$C_t = C_0 - (C_{0,1} \cdot e^{(-k_1 t)} + C_{0,2} \cdot C^{(-k_2 t)} + C_{0,3} \cdot e^{(-k_3 t)})$$

$$C_x = C_t - C_{t-1}$$

C_t é a quantidade de carbono orgânico degradado até o tempo t , C_0 é a quantidade de carbono orgânico degradável até $t=0$, $C_{0,i}$ é a quantidade de carbono orgânico degradável de cada fração de resíduo até $t=0$ ($i=1$ rapidamente degradável, $i=2$ moderadamente degradável e $i=3$ lentamente degradável), C_x é a quantidade de carbono degradado no ano t , t é o tempo transcorrido desde o início da operação do aterro, K_i é a constante de degradação de cada fração.

As Equações 15 e 16 apenas determinam quantidade disponível de carbono, a qual é usada para determinar a geração de metano e dióxido de carbono, utilizando a relação entre CO₂ e metano.

O modelo GasSim considera o processo de degradação, teor de celulose e hemicelulose, ignorando a degradação potencial de outras frações como lipídios ou proteínas que não contribuem de forma significativa (CABRERA, 2011).

As frações de celulose e hemicelulose constituem 91% da fração biodegradável dos resíduos, daí a sua importância. A Tabela 8 mostra os parâmetros que definem o modelo GasSim.

Tabela 8 - Constante de degradação.

Umidade do resíduo na célula do aterro sanitário	Constante de degradação	Metade do tempo de degradação
<30%	K ₁ =0,076	9
	K ₂ =0,046	15
	K ₃ =0,013	53
>30% <60%	K ₁ =0,116	6
	K ₂ =0,076	9
	K ₃ =0,043	15
>60%	K ₁ =0,694	1
	K ₂ =0,116	6
	K ₃ =0,076	9

Fonte: Adaptado de Cabrera, 2011.

Para o desenvolvimento do modelo GasSim, é utilizada a metodologia do IPCC seguindo o método DPO, considerando os resíduos depositados no aterro e a velocidade em que ocorre a degradação da matéria orgânica (rápida ou lenta) dos resíduos. A Equação calcula o CH₄ gerado pela matéria orgânica:

$$CH_4 \text{ gerado} = CH_4 \text{ gerado} (C_{RRD}) + CH_4(C_{RLD})$$

Onde CH₄ gerado (C_{RRD}) é a quantidade de CH₄ gerado pelos resíduos rapidamente degradáveis no ano t (toneladas/ano), CH₄ gerado (C_{RLD}) é a quantidade de CH₄ gerado pelos resíduos lentamente degradáveis no ano t (toneladas/ano), e CH₄ gerado é a quantidade total de CH₄ gerado no ano t (toneladas/ano).

Nos cálculos, considerou-se que a fração lentamente degradada de metano começa a degradar-se três anos após o início da deposição dos resíduos no aterro.

Para o cálculo de CH₄ gerado (C_{RRD}) e CH₄ gerado (C_{RLD}), utiliza-se a mesma equação Equação , alterando os parâmetros que afetam a taxa de degradação e a quantidade de resíduos:

$$CH_4 \text{ gerado} = \sum_X [(A \cdot K \cdot RO_T(X) \cdot L_0(X)) \cdot e^{-K(t-X)}]$$

A é o fator de normalização que corrige o somatório ((1-e-k)/k), K é o valor constante da taxa de geração de metano (1/ano), RO_T(x) é o total de resíduos orgânicos depositados no ano X (toneladas/ano), L_{0(x)} é o potencial de geração do metano (tCH₄/tRO). L₀ calcula-se como mostrado na Equação:

$$L_0 = FCM \cdot CDO(x) \cdot COD_F \cdot F.$$

FCM é o fator de correção do CH₄, COD (x) é a fração do carbono orgânico degradável no ano x, COD_F é a fração do carbono orgânico dissolvido não assimilado, F é a fração por volume de CH₄ no gás do aterro, $\frac{16}{12}$ é a conversão de C para CH₄, CH₄ gerado é a quantidade de CH₄ gerado nos anos, considerados no somatório (toneladas/ano), t é o ano do encerramento do aterro e x é o ano considerado desde o início da atividade até o ano que está sendo estudado.

Os parâmetros terão valores diferentes dependendo se a degradação é rápida ou lenta.

4.3.1 Taxa de geração de metano (K)

Este valor é calculado como na Equação 14. Para o cálculo do $t_{1/2}$, pode-se considerar que para a fração rapidamente degradável, $t_{1/2} = 2$ anos e $t_{1/2} = 4$ anos para a fração lentamente degradável. Outras alternativas são os valores definidos no método do IPCC, $k = 0,2$ para rapidamente degradável $k = 0,03$ para a fração lentamente degradável.

4.3.2 Carbono orgânico degradável COD (X)

Este valor é calculado como a razão entre a quantidade de matéria orgânica rapidamente ou lentamente degradada, (dependendo do termo que é calculado), e a quantidade total de resíduos depositados no aterro. Para obtenção da quantidade de matéria orgânica degradável rapidamente e lentamente, aplicam-se as Equações respectivamente:

$$MO (RRD) = RO_t \cdot RRD(\%)$$

$$MO (RLD) = RO_t \cdot RLD(\%)$$

RRD (%) e RLD (%) são as frações correspondentes a porcentagem de matéria orgânica rapidamente e lentamente degradável, respectivamente. Para obtenção de COD, COD (RRD) e COD (RLD), utilizam-se as Equações respectivamente:

$$COD (RRD) = \frac{MO (RRD)}{RT}$$

$$COD (RLD) = \frac{MO (RLD)}{RT}$$

Onde RT é o resíduo total depositado no aterro em um ano, em toneladas.

Para os parâmetros FCM, COD_f e F tornam-se os valores de referência definidos pelo método IPCC. COD_F pode ser calculado usando Tabasaran (1981).

A Tabela 9 mostra os valores de referência utilizados para os parâmetros.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados no modelo GasSim

Parâmetros	Valores padrão
FCM	0,95
COD _F	0,77
COD _F (Tabasaran)	0,014. T + 0,28
F	0,5

Fonte: Adaptado de Cabrera, 2011.

A quantidade de biogás captado é obtida por meio da Equação:

$$\text{Biogás}_{\text{captado}} = \frac{\sum \text{CH}_4 \text{gerado}}{X(\%) \cdot n_{\text{ef}} \cdot K_p}$$

Onde o $\sum \text{CH}_4$ gerado é o somatório da quantidade de CH₄ gerado ao longo dos anos, X(%) é a porcentagem de metano no biogás, n_{ef} é a eficácia do sistema de captação instalado no aterro (0,75%) e K_p é o coeficiente de captação (0,97%). Quando a fase de geração de metano começa, o fenômeno de produção de biogás ocorre durante vários anos de acordo com uma curva que denota a máxima produção nos anos iniciais, e um progressivo esgotamento, com comportamento assintótico, até a degradação total de substâncias orgânicas.

4.4 GERAÇÃO DE ELETRICIDADE E CALOR

Para o aproveitamento energético do biogás extraído de um aterro sanitário, devem-se ter em conta variáveis econômicas, ambientais e tecnológicas. Aqui se considera que o critério econômico decidirá a viabilidade do projeto, já definido tecnicamente de acordo

com os fatores restantes. Independentemente de que haja ou não aproveitamento energético do biogás de aterro, este deve ser extraído e queimado para evitar riscos de explosões e maus odores. Este fator deve ser considerado no momento de quantificar o custo real do projeto de aproveitamento energético. Finalmente, existem restrições tecnológicas evidentes: cada aterro produz, em virtude do volume e tipo de RSU, uma vazão diferente de biogás, com composição também variável. Portanto, condiciona as soluções técnicas viáveis. Algumas opções para aproveitamento de biogás já foram brevemente discutidas na seção 3.5.

4.4.1 Cálculo da energia contida no biogás

O primeiro passo para calcular a eficiência energética e produção de energia do sistema de aproveitamento de biogás, é calcular a energia disponível no biogás extraído do aterro. Este passo considera o poder calorífico inferior do biogás obtido e a fração molar dos componentes.

Para o cálculo do poder calorífico inferior (PCI), foram utilizados valores de fração molar Tabela 10 e da entalpia de formação dos componentes do biogás Tabela 11.

Tabela 10 - Fração molar dos componentes químicos do biogás

Componentes do biogás	Fração molar
CH₄	0,45
H₂	0,12
CO₂	0,25
O₂	0,1
H₂S	0,0032

Fonte: Cabrera, 2011.

Tabela 11 - Entalpia de formação.

Entalpia de formação	kJ/Mol
H ₂ O	-285,83
CO ₂	-393,51
CH ₄	-74,81
H ₂	0
O ₂	0
SO ₂	-296,83
H ₂ S	-20,64

Fonte: Atkins; Jones, 2009.

Os calores de combustão foram calculados a partir das Equações:

$$Q_{bur;CH_4} = 2 \cdot \Delta h_{f;H_2O;bur} + \Delta h_{f;CO_2;bur} - \Delta h_{f;CH_4;bur} - 2 \cdot \Delta h_{f;O_2;bur}$$

$$Q_{bur;H_2} = \Delta h_{f;H_2O;bur} - \Delta h_{f;H_2;bur} - 0,5 \cdot \Delta h_{f;O_2;bur}$$

$$Q_{bur;H_2S} = \Delta h_{f;SO_2;bur} + \Delta h_{f;H_2O;bur} - 3/2 \cdot \Delta h_{f;O_2;bur} - \Delta h_{f;H_2S;bur}$$

Δh_f é a entalpia de formação em kJ/kmol e Q_{bur} o calor de combustão em kJ/kmol.

O cálculo do PCI é feito por meio da Equação:

$$PCI = -(X_{CH_4} \cdot Q_{bur; CH_4} + X_{H_2} \cdot Q_{bur; H_2} + X_{H_2S} \cdot Q_{bur; H_2S})$$

O PCI é o poder calorífico em kJ/kmol; X_i é a fração molar dos componentes do biogás. Para conversão de unidades, utilizou-se $1J = 2,778 \cdot 10^{-7} kWh$ e $1 mol = 22,4 L$.

O cálculo da energia disponível é feito por meio da Equação:

$$E_{\text{disponível}} = m \cdot \text{PCI}$$

$E_{\text{disponível}}$ é a energia produzida no aterro, anualmente, em kWh, m é o total de biogás gerado anualmente no aterro em m^3/h , e o PCI é o poder calorífico em kWh/Nm^3 ².

4.4.2 Análise dos motores a biogás

A partir do cálculo da energia disponível, foi feita uma seleção de motores com base na produção de energia anual. Motores comercialmente disponíveis foram selecionados, para que pudessem operar com biogás, e suas especificações técnicas foram analisadas em contraste com a produção de biogás, para verificação de produção de eletricidade. Foram analisados o consumo, desempenho, a produção de energia elétrica e combustível, características que melhor se adaptam às instalações no aterro.

De acordo com a disponibilidade online de manuais de fabricantes, foram analisados motores Rolls Royce (ROLLS ROYCE, 2012), Jenbacher (JENBACHER, 2017), e Caterpillar (CATERPILLAR, 2017). Uma análise inicial verificou que os motores Rolls Royce possuem alta potência nominal, demandando fluxos altos de biogás, indisponíveis no aterro sanitário municipal de João Pessoa. A análise técnica, portanto, concentrou-se em motores Jenbacher (JMS) e Caterpillar (série G e CG). A Tabela 12 mostra as características técnicas dos motores, construída a partir dos manuais dos fabricantes (JENBACHER, 2017; CATERPILLAR, 2017).

Tabela 12- Características dos motores Jeanbacher (JMS) e Caterpillar (série G e GG) pesquisados.

	Potência Elétrica (kW)	Potência térmica (kW)	Energia Consumida (kW)	Rendimento Elétrico	Rendimento Térmico
JMS 208 C21	330	392	852	38,73%	46,01%
JMS 212 C21	511	578	1.304	39,19%	44,33%

² Nm^3 = Normal metro cúbico, valor padrão do volume ocupado por matéria em condições normais (0 °C e pressão atmosférica 101,35 kPa).

JMS 312 C21	625	698	1.572	39,76%	44,40%
JMS 316 C21	836	930	2.096	39,89%	44,37%
JMS 320 C21	1.065	1.419	2.607	40,85%	54,43%
JMS 420 A21	1.413	1.420	3.375	41,87%	42,07%
JMS 612 F21	1.795	1.742	4.189	42,85%	41,59%
JMS 616 F21	2.405	2.322	5.586	43,05%	41,57%
JMS 620 F21	3.017	2.901	6.982	43,21%	41,55%
G3306	76	178	285	26,70%	62,40%
G3406	137	302	495	27,70%	61,10%
G3412	194	460	732	26,50%	62,90%
G3508A	408	580	1.267	32,20%	45,80%
G3512 LE	615	999	2.078	29,60%	48,10%
G3516A+	824	1.185	2.658	31,00%	44,60%
G3516A+	1.015	1.122	2.812	36,10%	39,90%
CG170-12	1.200	1.257	2.871	41,80%	43,80%
CG170-16	1.550	1.644	3.744	41,40%	43,90%

Fonte: (JENBACHER, 2017; CATERPILLAR, 2017).

Tomando a energia disponível em kWh por ano no biogás, pode-se calcular a produção de eletricidade em cada um dos motores selecionados, pois ela é limitada pela sua potência nominal. A partir da produção de eletricidade, procede-se ao cálculo do tempo de acumulação de biogás para que o motor opere a plena carga (dividindo-se a potência nominal pela energia disponível). A operação do motor está restrita a 8760 horas por ano.

4.4.3 Determinação do calor útil de acordo com o meio transmissor de calor.

As seguintes condições básicas devem ser cumpridas para que uma planta de cogeração produza os benefícios esperados (HORLOCK, 1987; LOZANO, CARVALHO, SERRA, 2009; LOZANO *et al.*, 2009; BEITH, 2011; MELO, CARVALHO, 2016,

BORBA *et al.*, 2017; VITAL, BORBA, CARVALHO, 2017; MELO, 2017; MELO, CARVALHO, 2017): i) que o calor gerado como consequência de um processo de geração de eletricidade possa ser aproveitado, substituindo calor gerado com consumo adicional de combustível; ii) que a eletricidade gerada no processo de cogeração evite a produção de eletricidade, que de outra maneira seria gerada em plantas de potência (consumindo combustível); e iii) que exista um sistema energético que permita que as plantas de cogeração estejam conectadas, de forma que toda a eletricidade possa ser aproveitada por meio de uma rede de distribuição, evitando perdas no transporte e distribuição.

A demanda de calor útil, definida por meio de sua quantidade e qualidade, é determinante e condicionante para a localização, tamanho e configuração da planta de cogeração (HORLOCK, 1987). De fato, uma planta de cogeração se projeta para gerar energia elétrica e, simultaneamente, fornecer calor a um processo. Este calor gerado simultaneamente, a eletricidade é um fluxo de matéria com conteúdo de calor. Pode-se dizer que a cogeração gera eletricidade e fluidos portadores de calor simultaneamente; estes últimos podem ser água líquida ou fluidos térmicos (gases de escape ou vapor d'água), que são úteis para substituir demandas térmicas do centro consumidor. Esta substituição pode ser total ou parcial.

Os fluidos portadores de calor circulam em um circuito secundário fechado e permitem uma transferência de calor para os processos que demandam energia térmica. Este é o tipo de meio que se utiliza para calcular o calor útil cogorado, que pode ser utilizado em uma planta de tratamento de lixiviado no ASMJP. A expressão para o calor útil ($Q_{\text{útil}}$) é (SONNTAG *et al.*, 2003):

$$Q_{\text{útil}} = m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)$$

Onde m é a massa de água (kg), C_p é o calor específico do fluido, e T_e e T_s referem-se às temperaturas de entrada e saída do fluido, respectivamente. Em geral, os fluidos portadores de calor são gerados em caldeiras (sem cogeração) ou em geradores de recuperação (no caso de cogeração). Às vezes, em sistemas com motores alternativos, a água de refrigeração pode ser usada diretamente para ceder calor útil. No caso de estudo aqui abordado, este calor se extrai do circuito de refrigeração das camisas do motor, por onde circula água.

A Tabela 13 mostra a temperatura média mensal para a cidade de João Pessoa, os dados foram extraídos de Climaticus 4.2 (2005).

Tabela 13 - Temperaturas médias mensais históricas para João Pessoa (CLIMATICUS 4.2, 2005).

Temperatura (°C)	Média	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
		25,8	25,2	28,2	25,5	27,0	26,2
Temperatura (°C)	Média	Jul	Ag	Set	Out	Nov	Dez
		23,7	25,4	27,5	27,7	27,0	24,1

Fonte: (CLIMATICUS 4.2, 2005).

4.4.4 Viabilidades econômica para planta de cogeração.

Um sistema de cogeração é projetado fundamentalmente para economizar nos custos, e potencialmente ser até uma fonte de renda. Dado que basicamente são as economias os benefícios que justificam o projeto, o processo prévio, a tomada de decisão terá como objetivo fundamental determinar se realmente a cogeração é uma opção que permite alcançar estes objetivos. Porém, a economia obtida pela cogeração se justifica pela produção elétrica e não pela produção de calor, já que o valor da energia elétrica permite recuperar os investimentos necessários.

O fator mais importante para definir se a cogeração é ou não economicamente rentável, é a diferença entre o custo da eletricidade e o custo do combustível. Em princípio, quanto maior for essa diferença, mais favorecido será o projeto de cogeração. O custo de combustível neste projeto não é um problema, já que é grátis ao ser extraído diretamente do aterro. Obviamente, outros custos serão aplicáveis.

Publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa nº482/2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e define o sistema de compensação de energia elétrica (BRASIL, 2012).

Em 2015, a ANEEL ampliou as possibilidades para mini e microgeração distribuída, que começaram sua vigência em março de 2016, e será permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada (BRASIL, 2015a).

Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, os créditos podem ser utilizados nos 60 meses seguintes (BRASIL, 2015b). Porém, aqui, não se considerou adesão à Resolução Normativa nº482/2012.

A tarifa aqui utilizada para venda de excedente de eletricidade foi a mesma de Borba *et al.* (2017) R\$ 0,20/kWh. Uma vez selecionada a tarifa a ser aplicada, pode-se calcular a receita bruta, que é a produção elétrica anual multiplicada pela tarifa.

Os gastos associados ao funcionamento da planta de cogeração são definidos pelas atividades necessárias para o correto funcionamento da planta, assim como, o custo amortizável do investimento inicial.

Pessoal: Para o bom funcionamento da planta de cogeração, necessita-se de um supervisor por turno (controle, supervisão e manutenção), totalizando três empregados. Necessita-se também de um chefe, que trabalharia 20 horas por semana. Para fazer o cálculo dos gastos com os operários, foi realizada a soma do salário. Para calcular o salário dos funcionários, foi levado em consideração o FGTS e insalubridade de periculosidade. Os valores para os operadores foi o salário de R\$ 2.200, FGTS de R\$ 228,8 e insalubridade de R\$ 660. Para o chefe, salário de R\$ 3.520, FGTS R\$ 366,08 e insalubridade de R\$ 1.056.

Manutenção: Considera-se uma revisão anual, feita por empresa especializada em manutenção de equipamentos eletromecânicos, com custos estimados em R\$ 10.000,00 anual.

Gastos de material: O custo de um motor pode ser estimado pela Equação segundo Bejan et al. (1996):

$$C_{PE,Y} = C_{PE,W} \cdot \left(\frac{X_Y}{X_W} \right)^\alpha$$

Sendo: $C_{PE,Y}$ = custo do motor de combustão interna desconhecido [US\$], $C_{PE,W}$ = custo do motor de combustão interna conhecido [US\$], XY = potência elétrica gerada pelo motor de combustão interna com custo desconhecido [kW], XW = potência elétrica gerada

pelo motor de combustão interna com valor conhecido [kW], α = expoente, que para os motores de combustão interna com potência entre 7 kW e 10 MW é de 0,81.

Ainda que o investimento inicial se faça no primeiro ano, para efeitos financeiros, a amortização ocorrerá ao longo de quinze anos (7% a.a.) para todos os equipamentos e obras feitas, com o custo anual sendo o resultado do investimento inicial multiplicado pelo fator de recuperação do capital, e acrescido de 15% (para contabilizar custos de engenharia, transporte, instalação, supervisão, taxas de serviços e contingência). O fator de recuperação de capital, frc , é dado pela Equação:

$$frc = \frac{iy_r \cdot (1 + iy_r)^{ny_r}}{(1 + iy_r)^{ny_r} - 1}$$

Onde ny_r é o número de anos considerado, e iy_r a taxa de juros correspondente.

Gastos de maquinaria e transporte: Aqui se considera a aquisição de ferramentas e equipamentos de proteção individual para os operários no valor de R\$ 1.000,00 por funcionário, e também um veículo 4x4 para deslocamento no aterro no valor de R\$ 80.000,00.

Após analisar todos os custos, observa-se que a partir do ano de 2019 o valor dos gastos reduz significativamente devido a amortização dos equipamentos, ou seja, o valor do investimento foi diluído nos anos anteriores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Segundo a EMLUR, o ASMJP recebeu, desde o início de suas atividades até 30/06/2016, 3.655.841,55 toneladas de RSU (PIMENTEL, 2017). A Tabela 14 mostra o quantitativo anual de RSU recebidos pelo Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB, entre 2003 e 2015.

Tabela 14 - Resíduos sólidos urbanos recebidos pelo aterro sanitário metropolitano de João Pessoa/PB, por município, entre 2003 e 2015.

RESÍDUOS SÓLIDOS (toneladas)								
ANO	Alhandra	Santa Rita	Conde	Cabedelo	Bayeux	João Pessoa	Outros	TOTAL
2003	n.d.*	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	414.543,88
2004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	421.795,81
2005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	466.503,31
2006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	525.731,20
2007	.	31.937,00	10.232,00	26.383,00	23.486,00	397.393,00	9.194,00	498.625,00
2008	.	51.925,66	10.973,21	38.895,26	27.026,65	330.479,94	12.592,53	471.893,25
2009	.	36.342,56	10.549,45	35.361,04	24.132,27	329.370,03	9.740,16	445.495,51
2010	.	28.853,81	9.752,04	32.503,51	23.025,71	392.818,98	10.824,51	497.778,56
2011	.	37.017,99	11.621,15	32.778,68	28.699,79	411.910,20	11.315,13	533.342,94
2012	.	43.586,93	12.195,70	31.403,80	30.067,13	431.108,46	21.867,43	570.229,45
2013	2.354,39	66.080,60	7.820,34	37.495,36	36.778,13	460.925,91	31.640,83	643.095,56
2014	5.297,24	64.546,87	11.813,45	34.296,97	27.555,75	506.784,40	69.541,43	719.836,11
2015	4.940,67	67.125,34	8.619,53	49.335,25	32.650,23	478.415,40	17.837,04	658.923,46
TOTAL	2.354,39	295.744,55	62.647,89	234.820,99	193.215,68	2.749.087,80	107.474,59	3.645.345,89

* informação detalhada por município não disponível.

Fonte: EMLUR, 2016 (2003-2006); PIMENTEL, 2017 (2007 – 2015).

5.2 EMISSÕES ANUAIS, MÉTODO USEPA

A Tabela 15 mostra os valores das emissões obtidas desde o início das atividades no aterro sanitário (2003) considerando apenas a queima do gás gerado no aterro. A Tabela 17 mostra as emissões estimadas, considerando como um aterro controlado que utiliza a tocha como dispositivo de controle.

Tabela 15 - Geração anual de CH₄ e CO₂, segundo o modelo USEPA para aterros que fazem apenas a queima do gás gerado, para o caso de João Pessoa/PB.

Não controlado		
Ano	Q _{CH₄} (m ³ /ano)	Q _{CO₂} (m ³ /ano)
2003	3.100.990,97	580.140,81
2004	6.080.390,35	1.137.533,97
2005	8.942.965,81	1.673.071,43
2006	11.693.298,07	2.187.610,17
2007	14.335.788,27	2.681.973,56
2008	16.874.664,95	3.156.952,68
2009	19.313.990,84	3.613.307,60
2010	21.657.669,40	4.051.768,59
2011	23.909.451,01	4.473.037,28
2012	26.072.939,00	4.877.787,79
2013	28.151.595,41	5.266.667,80
2014	30.148.746,54	5.640.299,61
2015	32.067.588,25	5.999.281,11

Fonte: USEPA, 2003.

A Tabela 16 mostra a comparação das taxas anuais de geração de biogás, aplicando o modelo USEPA para aterros controlados e não-controlados, para o caso de João Pessoa/PB.

Tabela 16 - Geração anual de CH₄ e CO₂, segundo o modelo USEPA para aterros controlados, para o caso de João Pessoa/PB

Geração Anual de CH ₄ e CO ₂ Aterro Controlado						
Ano	UM CH ₄ kg/ano	CM CH ₄ kg/ano	Q CH ₄ * m ³ /ano	UM CO ₂ kg/ano	CM CO ₂ kg/ano	Q CO ₂ * m ³ /ano
2003	1.355.508,04	347.010,06	2.071.461,97	2.711.016,08	3.080.700,09	1.506.517,80
2004	2.657.865,85	680.413,66	4.061.700,75	5.315.731,70	10.797.580,01	2.953.964,18
2005	3.909.157,48	1.000.744,31	5.973.901,16	7.818.314,95	15.880.952,25	4.344.655,39
2006	5.111.385,26	1.308.514,63	7.811.123,11	10.222.770,52	20.765.002,61	5.680.816,81
2007	6.266.473,02	1.604.217,09	9.576.306,57	12.532.946,03	25.457.546,62	6.964.586,59
2008	7.376.269,13	1.888.324,90	11.272.276,18	14.752.538,27	29.966.093,35	8.198.019,04
2009	8.442.549,52	2.161.292,68	12.901.745,88	16.885.099,05	34.297.857,44	9.383.087,91
2010	9.467.020,46	2.423.557,24	14.467.323,16	18.934.040,92	38.459.770,62	10.521.689,57
2011	10.451.321,32	2.675.538,26	15.971.513,28	20.902.642,63	42.458.492,85	11.615.646,02
2012	11.397.027,19	2.917.638,96	17.416.723,25	22.794.054,37	46.300.422,94	12.666.707,82
2013	12.305.651,40	3.150.246,76	18.805.265,73	24.611.302,80	49.991.708,80	13.676.556,90
2014	13.178.647,94	3.373.733,87	20.139.362,69	26.357.295,89	53.538.257,27	14.646.809,23
2015	14.017.413,81	3.588.457,93	21.421.148,95	28.034.827,61	56.945.743,59	15.579.017,42

Fonte: USEPA, 2003.

* = CH₄: 0,668 kg/m³; CO₂: 1,842 kg/m³.

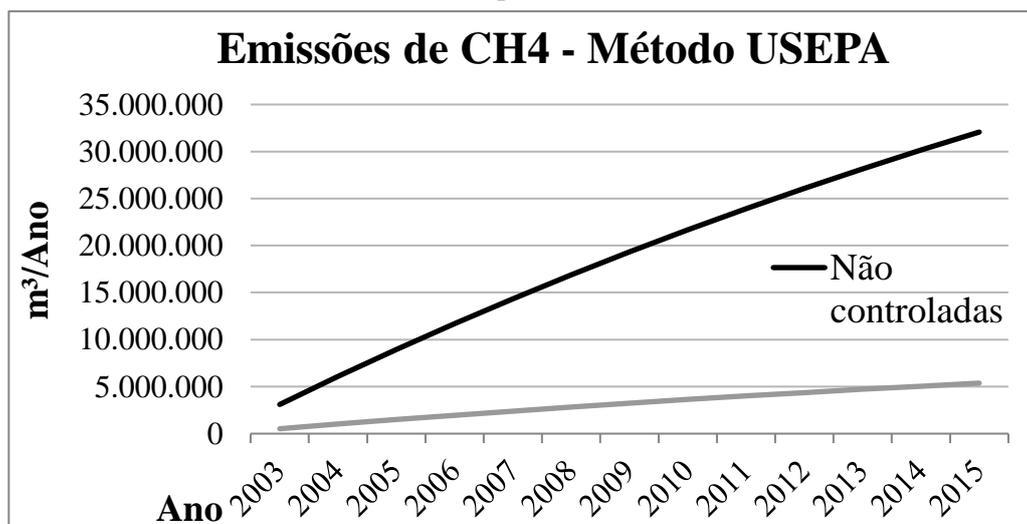
Tabela 17 - Taxas de geração de CH₄ para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB, modelo USEPA.

Ano	Não controladas	Controladas
	QCH ₄ m ³ /ano	CH ₄ m ³ /ano
2003	3.100.990,97	519.476,13
2004	6.080.390,35	1.018.583,32
2005	8.942.965,81	1.498.120,23
2006	11.693.298,07	1.958.854,23
2007	14.335.788,27	2.401.522,59
2008	16.874.664,95	2.826.833,68
2009	19.313.990,84	3.235.468,08
2010	21.657.669,40	3.628.079,70
2011	23.909.451,01	4.005.296,79
2012	26.072.939,00	4.367.722,99
2013	28.151.595,41	4.715.938,26
2014	30.148.746,54	5.050.499,81
2015	32.067.588,25	5.371.943,02

Fonte: USEPA, 2003.

Estendendo-se a análise, até o final da vida útil do aterro (vida útil: 25 anos), onde em 2028 já não se deposita mais RSU, a Figura 9 mostra a curva de geração de biogás, dependendo do modelo USEPA aplicado. Aqui se utilizou a função de previsão para obter o valor de RSU coletados entre 2017 e 2027 (fim da vida útil do aterro).

Figura 9 - Geração anual de biogás, de acordo com os modelos USEPA, para o aterro sanitário metropolitano de João Pessoa.



Fonte: USEPA, 2003.

O método USEPA foi desenvolvido para ser um método rápido e fácil de ser aplicado, para estimar de maneira geral a taxa de geração de biogás em um aterro, baseado em utilizar o modelo mais simples possível, disponível, que fosse consistente com princípios fundamentais (VIGIL, 1998).

Segundo a ABRELPE (2013), justamente por causa das incertezas embutidas na estimativa de L_0 e K , as estimativas para as taxas de geração de biogás ficam ao redor de $\pm 50\%$, exceto se o modelo puder ser calibrado com os dados reais a partir de um sistema de coleta de gás razoavelmente abrangente.

Finalmente, considerou-se que o método USEPA não é o mais adequado por considerar que a geração de resíduos é considerada por meio de um valor constante ao longo dos anos (MENDES; MAGALHÃES SOBRINHO, 2008; DARÁS et al., 2013).

5.3 EMISSÕES ANUAIS, MÉTODO IPCC

A partir dos valores de geração anual de RSU coletados e encaminhados pela EMLUR ao Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (Tabela 9), foi feito o cálculo para estimar o CH_4 emitido no aterro sanitário, utilizando o método simples do IPCC (seção 4.2.1). A Tabela 18 mostra os valores de CH_4 emitido.

Tabela 18 - Quantidade de CH_4 emitido, através do método simples do IPCC, para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.

IPCC simples	
Ano	CH_4 (m ³ /ano)
2003	3.860.151,85
2004	3.927.680,41
2005	4.343.987,96
2006	4.895.506,50
2007	4.643.098,86
2008	4.394.178,01
2009	4.148.367,40
2010	4.635.216,98
2011	4.966.385,56
2012	5.309.865,55
2013	5.988.380,57
2014	6.702.973,62
2015	6.135.766,89

Fonte: IPCC, 2003.

Utilizando-se o método DPO desenvolvido pelo IPCC e utilizando os valores de geração de RSU coletados e encaminhados pela EMLUR ao Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (Tabela 15), foram calculados os valores de CH₄ gerado.

A Tabela 19 mostra os valores de CH₄ gerado, por ano.

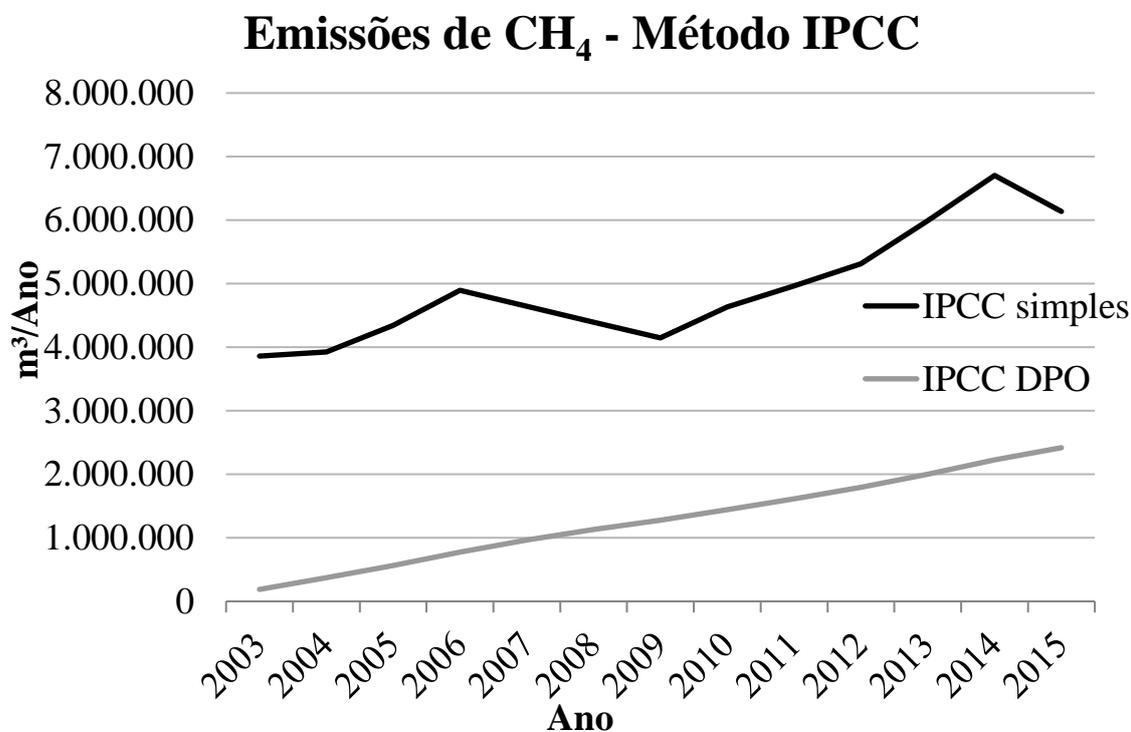
Tabela 19 - Quantidade de CH₄ gerado, através do método DPO do IPCC, para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.

IPCC DPO	
Ano	CH₄ Gerado (m³/ano)
2003	188.261,83
2004	370.635,42
2005	564.418,11
2006	775.647,79
2007	964.265,60
2008	1.131.544,40
2009	1.278.676,60
2010	1.442.377,00
2011	1.614.244,93
2012	1.794.482,47
2013	1.999.021,30
2014	2.228.435,76
2015	2.418.998,55

Fonte: IPCC, 2003.

O método DPO gera um perfil de emissões de CH₄ que depende do tempo transcorrido e que reflete melhor as verdadeiras pautas do processo de degradação ao longo do tempo (BORBA, 2006). Sendo assim, o método DPO do IPCC é uma metodologia mais precisa do que o método USEPA para estimar a geração de CH₄ produzido no aterro sanitário. A comparação dos métodos IPCC está mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Emissão e geração anual de CH₄, através de método simples e método DPO respectivamente. Para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.



Fonte: IPCC, 2003.

O método IPCC foi uma metodologia de fácil aplicação para cálculo de emissão de metano a partir de resíduos sólidos, para países ou regiões específicas, que levam em consideração, a quantidade de RSU depositado no aterro sanitário, a composição do resíduo depositado e a fração de carbono degradado (MENDES & SOBRINHO, 2005).

É um método um pouco mais detalhado que o USEPA, porém Mendes e Magalhães Sobrinho (2008) mencionaram que ambos são chamados "métodos de inventário" (*e.g.*, IPCC e USEPA) são aproximações grosseiras, já que utilizam dados do censo populacional, taxa de resíduos coletados e condições do local, de disposição dos resíduos.

5.4 EMISSÕES ANUAIS, MÉTODO GasSim

A Tabela 20 mostra a geração de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB. Utilizou-se a função *previsão* do Excel para estimar a disposição de RSU entre 2016 e 2028 (anos para os quais não há dados). A partir de 2028 até 2042, não houve disposição de RSU no aterro, mas introduziram-se fatores de correção para degradação de matéria orgânica.

Para efeitos de comparação, foram estabelecidos dois cenários alternativos, um otimista e um pessimista; seus resultados estão dispostos nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Geração de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.

Ano	t/ano RSU	CENÁRIO MAIS PROVÁVEL			CH4 tonelada		CH4	Biogás captável t	Biogás total m ³	Biogás total m ³ /h
		MO	FRD	FLD	FRD	FLD	Total			
2003	414.543,88	236.290,01	70.887,00	59.072,50	0,33	0,00	0,33	0,47	484,61	0,06
2004	421.795,81	240.423,61	72.127,08	60.105,90	0,47	0,00	0,47	0,68	697,33	0,08
2005	466.503,31	265.906,89	79.772,07	66.476,72	0,73	10,54	11,27	16,40	16.748,07	1,91
2006	525.731,20	299.666,78	89.900,03	74.916,70	1,17	14,12	15,29	22,25	22.722,17	2,59
2007	498.625,00	284.216,25	85.264,88	71.054,06	1,57	15,92	17,49	25,45	25.999,14	2,97
2008	471.893,25	268.979,15	80.693,75	67.244,79	2,10	17,92	20,02	29,13	29.757,29	3,40
2009	445.495,51	253.932,44	76.179,73	63.483,11	2,80	20,12	22,92	33,36	34.070,88	3,89
2010	497.778,56	283.733,78	85.120,13	70.933,44	4,43	26,74	31,17	45,35	46.319,88	5,29
2011	533.342,94	304.005,48	91.201,64	76.001,37	6,71	34,07	40,78	59,33	60.606,64	6,92
2012	570.229,45	325.030,79	97.509,24	81.257,70	10,15	43,31	53,46	77,79	79.458,39	9,07
2013	643.095,56	366.564,47	109.969,34	91.641,12	16,19	58,09	74,28	108,08	110.394,68	12,60
2014	719.836,11	410.306,58	123.091,97	102.576,65	25,62	77,33	102,95	149,79	153.006,97	17,47
2015	658.923,46	375.586,37	112.675,91	93.896,59	33,17	84,18	117,35	170,74	174.403,31	19,91
2016	677.971,23	386.443,60	115.933,08	96.610,90	48,27	103,00	151,26	220,09	224.810,24	25,66
2017	699.354,00	398.631,78	119.589,53	99.657,94	70,41	126,35	196,76	286,29	292.427,51	33,38
2018	720.736,77	410.819,96	123.245,99	102.704,99	102,62	154,85	257,47	374,62	382.655,66	43,68
2019	742.119,54	423.008,14	126.902,44	105.752,03	149,43	189,61	339,05	493,31	503.893,02	57,52
2020	763.502,31	435.196,31	130.558,89	108.799,08	217,42	231,98	449,41	653,88	667.910,85	76,25
2021	784.885,07	447.384,49	134.215,35	111.846,12	316,09	283,60	599,69	872,56	891.272,88	101,74
2022	806.267,84	459.572,67	137.871,80	114.893,17	459,20	346,45	805,65	1.172,22	1.197.366,56	136,69
2023	827.650,61	471.760,85	141.528,25	117.940,21	666,63	422,93	1.089,56	1.585,31	1.619.312,47	184,85

Previsão

	2024	849.033,38	483.949,03	145.184,71	120.987,26	967,11	515,94	1.483,06	2.157,85	2.204.134,57	251,61
	2025	870.416,15	496.137,21	148.841,16	124.034,30	1.402,15	629,01	2.031,17	2.955,35	3.018.741,16	344,61
	2026	891.798,92	508.325,38	152.497,62	127.081,35	2.031,66	766,40	2.798,06	4.071,18	4.158.506,85	474,72
	2027	913.181,69	520.513,56	156.154,07	130.128,39	2.942,09	933,27	3.875,35	5.638,64	5.759.590,39	657,49
Encerramento	2028	-	520.513,56	156.154,07	130.128,39	5.884,17	1.866,53	7.750,71	11.277,28	11.519.180,78	1.314,97
	2029	-	499.693,02	149.907,91	124.923,25	5.422,85	1.720,20	7.143,05	10.393,14	10.616.077,01	1.211,88
	2030	-	478.872,48	143.661,74	119.718,12	4.980,36	1.579,83	6.560,20	9.545,09	9.749.834,62	1.112,99
	2031	-	458.051,93	137.415,58	114.512,98	4.556,70	1.445,44	6.002,15	8.733,12	8.920.453,60	1.018,32
	2032	-	437.231,39	131.169,42	109.307,85	4.151,87	1.317,03	5.468,90	7.957,25	8.127.933,96	927,85
	2033	-	416.410,85	124.923,25	104.102,71	3.765,87	1.194,58	4.960,45	7.217,46	7.372.275,70	841,58
	2034	-	395.590,31	118.677,09	98.897,58	3.398,70	1.078,11	4.476,81	6.513,76	6.653.478,82	759,53
	2035	-	374.769,76	112.430,93	93.692,44	3.050,35	967,61	4.017,97	5.846,14	5.971.543,32	681,68
	2036	-	353.949,22	106.184,77	88.487,31	2.720,84	863,09	3.583,93	5.214,61	5.326.469,19	608,04
	2037	-	333.128,68	99.938,60	83.282,17	2.410,16	764,53	3.174,69	4.619,17	4.718.256,45	538,61
	2038	-	312.308,14	93.692,44	78.077,03	2.118,30	671,95	2.790,25	4.059,82	4.146.905,08	473,39
	2039	-	291.487,59	87.446,28	72.871,90	1.845,28	585,35	2.430,62	3.536,55	3.612.415,09	412,38
	2040	-	270.667,05	81.200,12	67.666,76	1.591,08	504,71	2.095,79	3.049,38	3.114.786,48	355,57
	2041	-	249.846,51	74.953,95	62.461,63	1.355,71	430,05	1.785,76	2.598,28	2.654.019,25	302,97
	2042	-	229.025,97	68.707,79	57.256,49	1.139,18	361,36	1.500,54	2.183,28	2.230.113,40	254,58

Tabela 21 - Cenário otimista para geração de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.

Ano	t/ano RSU	CENÁRIO OTIMISTA			CH4 tonelada		CH4	Biogás	Biogás	Biogás
		MO	FRD	FLD	FRD	FLD	t	captável t	total m3	total m3/h
2003	414.543,88	269.453,52	80.836,06	67.363,38	0,37		0,37	0,54	552,62	0,06
2004	421.795,81	274.167,28	82.250,18	68.541,82	0,54		0,54	0,78	795,20	0,09
2005	466.503,31	303.227,15	90.968,15	75.806,79	0,84	12,01	12,85	18,70	19.098,67	2,18
2006	525.731,20	341.725,28	102.517,58	85.431,32	1,33	16,10	17,43	25,37	25.911,25	2,96
2007	498.625,00	324.106,25	97.231,88	81.026,56	1,79	18,16	19,95	29,03	29.648,14	3,38
2008	471.893,25	306.730,61	92.019,18	76.682,65	2,39	20,44	22,83	33,22	33.933,76	3,87
2009	445.495,51	289.572,08	86.871,62	72.393,02	3,20	22,95	26,14	38,04	38.852,75	4,44
2010	497.778,56	323.556,06	97.066,82	80.889,02	5,05	30,49	35,54	51,71	52.820,92	6,03
2011	533.342,94	346.672,91	104.001,87	86.668,23	7,65	38,85	46,50	67,66	69.112,84	7,89
2012	570.229,45	370.649,14	111.194,74	92.662,29	11,57	49,39	60,97	88,71	90.610,45	10,34
2013	643.095,56	418.012,11	125.403,63	104.503,03	18,46	66,25	84,70	123,25	125.888,67	14,37
2014	719.836,11	467.893,47	140.368,04	116.973,37	29,22	88,18	117,40	170,82	174.481,63	19,92
2015	658.923,46	428.300,25	128.490,07	107.075,06	37,83	95,99	133,82	194,70	198.880,97	22,70
2016	677.971,23	440.681,30	132.204,39	110.170,33	55,04	117,45	172,49	250,98	256.362,55	29,27
2017	699.354,00	454.580,10	136.374,03	113.645,02	80,29	144,08	224,38	326,47	333.469,97	38,07
2018	720.736,77	468.478,90	140.543,67	117.119,72	117,02	176,58	293,61	427,20	436.361,72	49,81
2019	742.119,54	482.377,70	144.713,31	120.594,42	170,41	216,22	386,63	562,55	574.614,85	65,60
2020	763.502,31	496.276,50	148.882,95	124.069,12	247,94	264,54	512,48	745,66	761.652,73	86,95
2021	784.885,07	510.175,30	153.052,59	127.543,82	360,46	323,41	683,86	995,02	1.016.363,81	116,02
2022	806.267,84	524.074,10	157.222,23	131.018,52	523,65	395,07	918,72	1.336,74	1.365.418,01	155,87
2023	827.650,61	537.972,90	161.391,87	134.493,22	760,19	482,29	1.242,48	1.807,81	1.846.584,40	210,80

Previsão

	2024	849.033,38	551.871,70	165.561,51	137.967,92	1.102,85	588,36	1.691,21	2.460,70	2.513.486,79	286,93
	2025	870.416,15	565.770,50	169.731,15	141.442,62	1.598,95	717,30	2.316,24	3.370,13	3.442.424,13	392,97
	2026	891.798,92	579.669,30	173.900,79	144.917,32	2.316,80	873,97	3.190,77	4.642,57	4.742.156,93	541,34
	2027	913.181,69	593.568,10	178.070,43	148.392,02	3.355,01	1.064,25	4.419,26	6.430,03	6.567.953,96	749,77
Encerramento	2028	-	593.568,10	178.070,43	148.392,02	6.710,02	2.128,50	8.838,52	12.860,05	13.135.907,91	1.499,53
	2029	-	569.825,37	170.947,61	142.456,34	6.183,96	1.961,63	8.145,58	11.851,83	12.106.052,73	1.381,97
	2030	-	546.082,65	163.824,79	136.520,66	5.679,36	1.801,57	7.480,93	10.884,75	11.118.232,46	1.269,20
	2031	-	522.339,93	156.701,98	130.584,98	5.196,24	1.648,31	6.844,55	9.958,83	10.172.447,09	1.161,24
	2032	-	498.597,20	149.579,16	124.649,30	4.734,59	1.501,87	6.236,46	9.074,05	9.268.696,62	1.058,07
	2033	-	474.854,48	142.456,34	118.713,62	4.294,41	1.362,24	5.656,66	8.230,43	8.406.981,06	959,70
	2034	-	451.111,75	135.333,53	112.777,94	3.875,71	1.229,42	5.105,13	7.427,97	7.587.300,41	866,13
	2035	-	427.369,03	128.210,71	106.842,26	3.478,47	1.103,42	4.581,89	6.666,65	6.809.654,66	777,36
	2036	-	403.626,31	121.087,89	100.906,58	3.102,71	984,22	4.086,93	5.946,49	6.074.043,82	693,38
	2037	-	379.883,58	113.965,07	94.970,90	2.748,42	871,84	3.620,26	5.267,48	5.380.467,88	614,21
	2038	-	356.140,86	106.842,26	89.035,21	2.415,61	766,26	3.181,87	4.629,62	4.728.926,85	539,83
	2039	-	332.398,13	99.719,44	83.099,53	2.104,26	667,50	2.771,76	4.032,91	4.119.420,72	470,25
	2040	-	308.655,41	92.596,62	77.163,85	1.814,39	575,55	2.389,94	3.477,36	3.551.949,50	405,47
	2041	-	284.912,69	85.473,81	71.228,17	1.545,99	490,41	2.036,40	2.962,96	3.026.513,18	345,49
	2042	-	261.169,96	78.350,99	65.292,49	1.299,06	412,08	1.711,14	2.489,71	2.543.111,77	290,31

Tabela 22 - Cenário pessimista de geração de biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.

Ano	t/ano RSU	CENÁRIO PESSIMISTA			CH4 tonelada		CH4	Biogás	Biogás	Biogás
		MO	FRD	FLD	FRD	FLD	t	captável	total	total
							Total	t	m3	m3/h
2003	414.543,88	207.271,94	51.817,98	62.181,58	0,24		0,24	0,34	350,59	0,04
2004	421.795,81	210.897,90	52.724,48	63.269,37	0,34		0,34	0,49	504,49	0,06
2005	466.503,31	233.251,66	58.312,91	69.975,50	0,54	11,09	11,63	16,74	17.100,61	1,95
2006	525.731,20	262.865,60	65.716,40	78.859,68	0,85	14,86	15,72	22,63	23.118,16	2,64
2007	498.625,00	249.312,50	62.328,13	74.793,75	1,15	16,76	17,91	25,79	26.343,18	3,01
2008	471.893,25	235.946,63	58.986,66	70.783,99	1,53	18,87	20,40	29,38	30.007,19	3,43
2009	445.495,51	222.747,76	55.686,94	66.824,33	2,05	21,18	23,23	33,45	34.168,12	3,90
2010	497.778,56	248.889,28	62.222,32	74.666,78	3,24	28,14	31,38	45,19	46.159,43	5,27
2011	533.342,94	266.671,47	66.667,87	80.001,44	4,91	35,86	40,77	58,70	59.963,28	6,85
2012	570.229,45	285.114,73	71.278,68	85.534,42	7,42	45,59	53,01	76,34	77.976,73	8,90
2013	643.095,56	321.547,78	80.386,95	96.464,33	11,83	61,15	72,98	105,09	107.349,03	12,25
2014	719.836,11	359.918,06	89.979,51	107.975,42	18,73	81,40	100,13	144,18	147.277,31	16,81
2015	658.923,46	329.461,73	82.365,43	98.838,52	24,25	88,61	112,85	162,51	165.997,07	18,95
2016	677.971,23	338.985,62	84.746,40	101.695,68	35,28	108,42	143,70	206,93	211.368,28	24,13
2017	699.354,00	349.677,00	87.419,25	104.903,10	51,47	133,00	184,47	265,64	271.333,75	30,97
2018	720.736,77	360.368,38	90.092,10	108.110,52	75,02	163,00	238,01	342,74	350.093,24	39,96
2019	742.119,54	371.059,77	92.764,94	111.317,93	109,24	199,59	308,83	444,71	454.248,94	51,85
2020	763.502,31	381.751,15	95.437,79	114.525,35	158,93	244,19	403,13	580,50	592.955,17	67,69
2021	784.885,07	392.442,54	98.110,63	117.732,76	231,06	298,53	529,59	762,61	778.968,88	88,92
2022	806.267,84	403.133,92	100.783,48	120.940,18	335,67	364,68	700,36	1.008,51	1.030.147,63	117,60

Previsão

	2023	827.650,61	413.825,31	103.456,33	124.147,59	487,30	445,19	932,49	1.342,79	1.371.588,72	156,57
	2024	849.033,38	424.516,69	106.129,17	127.355,01	706,96	543,10	1250,05	1.800,08	1.838.687,66	209,90
	2025	870.416,15	435.208,08	108.802,02	130.562,42	1024,96	662,12	1687,09	2.429,40	2.481.515,17	283,28
	2026	891.798,92	445.899,46	111.474,86	133.769,84	1485,13	806,74	2291,87	3.300,29	3.371.086,26	384,83
	2027	913.181,69	456.590,84	114.147,71	136.977,25	2150,65	982,39	3133,03	4.511,57	4.608.344,55	526,07
Encerramento	2028	-	456.590,84	114.147,71	34.244,31	4301,30	491,19	4792,49	6.901,18	7.049.217,19	804,71
	2029	-	438.327,21	109.581,80	32.874,54	3964,07	452,68	4416,76	6.360,13	6.496.558,56	741,62
	2030	-	420.063,58	105.015,89	31.504,77	3640,62	415,75	4056,36	5.841,16	5.966.457,43	681,10
	2031	-	401.799,94	100.449,99	30.135,00	3330,92	380,38	3711,30	5.344,28	5.458.913,79	623,16
	2032	-	383.536,31	95.884,08	28.765,22	3034,99	346,59	3381,58	4.869,48	4.973.927,65	567,80
	2033	-	365.272,68	91.318,17	27.395,45	2752,83	314,36	3067,19	4.416,76	4.511.499,00	515,01
	2034	-	347.009,04	86.752,26	26.025,68	2484,43	283,71	2768,14	3.986,12	4.071.627,85	464,80
	2035	-	328.745,41	82.186,35	24.655,91	2229,79	254,63	2484,43	3.577,57	3.654.314,19	417,16
	2036	-	310.481,77	77.620,44	23.286,13	1988,92	227,13	2216,05	3.191,11	3.259.558,03	372,10
	2037	-	292.218,14	73.054,54	21.916,36	1761,81	201,19	1963,00	2.826,72	2.887.359,36	329,61
	2038	-	273.954,51	68.488,63	20.546,59	1548,47	176,83	1725,30	2.484,43	2.537.718,19	289,69
	2039	-	255.690,87	63.922,72	19.176,82	1348,89	154,04	1502,92	2.164,21	2.210.634,51	252,36
	2040	-	237.427,24	59.356,81	17.807,04	1163,07	132,82	1295,89	1.866,08	1.906.108,33	217,59
	2041	-	219.163,61	54.790,90	16.437,27	991,02	113,17	1104,19	1.590,03	1.624.139,64	185,40
	2042	-	200.899,97	50.224,99	15.067,50	832,73	95,10	927,83	1.336,07	1.364.728,45	155,79

Para o caso do Aterro Metropolitano de João Pessoa (Cenário mais provável), os parâmetros utilizados foram Matéria Orgânica ($MO = 0,57$), Fração Rapidamente Degradada ($FRD = 0,30$) e Fração Lentamente Degradada ($FLD = 0,25$). A aplicação do método GasSim (seção 5.4) e suas respectivas equações resultaram nas emissões anuais.

Com a fração de matéria orgânica estimada nos RSU dispostos no aterro, pode-se especificar a fração rapidamente (FRD) e lentamente (FLD) degradada. O valor de k utilizado para FRD foi 0,346574 e para FLD foi 0,173287. Os valores de COD para FRD e FLD, foram respectivamente 0,16392 e 0,1366.

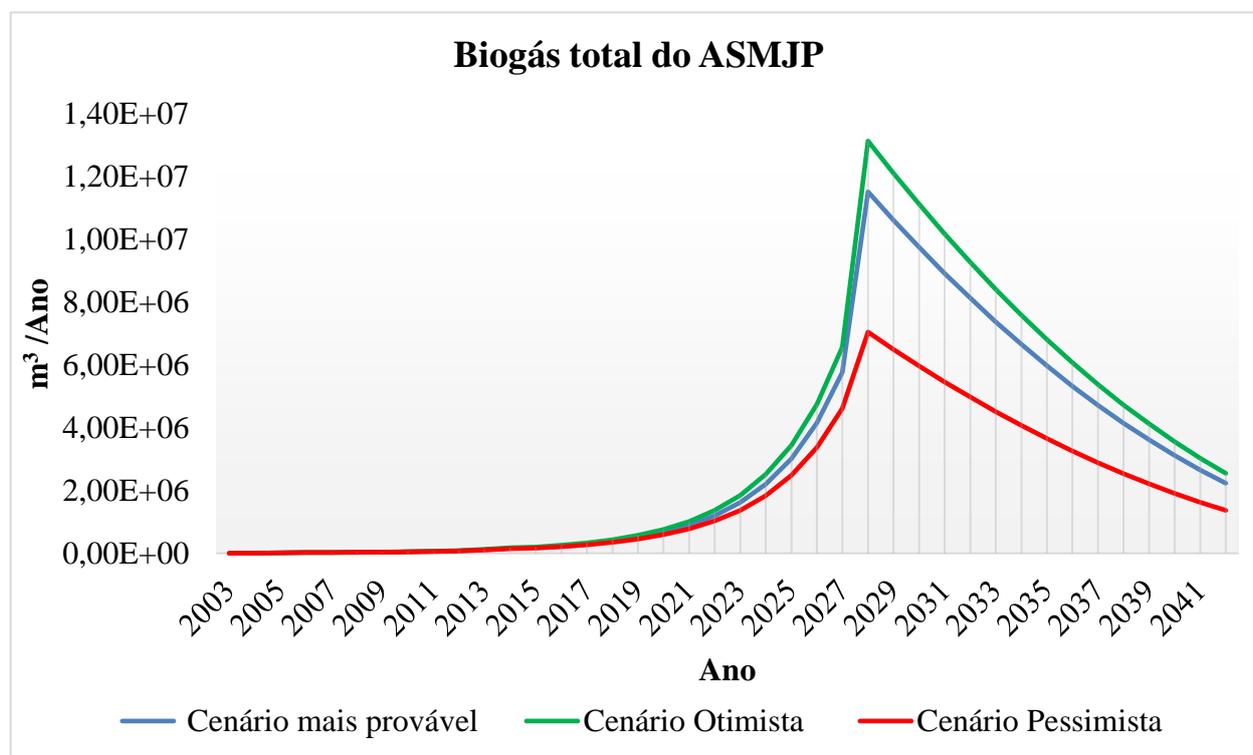
Aplicação da Equação 17 para as frações rapidamente e lentamente degradadas resultou na produção de metano para cada fração. Considerou-se que a fração lentamente degradada só começa sua degradação três anos após o início da disposição de RSU no aterro.

A quantidade total de metano gerado foi a soma das frações FRD e FLD, em toneladas. Para calcular a quantidade de biogás captável Equação 23, utilizou-se uma eficiência de captação do sistema = 75% e uma capacidade de produção = 97%. Considerou-se que o metano correspondeu a 50% do biogás gerado no aterro. Conversão de toneladas para m^3 de biogás utilizou a densidade $0,979 m^3/kg$.

Para efeitos de comparação, foram estabelecidos dois cenários alternativos: otimista (todos parâmetros constantes, exceto $MO = 0,65$; $FRD = 0,30$ e $FLD = 0,25$) e pessimista (todos parâmetros constantes, exceto $MO = 0,50$; $FRD = 0,25$ e $FLD = 0,30$). Os resultados estão dispostos nas Tabelas 22 e 23.

A Figura 11 mostra a curva de geração de biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, para os três cenários elaborados, foi utilizado o método GasSim. Nos três cenários, a curva comporta-se da mesma forma: tendo seu pico em 2028, ano em que se encerra a vida útil do aterro sanitário, havendo em seguida, um declínio na produção de biogás.

Figura 11 - Biogás gerado em três cenários utilizando-se o método GasSim, para o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/ PB.



5.5 ENERGIA DISPONÍVEL ANUALMENTE NO ATERRO

Para o biogás gerado no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa foi utilizada a Equação 28 para cálculo do PCI = 5,417 kWh/Nm³ e a energia disponível anualmente no aterro está apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 - Energia disponível produzida anualmente no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.

	Biogás total	Energia disponível		Biogás total	Energia disponível	
Ano	Nm ³ /h	kWh		Ano	Nm ³ /h	kWh
2003	0,06	0,30	Encerramento	2028	1.314,97	7.122,82
2004	0,08	0,43		2029	1.211,88	6.564,82
2005	1,91	10,36		2030	1.112,99	6.028,76
2006	2,59	14,05		2031	1.018,32	5.515,91
2007	2,97	16,08		2032	927,85	5.025,86
2008	3,40	18,40		2033	841,58	4.558,61
2009	3,89	21,07		2034	759,53	4.114,14
2010	5,29	28,64		2035	681,68	3.692,47
2011	6,92	37,48		2036	608,04	3.293,59
2012	9,07	49,13		2037	538,61	2.917,51
2013	12,60	68,26		2038	473,39	2.564,22
2014	17,47	94,61		2039	412,38	2.233,72
2015	19,91	107,84		2040	355,57	1.926,01
2016	25,66	139,01		2041	302,97	1.641,10
2017	33,38	180,82		2042	254,58	1.378,98
Previsão						
2018	43,68	236,61				
2019	57,52	311,58				
2020	76,25	413,00				
2021	101,74	551,11				
2022	136,69	740,39				
2023	184,85	1.001,29				
2024	251,61	1.362,91				
2025	344,61	1.866,62				
2026	474,72	2.571,39				
2027	657,49	3.561,41				

A partir da energia disponível (Tabela 23) e das características técnicas dos motores (Tabela 12), considerando-se as restrições de produção e operação já mencionadas, construiu-se o gráfico mostrado na Figura 12, que compara a produção de eletricidade para os motores pesquisados.

5.6 MOTOR A BIOGÁS E PLANTA DE COGERAÇÃO

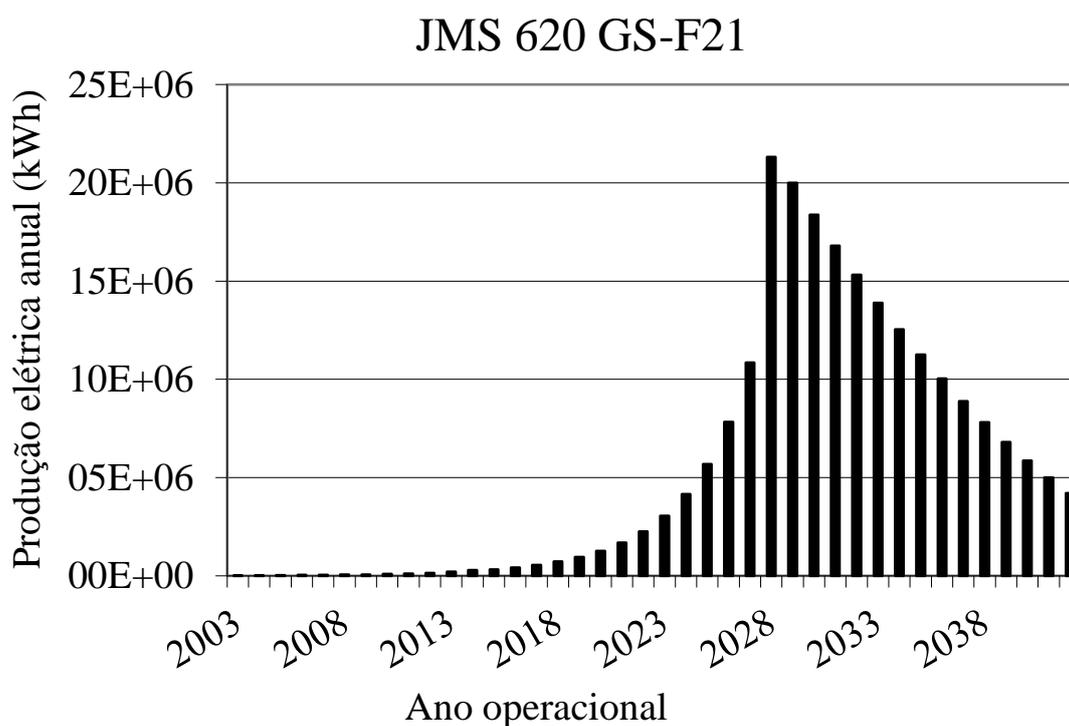
O critério para a escolha do motor foi a produção total de eletricidade durante os anos de vida do aterro. Seguindo este critério, o motor Jenbacher JMS 620 GS-F21 foi o selecionado para instalação no aterro (curva azul royal da Figura 12). Durante sua vida útil, este motor produzirá em 2028 (ano de encerramento do aterro e aonde chegará à sua produção máxima de biogás) aproximadamente 7.122,82 kWh. Detalhes do seu funcionamento estão dispostos na Tabela 24, graficamente mostrado na Figura 13.

Tabela 24- Funcionamento do motor JENBACHER JMS 620 GS-F21.

ANO	HORAS DE ACUMULAÇÃO BIOGÁS (n°)	HORAS ANUAIS FUNCIONAMENTO 100%	PRODUÇÃO ELÉTRICA ANUAL (kWh)
2003	23.300,23	0,38	912,84
2004	16.192,49	0,54	1.313,53
2005	674,19	12,99	31.547,74
2006	496,93	17,63	42.800,94
2007	434,30	20,17	48.973,64
2008	379,45	23,09	56.052,75
2009	331,41	26,43	64.178,09
2010	243,77	35,94	87.251,10
2011	186,31	47,02	114.162,57
2012	142,11	61,64	149.672,93
2013	102,28	85,65	207.946,50
2014	73,80	118,70	288.213,76
2015	64,74	135,30	328.517,28
2016	50,23	174,41	423.466,99
2017	38,61	226,87	550.835,24
2018	29,51	296,87	720.794,78
2019	22,41	390,92	949.165,25
2020	16,91	518,17	1.258.119,77
2021	12,67	691,46	1.678.858,83
2022	9,43	928,93	2.255.436,54
2023	6,97	1.256,28	3.050.240,95
2024	5,12	1.709,99	4.151.849,39
2025	3,74	2.341,97	5.686.294,68
2026	2,72	3.226,21	7.833.230,51
2027	1,96	4.468,34	10.849.134,28
2028	0,98	8.936,68	21.313.080,00
2029	1,06	8.236,05	19.997.124,30
2030	1,16	7.564,01	18.365.414,51
2031	1,27	6.920,57	16.803.139,17
2032	1,39	6.305,72	15.310.298,29
2033	1,53	5.719,48	13.886.891,88

2034	1,70	5.161,83	12.532.919,92
2035	1,89	4.632,78	11.248.382,42
2036	2,12	4.132,32	10.033.279,38
2037	2,39	3.660,47	8.887.610,80
2038	2,72	3.217,21	7.811.376,68
2039	3,13	2.802,54	6.804.577,02
2040	3,63	2.416,48	5.867.211,82
2041	4,25	2.059,01	4.999.281,08
2042	5,06	1.730,14	4.200.784,79

Figura 13 - Produção anual de eletricidade do motor Jenbacher JMS 620 GS-F21, instalado no ASMJP.



Considerando-se a quantidade de calor útil necessária para o tratamento de lixiviado, os dados utilizados para realizar os cálculos da Equação 30 são: C_p (água): 1,01 kJ/kg·K, $T_s = 363^\circ\text{C}$, e quantidade de água 230 kg (segundo fabricante). A Tabela 25 mostra as características técnicas do motor 620 J GS (CLIMATICUS 4.2, 2005).

Tabela 25 - Especificações técnicas do motor Jenbacher 620 J GS (GE POWER, 2016).

	Potência Elétrica (kW)	Potência Térmica (kW)	Energia Consumida (kW)	Rendimento Elétrico	Rendimento Térmico
JMS 620 GS	3.017	2.901	6.982	43,21%	41,55%

Fonte: (GE POWER, 2016).

A Tabela 26 mostra a quantidade de calor útil necessária para o tratamento de lixiviado.

Tabela 26 - Quantificação do calor útil para tratamento de lixiviado.

Mês	Temperatura ambiente (K)	Calor útil (kJ)	Calor útil (kW)
Janeiro	298,95	14.805,16	4,11
Fevereiro	298,35	14.943,85	4,15
Março	301,35	14.250,40	3,96
Abril	298,65	14.874,50	4,13
Mai	300,15	14.527,78	4,04
Junho	299,35	14.712,70	4,09
Julho	296,85	15.290,57	4,25
Agosto	298,55	14.897,62	4,14
Setembro	300,65	14.412,20	4,00
Outubro	300,85	14.365,97	3,99
Novembro	300,15	14.527,78	4,04
Dezembro	297,25	15.198,11	4,22
		TOTAL	49,12

A quantidade de calor necessária por ano é $8760 \cdot 49,12 = 430.263,90$ kWh. Consulta aos dados técnicos do fabricante do motor Jenbacher 620 GS-F21 retorna o resultado de 418 kW a dissipar (calor das camisas). A Tabela 27 mostra o resultado anual para o calor dissipado pelas camisas do motor, que deve ser acrescido do calor produzido (obtido a partir do rendimento térmico, e limitado pela capacidade nominal do equipamento).

Tabela 27 - Calor cogerado pelo motor Jenbacher 620 J GS-C21 de acordo com a produção de biogás no ASMJP.

Ano	Biogás (kWh)	Horas de acumulação de biogás (nº)	Horas de funcionamento a 100% (nº)	Produção elétrica anual (kWh)	Calor aproveitado das camisas (kW)
2003	0,11	23.300,23	0,38	912,84	157,15
2004	0,16	16.192,49	0,54	1.313,53	226,13
2005	3,15	674,19	12,99	31.547,74	5.431,20
2006	4,37	496,93	17,63	42.800,94	7.368,53
2007	6,28	434,30	20,17	48.973,64	8.431,21
2008	7,73	379,45	23,09	56.052,75	9.649,94
2009	10,36	331,41	26,43	64.178,09	11.048,78
2010	12,10	243,77	35,94	87.251,10	15.020,99
2011	16,24	186,31	47,02	114.162,57	19.654,02
2012	20,60	142,11	61,64	149.672,93	25.767,42
2013	24,98	102,28	85,65	207.946,50	35.799,69
2014	32,97	73,80	118,70	288.213,76	49.618,35
2015	40,68	64,74	135,30	328.517,28	56.556,93
2016	55,25	50,23	174,41	423.466,99	72.903,30
2017	72,11	38,61	226,87	550.835,24	94.830,78
2018	94,66	29,51	296,87	720.794,78	124.090,70
2019	125,02	22,41	390,92	949.165,25	163.406,54
2020	166,18	16,91	518,17	1.258.119,77	216.595,58
2021	222,33	12,67	691,46	1.678.858,83	289.029,24
2022	299,43	9,43	928,93	2.255.436,54	388.291,79
2023	405,90	6,97	1.256,28	3.050.240,95	525.123,85
2024	553,72	5,12	1.709,99	4.151.849,39	714.774,73
2025	759,96	3,74	2.341,97	5.686.294,68	978.942,00
2026	1.048,99	2,72	3.226,21	7.833.230,51	1.348.554,51
2027	1.455,64	1,96	4.468,34	10.849.134,28	1.867.766,94
2028	2.911,28	0,98	8.936,68	21.313.080,00	3.735.533,88
2029	2.683,03	1,06	8.236,05	19.997.124,30	3.442.668,02
2030	2.464,10	1,16	7.564,01	18.365.414,51	3.161.755,87
2031	2.254,49	1,27	6.920,57	16.803.139,17	2.892.797,44
2032	2.054,20	1,39	6.305,72	15.310.298,29	2.635.792,70
2033	1.863,22	1,53	5.719,48	13.886.891,88	2.390.741,68
2034	1.681,55	1,70	5.161,83	12.532.919,92	2.157.644,37
2035	1.509,21	1,89	4.632,78	11.248.382,42	1.936.500,76
2036	1.346,17	2,12	4.132,32	10.033.279,38	1.727.310,87
2037	1.192,46	2,39	3.660,47	8.887.610,80	1.530.074,68
2038	1.048,06	2,72	3.217,21	7.811.376,68	1.344.792,20
2039	912,98	3,13	2.802,54	6.804.577,02	1.171.463,42
2040	787,21	3,63	2.416,48	5.867.211,82	1.010.088,36
2041	670,76	4,25	2.059,01	4.999.281,08	860.667,01
2042	563,62	5,06	1.730,14	4.200.784,79	723.199,36

Observa-se que nos primeiros anos, não há calor suficiente para evaporação do lixiviado. Porém, nestes anos, não se forma suficiente lixiviado, que pode ser armazenado, e uma vez que se obtenha suficiente calor, a planta de tratamento de lixiviado começa a operar.

O custo do motor Jenbacher JMS 620 GS-B.L foi estimado pela Equação 31, com base no custo do motor GE Jenbacher J320, de US\$ 850.000,00 (FRANÇA JUNIOR, 2008).

A Tabela 28 mostra os gastos associados à operação da planta de cogeração. Os números antes das especificações indicam um multiplicador anual.

Tabela 28 - Gastos anuais associados com a planta de cogeração.

Gastos com Pessoal			
0,5	Chefe de Planta*	R\$ 64.247,04	R\$ 32.123,52
3	Operadores	R\$ 40.154,40	R\$ 120.463,20
TOTAL			R\$ 152.586,72
*O custo do chefe da planta será dividido com o gerenciamento do aterro.			
Gastos com Manutenção			
1	Manutenção anual	R\$ 10.000,00	R\$ 10.000,00
TOTAL			R\$ 10.000,00
Investimento inicial*			
0,11	Motor	R\$ 3.980.501,88	R\$ 437.037,71
0,11	Depósito	R\$ 20.000,00	R\$ 2.195,89
0,11	Sistema de encanamento	R\$ 50.000,00	R\$ 5.489,73
TOTAL			R\$ 444.723,33
*Amortização de equipamentos ao longo de 15 anos (frc = 0,11)			
Gastos com Manutenção			
1	Manutenção anual	R\$ 8.000,00	R\$ 8.000,00
TOTAL			R\$ 8.000,00
Gastos com Maquinaria e Transporte			
0,1	Veículo 4x4	R\$ 80.000,00	R\$ 8.000,00
1	Ferramentas e EPIs	R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
TOTAL			R\$ 9.000,00

Entre os anos de 2003 e 2018, ocorre a amortização do investimento, com custos anuais mais altos. A Tabela 29 mostra o balanço econômico para o sistema de cogeração instalado no ASMJP.

Tabela 29 - Balanço econômico para o sistema de cogeração.

Ano	Produção elétrica anual (kWh)	Lucro Bruto (R\$)	Gastos (R\$)	Resultado Líquido (R\$)
2003	912,84	R\$ 182,57	R\$ 636.047,49	-R\$ 635.864,93
2004	1.313,53	R\$ 262,71	R\$ 636.047,49	-R\$ 635.784,79
2005	31.547,74	R\$ 6.309,55	R\$ 636.047,49	-R\$ 629.737,95
2006	42.800,94	R\$ 8.560,19	R\$ 636.047,49	-R\$ 627.487,31
2007	48.973,64	R\$ 9.794,73	R\$ 636.047,49	-R\$ 626.252,77
2008	56.052,75	R\$ 11.210,55	R\$ 636.047,49	-R\$ 624.836,94
2009	64.178,09	R\$ 12.835,62	R\$ 636.047,49	-R\$ 623.211,88
2010	87.251,10	R\$ 17.450,22	R\$ 636.047,49	-R\$ 618.597,27
2011	114.162,57	R\$ 22.832,51	R\$ 636.047,49	-R\$ 613.214,98
2012	149.672,93	R\$ 29.934,59	R\$ 636.047,49	-R\$ 606.112,91
2013	207.946,50	R\$ 41.589,30	R\$ 636.047,49	-R\$ 594.458,19
2014	288.213,76	R\$ 57.642,75	R\$ 636.047,49	-R\$ 578.404,74
2015	328.517,28	R\$ 65.703,46	R\$ 636.047,49	-R\$ 570.344,04
2016	423.466,99	R\$ 84.693,40	R\$ 636.047,49	-R\$ 551.354,09
2017	550.835,24	R\$ 110.167,05	R\$ 636.047,49	-R\$ 525.880,45
2018	720.794,78	R\$ 144.158,96	R\$ 636.047,49	-R\$ 491.888,54
2019	949.165,25	R\$ 189.833,05	R\$ 191.324,16	-R\$ 1.491,11
2020	1.258.119,77	R\$ 251.623,95	R\$ 191.324,16	R\$ 60.299,79
2021	1.678.858,83	R\$ 335.771,77	R\$ 191.324,16	R\$ 144.447,61
2022	2.255.436,54	R\$ 451.087,31	R\$ 191.324,16	R\$ 259.763,15
2023	3.050.240,95	R\$ 610.048,19	R\$ 191.324,16	R\$ 418.724,03
2024	4.151.849,39	R\$ 830.369,88	R\$ 191.324,16	R\$ 639.045,72
2025	5.686.294,68	R\$ 1.137.258,94	R\$ 191.324,16	R\$ 945.934,78
2026	7.833.230,51	R\$ 1.566.646,10	R\$ 191.324,16	R\$ 1.375.321,94
2027	10.849.134,28	R\$ 2.169.826,86	R\$ 191.324,16	R\$ 1.978.502,70
2028	21.313.080,00	R\$ 4.262.616,00	R\$ 191.324,16	R\$ 4.071.291,84
2029	19.997.124,30	R\$ 3.999.424,86	R\$ 191.324,16	R\$ 3.808.100,70
2030	18.365.414,51	R\$ 3.673.082,90	R\$ 191.324,16	R\$ 3.481.758,74
2031	16.803.139,17	R\$ 3.360.627,83	R\$ 191.324,16	R\$ 3.169.303,67
2032	15.310.298,29	R\$ 3.062.059,66	R\$ 191.324,16	R\$ 2.870.735,50
2033	13.886.891,88	R\$ 2.777.378,38	R\$ 191.324,16	R\$ 2.586.054,22
2034	12.532.919,92	R\$ 2.506.583,98	R\$ 191.324,16	R\$ 2.315.259,82
2035	11.248.382,42	R\$ 2.249.676,48	R\$ 191.324,16	R\$ 2.058.352,32
2036	10.033.279,38	R\$ 2.006.655,88	R\$ 191.324,16	R\$ 1.815.331,72
2037	8.887.610,80	R\$ 1.777.522,16	R\$ 191.324,16	R\$ 1.586.198,00
2038	7.811.376,68	R\$ 1.562.275,34	R\$ 191.324,16	R\$ 1.370.951,18
2039	6.804.577,02	R\$ 1.360.915,40	R\$ 191.324,16	R\$ 1.169.591,24
2040	5.867.211,82	R\$ 1.173.442,36	R\$ 191.324,16	R\$ 982.118,20
2041	4.999.281,08	R\$ 999.856,22	R\$ 191.324,16	R\$ 808.532,06
2042	4.200.784,79	R\$ 840.156,96	R\$ 191.324,16	R\$ 648.832,80

Como se observa, a receita nos primeiros anos não supera os gastos. Porém, a partir de 2020, ao aumentar a produção elétrica, aumenta também a receita e, portanto, o resultado líquido é positivo, certificando que a instalação proposta é rentável. Observa-se também que a partir do ano de 2019 o valor dos gastos reduz significativamente devido a amortização dos equipamentos, ou seja, o valor do investimento foi diluído nos anos anteriores. O somatório da receita gerada com venda de eletricidade foi de R\$ 43.778.068,59, a soma total dos gastos anuais foi de R\$ 14.768.539,74, e a soma total dos resultados líquidos anuais é R\$ 29.009.528,85, ou seja, o balanço econômico total, ao longo da vida útil do aterro, é de pouco mais de R\$ 29 milhões positivos.

Como todos os aterros sanitários geram metano, há muitas oportunidades para reduzir estas emissões por queima direta (tocha) ou coleta de biogás para geração de energia, sendo esta última alternativa uma ótima oportunidade para incluir o aterro sanitário no MDL.

A proposta do MDL é a implantação de um projeto, em um país em desenvolvimento, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE e contribuir para o desenvolvimento sustentável local. Cada tonelada de GEE que deixa de ser emitida ou retirada da atmosfera, é transformada em unidade de crédito de carbono, chamada Redução Certificada de Emissões (RCE), que poderá ser negociada no mercado mundial (ICB, 2014).

Restringindo a discussão, a estudos publicados a partir de 2012, o trabalho de Ribeiro (2014) discute a geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos, *waste-to-energy* (WTE).

Especificamente no Brasil, o estudo de Souza e Valdés (2015) analisou o potencial energético do biogás proveniente do aterro sanitário de Palmas/TO para geração de energia elétrica, e a incineração de RSU para aproveitamento na cogeração de energia foi estudada para a região metropolitana de Goiânia por Morgado e Ferreira (2012). Em João Pessoa, o ASMJP já foi o objeto de estudo dos trabalhos de Araújo *et al.* (2017a, 2017b), que verificou vários cenários de descarte final para os resíduos da arborização urbana de João Pessoa e confirmaram, por meio do desenvolvimento de uma Avaliação de Ciclo de Vida, que a geração de eletricidade, a partir dos resíduos de poda, foi a opção mais vantajosa, desde um ponto de vista ambiental. O trabalho de Nascimento *et al.* (2016) analisou o potencial de mitigação de mudanças climáticas da cidade de João Pessoa, através do aproveitamento energético dos resíduos sólidos do Aterro Metropolitano da cidade,

enquanto Nascimento e Carvalho (2016) discutiram uma possibilidade imediata para produção de eletricidade a partir da incineração direta.

6. CONCLUSÕES

O gerenciamento dos resíduos sólidos, principalmente em países em desenvolvimento, passa por diversos desafios enfrentados pela sociedade e administração pública. Visto que a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída no Brasil, através da Lei Federal nº 12.305/2010, está em vigor, mas ainda carece de aplicação prática em vários pontos. Como à disposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

A produção de resíduos sólidos, principalmente nos grandes centros, tem aumentado muito, decorrente da intensificação das diversas atividades humanas, dificultando a disposição correta desses resíduos. Atualmente, a disposição ambientalmente e economicamente mais viável é a disposição dos resíduos sólidos em aterro sanitário.

Neste trabalho, o método GasSim foi considerado o método mais refinado para cálculo de geração de biogás de aterro. Aplicando-se este método, foi observado que o ASMJP possui uma geração de biogás considerável, chegando a gerar 11.277,28 t/ano, tendo o pico de produção do biogás em 2028, ano em que o aterro encerra suas atividades. O potencial de geração do biogás pode ser aumentado, caso ocorra uma melhor separação do RSU depositado no ASMJP (aumentando a proporção de matéria orgânica) e ainda assim, aumentar a vida útil do aterro.

Este trabalho mostrou, que fazendo o gerenciamento correto dos resíduos sólidos urbanos, é possível fazer o aproveitamento energético do biogás gerado no processo de decomposição deste resíduo, mostrando que no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), que a queima o biogás em *flares*, é viável a geração de energia elétrica pelo processo de cogeração, utilizando o motor Jenbacher 620 GS-BL (F21), gerando energia para suprir as necessidades das atividades do aterro e o excedente vender para a concessionária de energia elétrica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-JARRAH, O. ; ABU-QDAIS, H. **Municipal solid waste landfill siting using intelligent system.** Waste Management, 2006, p p. 299–306. v. 26

ARAÚJO. et al. **Descarte de resíduos da poda urbana: análise ambiental e perspectivas de inclusão em esquemas de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) para João Pessoa/PB.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOMASSA, 2. ed. Curitiba, 2017a..

_____. **Pegada de carbono associada a quatro cenários de descarte para resíduos da poda urbana de João Pessoa/PB.** In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOMASSA, 2. ed., Curitiba, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2016.

_____. **Resíduos Sólidos Urbanos.** São Paulo, 2011.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2013.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10.004 Resíduos Sólidos: Classificação.** ABNT. Rio de Janeiro, 2004.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente.** Bookman, 2009.

AUTARQUIA ESPECIAL MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIS) de João Pessoa.** João Pessoa: EMLUR, (Diagnóstico), 2014. vol. 1

BEITH, R. (Ed.). **Small and micro combined heat and power (CHP) systems: advanced design, performance, materials and applications.** [s.l.]: Elsevier, p.560, 2011.

BORBA, J. E. M.; VITAL, A. A. B.; COELHO JUNIOR, L. M.; CARVALHO, M. **Viabilidade da cogeração em indústria sucroenergética; Parte 1.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. 4. ed. Recife: **Anais**, 2017.

BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia. UFRJ, 2006, 134p.

BORBA, J. E. M. et al. **Viabilidade da Cogeração em Indústria Sucroenergética; Parte 1.** EPERSOL, 2017.

BÖRJESSON, P.; MATTIASSON, B. **Biogas as a resource-efficient vehicle fuel.** Trends Biotechnol, 2008, pp. 7–13. v. 26. n. 1

BRASIL, 2010. Lei N° 12.305 de 2 de agosto de 2012. **POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.** Dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 20 jan. 2017.

BRASIL. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.** Resolução Normativa N° 482, 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.

BRASIL. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.** Resolução Normativa n° 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. 2015a.

BRASIL. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.** ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída. 2015b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90>. Acesso em: 20 mai. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário.** 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em: 11 nov 2016.

CABRERA, E. G. **Análisis de Productos y Procesos en un Vertedero R.S.U. para su Aprovechamiento Energético**. Relatório, Engenharia Técnica Industrial, Universidade de Sevilha. Sevilha, Espanha: US, 2011.

CARTEPILLAR. **Gás generator sets**. Catálogos informativos. Disponível em <www.cat.com>, acesso em 10 de maio de 2017.

CARESANA, F.; COMODI, G.; PELAGALLI, L.; PIERPAOLI, P.; VAGNI, S. **Energy production from landfill biogas: An italian case. Biomass and Bioenergy. Italy**, 2011, pp. 4331-4339. v. 35

CARVALHO, M.; FREIRE, R. S.; BRITO, A. M. V. G. Promotion of Sustainability by Quantifying and Reducing the Carbon Footprint: New Practices for Organizations. In: Panagiotis Grammelis. (Org.). **Energy, transportation and global warming**. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, pp. 61-76. v. 1.

CHIEMCHAISRI, C.; VISVANATHAN, C. Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. **Journal of the Air & Waste Management Association**, 2008, pp. 629-635. v. 58, n. 5

CHACARTEGUI, R.; MONJE, B.; SÁNCHEZ, D.; BECERRA, J. A.; CAMPANARI, S. Molten carbonate fuel cell: Towards negative emissions in wastewater treatment CHP plants. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2013, pp. 453-461. v. 19.

CLIMATICUS 4.2 - **Software versão beta. Banco de dados Climáticos. Estratégias de projeto 58 cidades brasileiras. Base de dados do INMET 1961-1990**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - Departamento de Tecnologia - Laboratório de conforto ambiental e eficiência energética, 2005. Disponível em:<www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_4_2.xls>, consultado em 29/04/2017.

GE-Energy. **Jenbacher biogas engine**. Catálogos. Disponível em: <www.ge-energy.com>, acesso em 10 de maio de 2017.

HORLOCK, J. H. **Combined heat and power**. New York: Pergamon Press, 1987.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling. **Journal of Environmental Management**, 1997, pp. 1-25. v. 50

EMLUR, 2016. **Empresa Municipal de Limpeza Urbana**. Disponível em: <<http://www.joaopessoa.pb.gov.br/secretarias/emlur/coleta-seletiva/>> Acesso em: 04 de fevereiro de 2017.

EPA - Environmental Protection Agency. 2008a. **LFG Energy Project Development Handbook**. Chapter 1 Landfill Gas Energy Basics. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdh_chapter1.pdf >. Acesso em: 04 fev. 2017.

EPA - Environmental Protection Agency. 2008b. **LFG Energy Project Development Handbook**. Chapter 2 Landfill Gas Modelling. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdh_chapter2.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2017.

FAOUR, A. A.; REINHART, D. R.; YOU, H. First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. **Waste Management**, 2007, pp. 946-953. v. 27, n. 7

FREIRE, R. S.; CARVALHO, M.; CARMONA, C. U. M.; BRITO, A. M. V. G. Perspectives on the Implementation of Climate Change Public Policies in Brazil. In: Panagiotis Grammelis. (Org.). **Energy, Transportation and Global Warming**. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, pp. 13-20. v. 1

FRIIS, R. H. **The Praeger Handbook of Environmental Health**. [s.l.]: ABC-CLIO, 2012.

GRIMA-OLMEDO, C.; RAMÍREZ-GÓMEZ, Á.; ALCALDE-CARTAGENA, R. Energetic performance of landfill and digester biogas in a domestic cooker. **Applied Energy**, 2014, pp. 301-308. v. 134

ICLEI – **Manual de Aproveitamento do biogás: volume um aterro sanitário**. Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

IPCC - **INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE**. Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol. 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>> Acesso em 24 set 2016.

ICB - **INTITUTO CARBONO BRASIL**, 2014.
<<http://www.institutocarbonobrasil.org.br>> Acesso: 02 de novembro de 2014.

JAFFRIN, A.; BENTOUNES, N.; JOAN, A. M.; MAKHLOUF, S. Landfill Biogas for heating Greenhouses and providing Carbon Dioxide Supplement for Plant Growth. **Biosystems Engineering**, 2003, pp.113-123. v. 86

JOÃO PESSOA. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. João Pessoa, 2014.

KOMILIs, D.P.; HAM, R.K.; STEGMANN, R. The effect of municipal solid waste pretreatment on landfill behavior: a literature review. **Waste Management and Research**, 1999, pp. 10–19. v.17.

LIMA, J. D.; NETO, R. R. F.; NETO, J. P. F. **Consórcio de desenvolvimento intermunicipal da área metropolitana de João Pessoa – PB como solução de destinação final dos RSU**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTA. 22.ed. Joinville: Anais, 2013.

LOZANO, M. A.; CARVALHO, M.; SERRA, L. M. **Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems**. *Energy*, 2009, pp. 2001-2008. v. 34, n. 11.

LOZANO, M. A. *et al.* **Thermoeconomic analysis of simple trigeneration systems**. *International Journal of Thermodynamics*, 2009, pp. 147-153. v. 12, n. 3

LMOP – **LANDFILL METHANE OUTREACH PROGRAM**. LFG Energy Project Development Handbook, 2016. Disponível em:
<file:///C:/Users/Dayse/Dropbox/Dayse%20Dissertação/pdh_full.pdf> Acesso: 23 de março de 2017.

MARTINS, W. A. **Avaliação do ciclo de vida do programa de coleta seletiva do município de João Pessoa- PB, Brasil**. Dissertação (Dissertação em engenharia civil e ambiental). João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2017.

MELO, F. M. **Síntese e otimização de um sistema energético para um edifício do setor residencial em João Pessoa-PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa: UFPB, 2017.

MELO, F. M.; CARVALHO, M. **Cogeração Como Ferramenta Para Alcançar A Sustentabilidade Energética No Ambiente Residencial**. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2.ed. João Pessoa: Anais, 2016.

_____. **Otimização econômica do fornecimento de energia para um edifício residencial localizado em João Pessoa-PB.** In: Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade, 6.ed. São Paulo: Anais, 2017.

MENDES, L. G. G; SOBRINHO, P. M. **Métodos de estimativa de geração de Biogás em aterro sanitário.** Revista Ciências Exatas. Taubaté, 2005, p. 71-76. v. 11, n. 2.

MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. **Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos, Aproveitamento na Co-geração de Energia: Estudo para a Região Metropolitana de Goiânia.** Goiânia: Universidade Católica de Goiás, 2012.

NADALETTI, W. C.; CREMONEZ, P. A.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A.; BELLI FILHO, P.; SECCO, D. Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015, pp. 277-283. v. 41

OONK, H.; BOOM, T. Validation of landfill gas formation models. **Studies in Environmental Science**, 1995, p. 597-602. v. 65.

PARAÍBA. Secretaria do Estado dos Recursos Hídricos, do Meio Ambiente, e da Ciência e Tecnologia - SERHMACT. **Plano de regionalização da gestão integrada de resíduos sólidos do estado da Paraíba.** João Pessoa: A União, 2014.

PIMENTEL, C. H. L. **A gestão dos resíduos sólidos urbanos no município de João Pessoa/PB - à luz das rotas tecnológicas.** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife: UFPE, 2017.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. Landfill leachate treatment: review and opportunities. **Journal of Hazardous Materials**, 2008, pp.468-493. v. 150, n.3.

RIBEIRO, S. G. **Geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos-usinas waste-to-energy (WTE).** 2014. Disponível em: <
http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas_lixo_energia_no_brasill.pdf>. Acesso em: 15 out. 2017.

ROLLS ROYCE, 2012 Catálogos informativos. Disponível em: <
https://pdf.directindustry.com/pt/pdf-en/rolls-royce/marine-engine-and-propulsion-programme-2012/22649-359699-_16.html>, Acesso: 13 maio 2017.

ROMERO, J. C. R; JIMÉNEZ, R. A; ARQUILLOS, A. L. Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste landfills. **Journal of Cleaner Production**, 2013, pp. 84-91. v. 55

SILVA, G.A. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do teste BMP.** Dissertação (Dissertação em engenharia Urbana e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2014.

SANCHEZ, D.; MONJE, B.; CHACARTEGUI, R.; CAMPANARI, S. Potential of molten carbonate fuel cells to enhance the performance of CHP plants in sewage treatment facilities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n.1, p. 394-405.

SANPHOTI, N.; TOWPRAYOON, S.; CHAIPRASERT, P.; NOPHARATANA, A. The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. **Journal of Environmental Management**, 2006, pp. 27-35. v. 81.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Blucher, 2003.

SOUZA, R. M.; VALDÉS, J. S. C. Análise do Potencial Energético do Biogás Proveniente do Aterro Sanitário de Palmas/TO para Geração de Energia Elétrica. **RCA-Revista Científica da AJES**, 2015. v. 2, n. 5.

TABASARAN, O. 1981. **Gas production from landfill. In: Household Waste Management in Europe, Economics and Techniques**, A.V. Bridgewater and Lidgren, K. (eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA, pp.159-175.

TARAZONA, C. F. **Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbano**. Dissertação (Dissertação em engenharia civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2010.

USEPA - **UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version3.02 User's Guide. 2005. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302-guide.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2016.

USEPA - **UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. LFG Energy Project Development Handbook. 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017.

ZUQUETTE L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para exploração. São Carlos (SP)**. Tese de Doutorado – Departamento de Geotécnica da Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos: USP, 1993.