



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETÁRIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉRCIA GONTIJO GONÇALVES

**VIABILIDADE DE UTILIZAR O BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE
PALMAS PARA GERAR ENERGIA ELÉTRICA**

Palmas – TO

2021

MÉRCIA GONTIJO GONÇALVES

**VIABILIDADE DE UTILIZAR O BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO
DE PALMAS PARA GERAR ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheira Eletricista do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins – *Campus* Palmas.

Orientador: Dr. Valci Ferreira Victor

Palmas – TO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

G635v Gonçalves, Mércia Gontijo
 Viabilidade de utilizar o biogás proveniente do Aterro Sanitário de
 Palmas para gerar energia elétrica. / Mércia Gontijo Gonçalves. –
 Palmas, TO, 2021.
 59 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Valci Ferreira Victor

1. Biogás. 2. Aproveitamento energético. 3. Viabilidade
econômica. I. Victor, Valci Ferreira. II. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

MÉRCIA GONTIJO GONÇALVES

**VIABILIDADE DE UTILIZAR O BIOGÁS PROVENIENTE DO ATERRO SANITÁRIO DE
PALMAS PARA GERAR ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
Campus Palmas, como exigência à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 21 / 06 / 2021

BANCA AVALIADORA



Doutor Valci Ferreira Victor (Orientador)
IFTO – *Campus* Palmas



Doutor Walter Xanthopulo
IFTO – *Campus* Palmas



Mestre Humberto Rodrigues Macedo
IFTO – *Campus* Palmas

RESUMO

Com o crescimento populacional, a demanda de energia elétrica torna-se cada vez maior. Porém as principais fontes de energia utilizadas para este fim são fontes não renováveis, ou seja, eventualmente elas irão se esgotar. A partir dessa problemática, o investimento em fontes renováveis é de suma importância econômica e ambiental. Dentre as fontes renováveis, encontra-se o biogás, composto em maior parte por metano (CH_4), gás muito poluente, mas também com alto poder calorífico, por essa razão é uma ótima fonte de energia renovável. O biogás é encontrado em abundância em aterros sanitários devido à quantidade de matéria orgânica em processo de decomposição presente no local. O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar a viabilidade econômica para implantação de um sistema capaz de produzir eletricidade utilizando como combustível o biogás gerado no aterro sanitário de Palmas. Para tanto, foi adotado o método de revisão bibliográfica das formas mais eficientes de aproveitamento energético do biogás e modelos para determinação de metano gerado pela decomposição dos resíduos de aterro sanitário, em conjunto com estudo de caso, onde foi estimado as quantidades de lixo depositado e metano gerado no aterro sanitário de Palmas. Por fim, calculou-se o custo do investimento e aplicou-se ferramentas de estudo econômico para determinação da viabilidade do projeto. Com os cálculos realizados, obteve-se um potencial de geração de metano igual a $0,105 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg}$ de resíduo e um total de 547.000 m^3 de metano coletado em 2020 proveniente de $86.828.778 \text{ kg}$ de lixo depositado no aterro neste mesmo ano. O custo de implantação do projeto foi orçado em R\$ 7.327.850,00. Mediante análise econômica, o investimento apresentou resultado favorável, portanto a implantação da usina a biogás resultará em retorno financeiro positivo, além de diminuir a poluição atmosférica e gerar empregos.

Palavras-chave: Biogás. Aproveitamento energético. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Combined with the population growth, the demand for electrical energy grows increasingly. However, the main energy sources used for this purpose are non-renewable sources, in other words, they will eventually run out. Based on this issue, the investment in renewable energy sources has great economic and environmental importance. Among the renewable sources, there is biogas, mostly composed of methane (CH₄), a very polluting gas, but also with high calorific value and for this reason, it is an excellent source of renewable energy. Biogas is found in abundance in landfills due to the amount of organic matter in the process of decomposition present there. The general objective of this work is to study the economic feasibility of implementing a system capable of producing electricity using as fuel the biogas generated in the landfill of Palmas. To this end, the method of literature review of the most efficient forms of biogas energy use and models for determining the methane generated by the decomposition of landfill waste was adopted, together with a case study, where the quantities of garbage disposed and methane generated at the landfill of Palmas were estimated. Finally, the investment cost was calculated and economic study tools were applied to determine the project's feasibility. With the calculations performed, it was obtained a potential for methane generation equal to 0.105 m³ CH₄ / kg of residue and a total of 547,000 m³ of methane collected in 2020 from 86,828,778 kg of waste deposited in the landfill in the same year. The project implementation cost was budgeted at R\$ 7,327,850.00. Through economic analysis, the investment presented a favorable outcome; therefore, the implementation of the biogas plant will result in a positive financial return, besides reducing atmospheric pollution and generating jobs.

Keywords: Biogas. Energy use. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico da matriz energética brasileira.....	13
Figura 2 – Comparativo do percentual de fontes renováveis na composição das matrizes energéticas brasileira e mundial.....	13
Figura 3 – Comparativo da participação de fontes renováveis na geração de eletricidade no Brasil e no mundo.....	14
Figura 4 – Gráfico da matriz elétrica brasileira.....	15
Figura 5 – Ciclo de Rankine.....	24
Figura 6 – Turbina a gás.....	25
Figura 7 – Localização do Aterro Sanitário de Palmas.....	36
Figura 8 – Gráfico da composição gravimétrica dos resíduos do Aterro Sanitário de Palmas – TO.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do biogás.....	21
Tabela 2 – Valores recomendados de COD para cada tipo de resíduo.....	30
Tabela 3 – Valores recomendados de fator de correção do metano.....	30
Tabela 4 – Valores recomendados de k.....	32
Tabela 5 – Taxa de crescimento populacional de Palmas – TO.....	43
Tabela 6 – Custos de implantação e manutenção da usina.....	45
Tabela 7 – Fluxo de caixa do investimento aplicando a taxa mínima de atratividade	46
Tabela 8 – Valor Presente Líquido do Investimento.....	47
Tabela 9 – Estimativa da vazão de metano no Aterro Sanitário de Palmas – TO.....	54
Tabela 10 – Estimativa da potência elétrica e energia elétrica no Aterro Sanitário de Palmas – TO.....	56
Tabela 11 – Faturamento com a venda de energia elétrica.....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Objetivo geral.....	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 ENERGIA.....	14
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	18
2.3 DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	18
2.4 BIOGÁS.....	21
2.4.1 Composição.....	21
2.4.2 Formação de Biogás em Aterro Sanitário.....	21
2.4.3 Características do biogás.....	23
2.4.4 Coleta do Biogás de Aterro.....	24
2.4.5 Aplicação do Biogás – Geração de energia elétrica.....	25
2.5 CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS.....	25
2.5.1 Caldeiras.....	26
2.5.2 Motores de combustão interna.....	26
2.5.3 Turbinas e Microturbinas a Gás.....	27
2.6 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE METANO.....	28
2.6.1 Modelo do Intergovernmental Panel of Climate Change.....	29
2.6.2 Modelo Landgem.....	32
2.6.3 Modelo da CETESB.....	33
2.7 VIABILIDADE ECONÔMICA.....	35
2.7.1 Fluxo de caixa (FC).....	35
2.7.2 Taxa Mínima de Atratividade (TMA).....	35
2.7.3 Valor Presente Líquido (VPL).....	36
2.7.4 Taxa Interna de Retorno (TIR).....	36
2.7.5 Índice de Lucratividade (IL).....	36

2.7.6 Período de <i>Payback</i>.....	37
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
3.1 ESTUDO DE CASO.....	38
3.2 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE BIOGÁS GERADO.....	39
3.3 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE POTÊNCIA DISPONÍVEL.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	41
4.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL.....	44
4.3 ENERGIA ELÉTRICA ÚTIL.....	45
4.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
APÊNDICE A.....	54
APÊNDICE B.....	56
APÊNDICE C.....	58

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade tornou-se indispensável para a sociedade moderna e está presente, de forma direta ou indireta, em praticamente todas as atividades do cotidiano. A energia elétrica tem sido produzida de várias formas, tendo como principal matéria-prima os combustíveis fósseis, sendo eles: petróleo, carvão mineral, nuclear e gás natural. A preocupação com o uso em grande escala dessas fontes são os impactos ambientais ocasionados por elas, pois são poluentes.

Mesmo nas últimas décadas, em que os cuidados com a preservação do meio ambiente têm se mostrado mais presentes em todos os âmbitos, a eletricidade produzida no mundo ainda se deve predominantemente a fontes não renováveis.

De acordo com dados da International Energy Agency (IEA, 2020), aproximadamente 74% da matriz elétrica mundial é derivada de fontes não renováveis, sendo elas: o carvão, com cerca de 37,8%, em segundo o gás natural com 22,6%, seguido de nuclear (10%) e por fim o petróleo e seus derivados (3,6%).

Essas fontes apresentam muitas desvantagens, como por exemplo, o fato de serem esgotáveis, a poluição da atmosfera, perda da biodiversidade, chuva ácida, aquecimento global, contaminação de rios e mares, entre outras. Por isso se torna essencial o investimento em fontes renováveis de energia, pois, além de serem inesgotáveis, são consideradas fontes limpas, por não poluírem e causarem impactos ambientais em menor escala, também possuem um baixo custo.

Diferentemente da matriz elétrica mundial, a matriz elétrica brasileira é majoritariamente composta por fontes renováveis, sendo elas responsáveis por 82% do total, com 65,2% devido a hidrelétricas (EPE, 2018).

As fontes renováveis são benéficas para o país, pois causam menos impactos negativos, se comparadas às fontes não renováveis. Porém a falta de diversificação na matriz ainda é um problema a ser trabalhado. A necessidade dessa diversificação ocorre em razão da instabilidade de haver apenas uma fonte responsável por grande parte da demanda total de geração de eletricidade, visto que qualquer desequilíbrio no fornecimento da fonte, no caso do Brasil, as chuvas, pode acarretar em um prejuízo enorme para todo o país.

As principais fontes renováveis de energia são: hidrelétrica, eólica, solar e biomassa. Dentre estas, encontra-se o biogás, proveniente da biomassa, gerado a partir da decomposição anaeróbica de matéria orgânica, apresentando metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) em sua composição, além de outras moléculas em menor quantidade, e possui grande potencial calorífico. O biogás pode ser utilizado para aquecimento e produção de energia elétrica, biometano e biofertilizante, ou ainda gerar créditos de carbono.

Como o biogás é gerado de forma contínua, ele garante mais estabilidade que as outras fontes, pois é mais difícil acontecer desregularidade de sua matéria-prima, podendo assim, servir de apoio para as outras fontes renováveis. Como há o aproveitamento do metano para geração de energia, evita-se a poluição que seria causada pelo descarte deste gás na atmosfera (BNDES, 2018).

Para a economia, gerar energia a partir do biogás é proveitoso porque os custos são reduzidos. Uma outra característica desta fonte de energia é que ela pode ser encontrada em abundância em várias regiões do país, o que contribui para a geração distribuída.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Utilizar o biogás gerado no aterro sanitário de Palmas – TO para produzir energia elétrica é um projeto viável do ponto de vista econômico?

1.2 JUSTIFICATIVA

O aterro sanitário é uma alternativa de disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), que oferece baixo custo e segurança para a população. Nele ocorre a decomposição da matéria orgânica, por meio de um processo aeróbico. Depois ocorre um processo anaeróbico, onde as bactérias transformam a matéria

orgânica em metano, dando origem ao biogás, muito presente nesses locais, pois o ambiente é propício para a sua formação (MONTAGNA, 2013)

Com a emissão desenfreada de biogás em aterro sanitário, há o surgimento de graves problemas, tanto para o ambiente quanto para a população, doenças e riscos de explosão devido ao gás ser altamente inflamável (ENSINAS, 2003).

Então um meio de minimizar esses prejuízos é aproveitando o biogás de forma correta. Isso torna o estudo, para avaliar a viabilidade de implementar um sistema capaz de utilizar o biogás de aterros sanitários para fornecer energia elétrica, de extrema importância ambiental. Uma vez que sendo possível, é uma alternativa de extrema relevância a ser executada, devido aos benefícios econômicos e ambientais que agrega.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar a viabilidade econômica de construir um sistema para produzir energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário de Palmas – TO.

1.3.2 Objetivos específicos

- a)** Estimar a quantidade de biogás provindo do aterro sanitário de Palmas – TO;
- b)** Calcular a capacidade de geração de energia elétrica a partir desse biogás;

- c)** Definir o gerador que melhor se adeque ao caso em questão; e
- d)** Mostrar um procedimento para análise da viabilidade econômica de implantar um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo de aterro sanitário.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA

No dicionário online Michaelis (2015), energia é definida como a capacidade que um corpo ou uma substância possui de realizar trabalho, “modo como se exerce uma força”. Ou seja, energia é a base do funcionamento e da ação de qualquer coisa, o que a torna essencial para a sobrevivência e progresso dos seres humanos.

O desenvolvimento das nações pode, também, de certa forma, ser medido pela quantidade de energia que consomem. Bronzatti e Neto (2008) afirmam que o consumo energético de um país está intrinsecamente ligado à sua atividade econômica, Produto Interno Bruto (PIB).

Desde a Revolução Industrial, a energia é fator de destaque na competitividade econômica dos países e na qualidade de vida de sua população. Sendo primordial que um país invista em produção, diversificação e autossuficiência energética, para que possa crescer e se consolidar economicamente, pois os dois fatores estão interligados.

O petróleo foi responsável por consolidar o modelo industrial moderno, caracterizado pela produção em massa, onde houve imposição do desenvolvimento tecnológico, inicialmente de indústrias automobilísticas (CARVALHO, 2009).

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, o Brasil experimentou intenso desenvolvimento econômico, que resultou numa demanda de energia primária cada vez maior. Em virtude disso, a energia utilizada no país foi se aprimorando, em consequência da expansão demográfica, da intensificação do processo de urbanização e do desenvolvimento industrial (TOLMASQUIM et al., 2007). Carvalho (2009) ressalta que esses acontecimentos levaram o país a implantar dois sistemas essenciais: o elétrico e o de petróleo e gás.

Com a consolidação do petróleo como fonte de energia, este elemento tomou, cada vez mais, espaço na matriz energética do país, que atualmente é

composta majoritariamente por fontes não renováveis, tendo o petróleo como principal componente, conforme mostra a Figura 1.

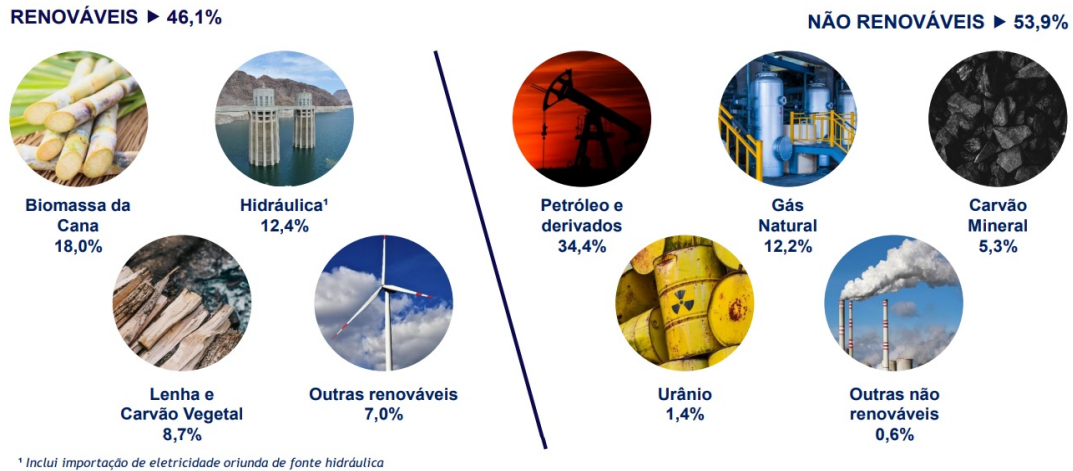


Figura 1 – Gráfico da matriz energética brasileira

Fonte: BEN (2020).

Ainda que o Brasil tenha sua matriz energética predominantemente não renovável, ele possui uma considerável porcentagem renovável se comparado ao panorama mundial, a relação entre os dois casos é apresentada na Figura 2.

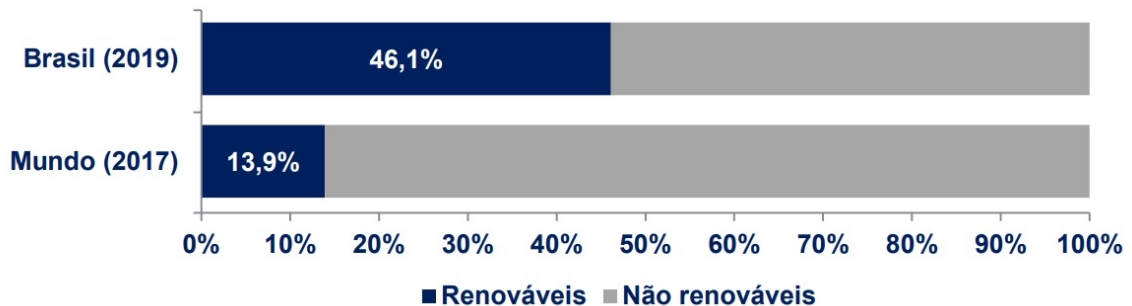


Figura 2 – Comparativo do percentual de fontes renováveis na composição das matrizes energéticas brasileira e mundial

Fonte: Adaptado BEN (2020).

A adversidade de ter uma economia dependente de petróleo e derivados, recurso não-renovável, é o esgotamento das reservas desse produto, ocasionado por uso imoderado. Qualquer desequilíbrio no fornecimento dessa fonte energética gera um impacto direto na atividade econômica do país.

Em razão desse contexto, surge o desenvolvimento sustentável, que visa atender às necessidades da geração atual sem comprometer as gerações futuras, fazendo uso consciente dos recursos naturais, para não esgotá-los (CEBDS, 2018).

Além dos riscos econômicos causados pelo uso sistemático de combustíveis fósseis, há também os prejuízos ambientais, como por exemplo, a produção de dióxido de carbono, principal gás causador do aquecimento global, chuvas ácidas, poluição do ar e interferência da qualidade dos corpos d'água, levando ao comprometimento da vida marinha.

A busca por tornar a matriz energética de um país mais renovável é, então, essencial para preservar a biodiversidade do planeta e garantir condições para o atendimento das necessidades das futuras gerações. As fontes renováveis garantem maior segurança, não poluem o ambiente, são inesgotáveis e não contribuem para as mudanças climáticas, pois não emitem gases de efeito estufa.

No balanço energético de um país, ressalta-se a geração de energia elétrica. Vale destacar que a diferença entre matriz energética e matriz elétrica é que a primeira é o conjunto de fontes de energia que suprem os setores industriais, comerciais e residenciais, já a segunda é o conjunto de fontes utilizadas para gerar eletricidade.

No cenário mundial, a matriz elétrica possui uma porcentagem maior de fontes renováveis comparada a matriz energética, mas, ainda assim, é um valor baixo. Já o Brasil possui uma matriz elétrica limpa, baseada em fontes renováveis, como exibido na Figura 3.

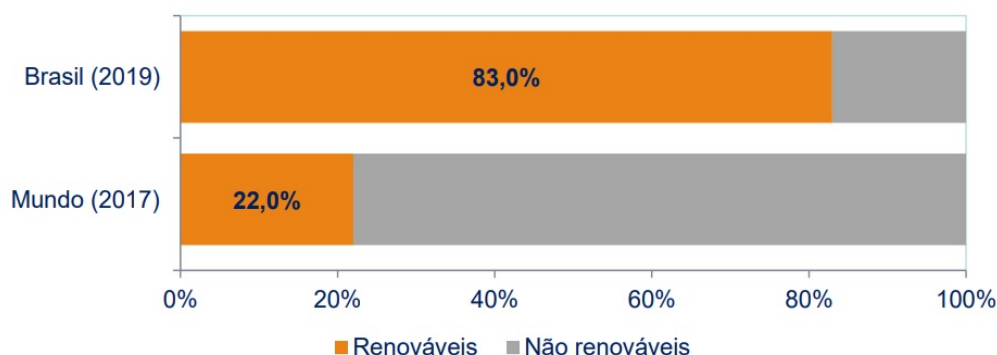


Figura 3 – Comparativo da participação de fontes renováveis na geração de eletricidade no Brasil e no mundo

Fonte: Adaptado BEN (2020).

A composição da matriz elétrica brasileira pode ser observada na Figura 4. O Brasil é destaque no mundo, por sua matriz ser predominantemente renovável. Porém, o país ainda necessita diversificar suas fontes energéticas renováveis, para não ficar dependente do regime pluvial, elemento base das usinas hidrelétricas.

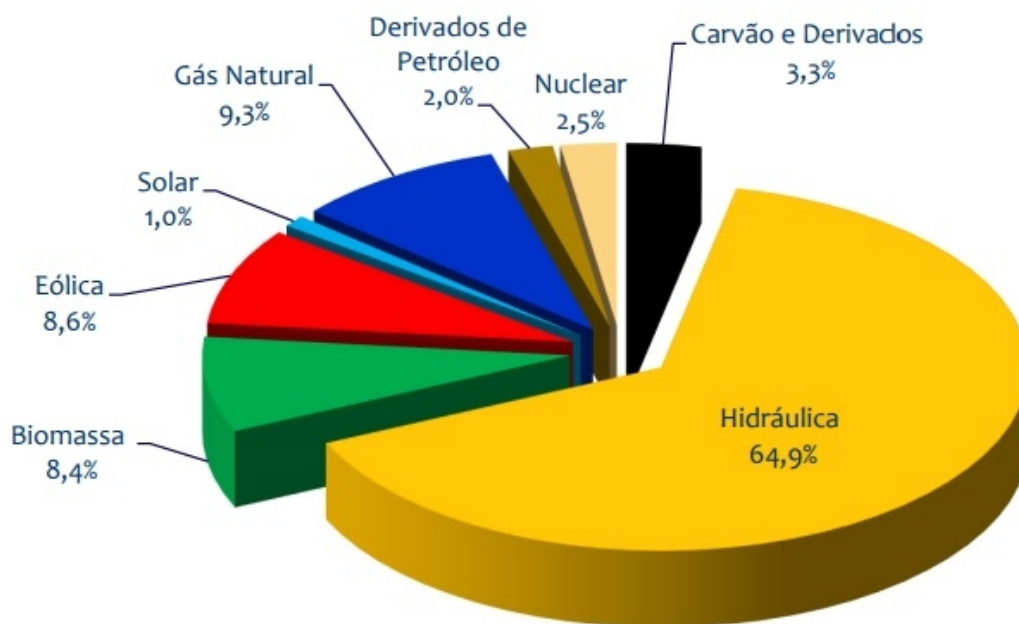


Figura 4 – Gráfico da matriz elétrica brasileira

Fonte: BEN (2020).

As fontes energéticas renováveis existentes no Brasil, solar, eólica, biomassa e hidráulica, possuem grande potencial para serem desenvolvidas. A biomassa é caracterizada como toda matéria orgânica aplicada na geração de energia. Dessa fonte origina-se o biogás, gás procedente da decomposição anaeróbica de matéria orgânica que contribui para a diminuição de mudanças climáticas reaproveitando os principais gases de efeito estufa.

O biogás é comumente produzido a partir de esterco, resíduos agrícolas, vinhaça, amido e resíduos orgânicos municipais advindos do esgoto e do aterro sanitário. A fonte de matéria-prima para a produção de energia que será tema de estudo dessa pesquisa são os resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro sanitário, onde há geração de biogás devido a degradação desses resíduos.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Considera-se resíduo sólido urbano, o resto, no estado sólido, de qualquer atividade humana residencial, comercial, hospitalar, agropecuária ou industrial. O resíduo não possui valor econômico para quem o enjeitou, mas pode ter utilidade em outra atividade, não precisando ser descartado e sim reaproveitado.

De acordo com a ABNT NBR 10.004:2004, os resíduos sólidos podem ser classificados em: resíduos classe I – perigosos; e resíduos classe II – não perigosos. Enquadra-se na classe I todo resíduo que apresenta qualquer tipo de risco à saúde e ao meio ambiente. A classe II é subdividida em duas: classe II A – não inertes, o resíduo é biodegradável ou solúvel em água, ou seja, sofre alterações e tem potencial para prejudicar o meio ambiente, mas não são perigosos; e classe II B – inertes, não sofrem alterações físicas ou químicas.

O descarte inadequado de qualquer tipo de resíduo resulta em danos ao meio ambiente, principalmente poluição do solo e da atmosfera. Por isso, para que esse processo ocorra de forma segura e não prejudicial, é necessário o planejamento da disposição final dos resíduos.

2.3 DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Há inúmeras formas de reaproveitar os resíduos e, ainda assim, a maioria deles são tratados como rejeitos (resíduos sólidos que não tem mais como serem reaproveitados) e encaminhados para disposição final. O aumento da produção de lixo é um problema, pois o investimento para planejamento de destinação correta é elevado e parte desse lixo não é coletado, levando ao descarte de maneira incorreta, fazendo com que o rejeito chegue a corpos d'água e os polua.

A Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define como:

Destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

Disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em 2017 apenas 13% dos resíduos gerados no Brasil foram reaproveitados, sendo que 30% a 40% do total tinham condições para esse fim. A composição dos resíduos que foram para destinação final é: matéria orgânica (57,41%), plástico (16,49%), papel e papelão (13,16%), vidro (2,34%), material ferroso (1,56%), alumínio (0,51%), inertes (0,46%) e outros materiais (8,1%).

De acordo com a composição dos resíduos gerados no país, observa-se que muito se pode fazer com o que é coletado em vez de enjeitá-los. O básico seria a implantação de uma coleta seletiva, onde os resíduos recicláveis fossem separados dos orgânicos, preservando a possibilidade de seu reúso.

Em conjunto com a coleta, há a possibilidade de destinar os recicláveis para seus devidos fins, de acordo com suas composições. A parte da matéria orgânica composta de restos de alimentos (não incluindo carne, arroz, trigo, frutas cítricas e alimentos processados), pode ser utilizada para fazer compostagem e o plástico reciclado, assim como o papel, o papelão e o alumínio. Esse sistema de coleta e tratamento é um método sustentável para reduzir o volume de resíduos encaminhados para aterros sanitários e afins.

Além de resíduos serem encaminhados para disposição final quando poderiam ter alguma serventia, muitas cidades brasileiras ainda adotam métodos incorretos para essa tarefa. Portanto, todo o descarte realizado por estas cidades provoca impactos negativos no meio ambiente.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) informou que, no Brasil, em 2017, foram geradas 79 milhões

de toneladas de resíduos e dessa quantia 92% foram coletados. Destes, 59,5% foram dispostos de forma correta, em aterro sanitário. O restante (40,5%) foi disposto em locais inapropriados, como lixões e aterros controlados, que não possuem planejamento para contenção de danos ambientais.

Segundo a Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, a prioridade é reduzir os resíduos sólidos e adotar destinos adequados para estes, enviando para disposição final, em locais adequados, apenas os rejeitos (BRASIL, 2010).

Apesar de todos os artifícios para garantir a gestão adequada do lixo, a problemática acerca do assunto prevalece, visto que até então, mesmo com uma melhora, a quantidade de municípios que utilizam locais inadequados para disposição final é muito alta.

Conforme a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo: CETESB (2017), as três destinações do lixo urbano coletado podem ser classificadas em:

- Lixão: Não há controle ambiental, o lixo é depositado em local a céu aberto, sem preparação do solo ou tratamento do lixo, extremamente poluente e é considerado o pior recurso de destinação final;
- Aterro Controlado: Possui algum controle ambiental, o lixo é coberto com terra, há uma preparação do solo e o monitoramento dos resíduos que entram no aterro, mas não está em conformidade com as normas ambientais brasileiras;
- Aterro Sanitário: Localizado longe de corpos d'água e da população, há sistema de impermeabilização para proteger o solo e cobertura diária dos resíduos impedindo que haja mal cheiro. O chorume é tratado e os gases são queimados. Funciona dentro das normas ambientais brasileiras e é considerado a escolha mais adequada para destinação do lixo.

Os gases produzidos em aterro sanitário, são compostos basicamente por metano, gás poluente. Mas se aplicado de maneira correta, pode ter aproveitamento energético, diminuindo os impactos negativos causados por este gás.

2.4 BIOGÁS

2.4.1 Composição

A decomposição anaeróbica da matéria orgânica dá origem a um gás, denominado biogás, composto em maior parte por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), e em menor grau por hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), oxigênio (O_2), amoníaco (NH_3) e nitrogênio (N_2) (CETESB, 2020).

Como cada material a ser decomposto possui uma composição que se diferem entre si, o biogás gerado não apresenta um valor fixo de seus constituintes, entretanto pode-se definir um padrão da faixa de valores em que cada um se encontra, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do biogás

Gás	Volume (%)
Metano (CH_4)	50% – 70%
Dióxido de Carbono (CO_2)	25% – 50%
Hidrogênio (H_2)	0% – 1%
Gás sulfídrico (H_2S)	0% – 3%
Oxigênio (O_2)	0% – 2%
Amoníaco (NH_3)	0% – 1%
Nitrogênio (N_2)	0% – 7%

Fonte: CETESB, 2020

2.4.2 Formação de Biogás em Aterro Sanitário

Kunz (2019) descreve alguns fatores ambientais favoráveis necessários para a formação do biogás. São eles:

- Pressão parcial de hidrogênio: na metanogênese faz-se necessário a presença de hidrogênio para os microrganismos conseguirem produzir metano, já na fase de formação de ácidos, a pressão parcial de hidrogênio deve ser baixa para que o processo não seja prejudicado;
- Temperatura ideal: os microrganismos são sensíveis a variações bruscas de temperatura, e quando isso ocorre, há comprometimento da atividade metabólica e do desenvolvimento destes seres;
- Valor do potencial Hidrogeniônico (pH): deve ser mantido na faixa em que as bactérias operam para não haver inibição do crescimento e funcionamento delas;
- Disponibilidade de nutrientes: cada microrganismo necessita de nutrientes específicos para seu desenvolvimento; e
- Controle de substâncias inibidoras: aparecimento de metais pesados e sais podem interferir no processo de digestão.

Além de levar em consideração os parâmetros ambientais, deve-se dar importância aos estágios de fermentação, feita por diversas bactérias, para que esse processo não seja perturbado e possua melhor rendimento.

Pohland e Harper (1986) alegam que existem cinco fases de decomposição da matéria orgânica para formação do biogás em aterros sanitários, explicadas a seguir:

- Fase I – Ajuste inicial: acontece assim que os resíduos são dispostos no aterro, fase predominantemente aeróbia, em que os microrganismos se encontram na terra utilizada para cobertura do lixo;
- Fase II – Transição: formação do lixiviado. Há transição de reações aeróbias para reações anaeróbias, devido ao decaimento do oxigênio, que origina o dióxido de carbono. Com isso surgem nitratos e sulfatos como receptores de elétrons. Aparição de ácidos graxos orgânicos.
- Fase III – Ácida: as reações da fase anterior são intensificadas tornando os ácidos graxos orgânicos predominantes. Diluição de metais por consequência da redução do pH. Pode haver presença de oxigênio, o que afeta os produtos resultantes da digestão anaeróbia.

- Fase IV – Metanogênica: os produtos formados na fase ácida são convertidos em metano. O pH volta a ser mais elevado. O nível de oxidação é baixo.
- Fase V – Maturação: relativa estabilização após a matéria orgânica ter sido praticamente toda degradada na fase metanogênica. A produção de gás praticamente acabou, pois os nutrientes foram consumidos e se tornaram escassos.

Nos primeiros três meses seguintes à disposição do resíduo, já pode haver presença de metano, chegando, por vezes, a durar até mais de 30 anos após o fechamento do aterro (MARTINS, 2017).

Em virtude da disposição dos resíduos em aterros não acontecer somente uma vez, mas constantemente, nestes locais há lixo em todos os estágios de degradação, em distintas áreas (BARROS, 2013).

Uma vez que os resíduos dispostos em aterro sanitário são heterogêneos, o tempo de deterioração da matéria orgânica é diferente para cada tipo, visto que cada substância tem suas particularidades.

2.4.3 Características do biogás

O biogás possui um volume significativo de metano em sua composição. Por essa razão é considerado combustível e poluente, já que o metano tem alto poder calorífico, ou seja, libera muita energia quando é queimado, e é um dos gases de efeito estufa, agravando o aquecimento global, por se encontrar em excesso na atmosfera, em razão de atividades humanas.

O metano é 20 vezes mais poluente que o dióxido de carbono, e os dois são os principais gases de efeito estufa. Entretanto, quando o biogás é queimado, o seu nível de poluição diminui, também é menos maléfico que os combustíveis fósseis e tido como uma fonte de energia renovável. (DAVIES e STULP, 2016).

Um dos benefícios do biogás é seu alto poder calorífico que varia entre 5.000 a 7.000 kcal/m³ (EMBRAPA, [s.d]). Então, além de ser mais recomendável que os combustíveis fósseis, o biogás é uma excelente fonte energética e traz vantagens

como: redução da poluição hídrica e atmosférica, fornecimento de créditos de carbono e diversificação da matriz energética do país.

Como a formação desse gás acontece de forma espontânea em aterros sanitários, o melhor a fazer é aproveitar a energia derivada de sua combustão. Porém é preciso ter atenção em seu manuseio, por se tratar de um gás inflamável.

2.4.4 Coleta do Biogás de Aterro

Os gases de aterro, originados da degradação de material orgânico, são coletados por drenos e conduzidos para a combustão em flares, uma forma de tratamento do biogás (CANDIANI e SILVA, 2011).

Evidencia-se dois sistemas básicos de coleta: passivo e ativo. O sistema passivo tem o propósito de minimizar os impactos causados pelos gases gerados e emitidos no aterro, conduzindo-os para a atmosfera através de drenos. O sistema ativo possui exaustores e compressores e tem como finalidade o aproveitamento energético dos gases de aterro (ENSINAS, 2003).

Os drenos já se encontram na maioria dos aterros, precisando apenas de adaptações e assim sendo conectados no sistema de coleta. As tubulações dos drenos são conectadas a locais de correção do fluxo de biogás, mantendo-o sempre constante, estes por sua vez são unidos a uma linha principal que envia o biogás ao seu destino, queima em flares ou reaproveitamento energético (MONTAGNA, 2013).

Após a coleta, o biogás passa por um processo de tratamento para remoção de condensados e algumas impurezas, assim como a umidade ainda presente, pois estes componentes podem comprometer os equipamentos e a eficiência do sistema de aproveitamento energético.

2.4.5 Aplicação do Biogás – Geração de energia elétrica

O biogás pode ser empregado em quase todas as funções exercidas pelo gás natural. Todavia para algumas funções, o biogás precisa passar por um tratamento antes de ser utilizado, pois exige um grau de pureza maior para ser eficiente. As aplicações mais habituais do biogás são para o aquecimento e para a geração de eletricidade e, em menor demanda, é utilizado como combustível veicular e inserção na rede de gás natural (ZANETTE, 2009).

Vale salientar o caso dos aterros sanitários, setor de maior crescimento no fornecimento de biogás do Brasil. A produção de biogás nesses lugares acontece de forma espontânea, o que facilita a implantação de projetos no local, requerendo somente o investimento no sistema de filtragem e no uso energético do biogás. Nestes esquemas, a maior aplicação do biogás é na geração de energia elétrica (FERNANDES e MARIANI, 2019).

No Brasil, a potência total instalada de geração elétrica, em 2019, foi de 172.258 MW e o biogás colaborou com 186 MW (MME, 2020). Em 2007, esse gás possuía apenas 20 MW de potência instalada, evidenciando um alto crescimento médio ao longo dos anos (EPE, 2017).

2.5 CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

A conversão de energia é a transformação de uma forma de energia em outra, no caso do biogás, destaca-se a geração de energia térmica que pode ser convertida em outras formas de energia, como mecânica e elétrica. Existem inúmeras tecnologias para a conversão do biogás, em sequência serão especificadas as três tecnologias mais usuais.

2.5.1 Caldeiras

As caldeiras são equipamentos para queima de combustíveis, onde o produto dessa ação é o calor, que esquentar a água do sistema e fornece vapor d'água, que por sua vez pode ser encaminhado para processos industriais ou servir para mover turbinas e gerar eletricidade.

Estes maquinários podem ser modificados para uso do biogás. O fluxo de gás metano é inferior aos outros combustíveis e a presença de água e substâncias corrosivas podem comprometer a integridade do equipamento. Para isso necessita-se de algumas adequações às características do gás (ENSINAS, 2003).

O ciclo do vapor d'água pode ser chamado de Ciclo de Rankine, uma fonte externa fornece calor e gera trabalho. Um esquema representativo desse fenômeno pode ser observado na Figura 5 (FIGUEIREDO, 2011).

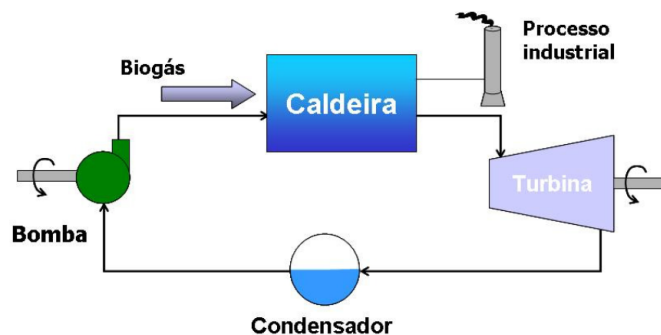


Figura 5 – Ciclo de Rankine

Fonte: FIGUEIREDO, 2011

2.5.2 Motores de combustão interna

Denomina-se motor de combustão interna ou motor de explosão, uma máquina onde se queimam combustíveis, deste processo resulta energia térmica, e esta é transformada em energia mecânica.

Os motores de combustão interna podem ser divididos em dois grupos: motores do ciclo Otto, e motores do ciclo Diesel. No ciclo Otto, a mistura de ar e combustível é aspirada antes de ser comprimida. Já no ciclo Diesel, o ar é aspirado e comprimido, e só então o combustível é injetado (PEREIRA, 2011).

A combinação do motor com gerador elétrico é colocada em funcionamento com a finalidade de gerar eletricidade. Vale ressaltar que o sistema de geração pode ser ampliado quando o volume de gases produzidos no aterro crescem, simplesmente aumentando a quantidade de motores (ENSINAS, 2003).

2.5.3 Turbinas e Microturbinas a Gás

Define-se turbina e microturbina o conjunto de três aparelhos: compressor, combustor e turbina, uma representação esquemática é apresentada na Figura 6. O funcionamento desse maquinário é explicado pelo ciclo Brayton, em que o fluido utilizado encontra-se sempre em estado gasoso, operando sob pressão constante.

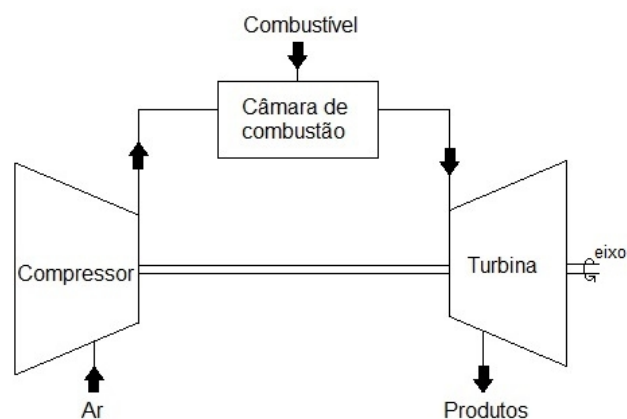


Figura 6 – Turbina a gás

Fonte: Adaptado Epa, 2002.

As turbinas são uma opção em projetos com potência igual ou superior a 3 MW, já as microturbinas têm se tornado uma opção para sistemas de pequeno porte, com 30 a 100 kW de potência (U.S. EPA, 2002).

O uso de microturbinas é interessante quando há pouca vazão de gás, em substituição de motores de combustão interna e turbinas por não trabalharem bem nessa condição; e em sistemas de grande porte onde há biogás sem aproveitamento, mitigando essa perda (ENSINAS, 2003).

Do exposto pode-se observar que os equipamentos de conversão de energia aceitam o biogás com um índice de metano relativamente baixo, não sendo necessária a filtração do gás, o que reduz o custo do sistema. As tecnologias de conversão de energia mais escolhidas com o intuito de fornecer eletricidade, usando biogás como combustível, são as turbinas e os motores de combustão interna (LOPES, 2015).

As turbinas e microturbinas emitem menos gás NO_x (óxido de nitrogênio), causador de grande impacto no efeito estufa, quando comparadas aos motores, por essa razão é uma tecnologia considerada vantajosa para utilização (BARROS, 2013).

Entretanto, os motores de combustão interna são mais usados em projetos de aterro sanitário, por causa de seu baixo custo em relação às turbinas e alta eficiência com biogás. Os motores funcionam em conjunto com geradores elétricos, a fim de gerar energia elétrica.

2.6 MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE METANO

Há diversos modelos para simular a quantidade de biogás produzido em aterros sanitários, e todos se fundamentam na vazão de metano, principal composto desse gás. Nesta seção serão apresentados três deles: o modelo desenvolvido pelo IPCC; o modelo desenvolvido pela U.S. EPA, chamado de Landgem; e o modelo nacional desenvolvido pela CETESB.

2.6.1 Modelo do Intergovernmental Panel of Climate Change

O IPCC (2006) apresenta uma metodologia para determinar a emissão de CH₄ proveniente dos resíduos de aterro sanitário, conhecida como método de decaimento de primeira ordem. Este assume que o carbono orgânico degradável (COD) presente nos resíduos se decompõe lentamente ao longo de décadas, afirmando que as emissões de CH₄ ocorrem por um longo período após a deposição dos resíduos. Esta metodologia é representada pela Equação 1.

$$E_{CH_4} = \left[\sum_x CH_4(gerado)_{x,T} - R_T \right] * (1 - OX_T) \quad (1)$$

Onde:

E_{CH_4} = quantidade de CH₄ emitido no ano T (tonelada);

$CH_4(gerado)_{x,T}$ = quantidade de CH₄ gerado a partir da decomposição de resíduos (tonelada);

x = categoria por tipo de resíduo;

T = ano de deposição do resíduo;

R_T = CH₄ recuperado no ano T (tonelada);

OX_T = fator de oxidação no ano T, o valor recomendado pelo IPCC é 0,1.

Para estimar a geração de metano é necessário primeiramente calcular a parte do carbono orgânico degradável que será decomposto (C_{ODD_m}), aplicando da Equação 2.

$$C_{ODD_m} = W * COD * COD_f * FCM \quad (2)$$

Onde:

C_{ODD_m} = massa de decomposição do COD depositada (tonelada);

W = quantidade de lixo depositado (tonelada);

COD = Carbono orgânico degradável (ton C/ Tton resíduo);

COD_f = COD que realmente se degrada, o valor recomendado pelo IPCC é de 0,77;

FCM = Fator de correção para o CH₄ (fração).

- COD

O carbono orgânico degradável é calculado através da quantidade de COD em cada tipo de resíduo e da porcentagem deste resíduo. A Tabela 2 exibe os valores de COD recomendados pelo IPCC.

Tabela 2 – Valores recomendados de COD para cada tipo de resíduo

Tipos de resíduos	% de COD (por peso)
A. Papel e papelão	40
B. Matéria orgânica	15
C. Resíduos de madeira	30

Fonte: adaptado IPCC, 2006.

Aplicando os valores da Tabela 2, o COD pode ser calculado pela Equação 3.

$$COD = (0,4 * A) + (0,15 * B) + (0,30 * C) \quad (3)$$

Onde:

A: porcentagem dos RSU que correspondem ao papel e papelão

B: porcentagem dos RSU que correspondem a matéria orgânica

C: porcentagem dos RSU que correspondem a resíduos de madeira

• Fator de Correção do Metano

O fator de correção do metano (FCM) leva em consideração a situação de gerenciamento do aterro para estabelecer o índice de correção. Na Tabela 3 são apresentados os fatores de correção do metano, recomendados pelo IPCC.

Tabela 3 – Valores recomendados de fator de correção do metano

Tipo de aterro	FCM
Adequado – anaeróbico	1
Adequado – semiaeróbico	0
Inadequado – profundo (≥ 5 m de resíduos)	0,8
Inadequado – raso (< 5 m de resíduos)	0,4
Sem categoria – valor padrão	0,6

Fonte: IPCC, 2006.

O ano em que o material residual foi depositado no aterro sanitário não é relevante para a quantidade de CH₄ gerado a cada ano. O que realmente importa é a massa total do material em decomposição que se encontra atualmente no local. Isso faz com que cada ano possa ser considerado o primeiro ano no método de estimativa, e os cálculos para essa estimativa são feitos pelas Equações 4 e 5, mostradas a seguir, tendo como 1º de janeiro do ano após a deposição o início da reação de decaimento (IPCC, 2006).

$$CODDma_T = CODDmd_T + (CODDma_{T-1} * e^{-k}) \quad (4)$$

$$CODD_m decomp_T = CODDma_{T-1} * (1 - e^{-k}) \quad (5)$$

Onde:

$CODDma_T$ = $CODD_m$ acumulado no aterro ao final do ano T (tonelada);

T = ano de deposição do resíduo;

$CODDmd_T$ = $CODD_m$ depositado no aterro no ano T (tonelada);

$CODDma_{T-1}$ = $CODD_m$ acumulado no aterro ao final do ano T-1 (tonelada);

k = constante de reação (ano⁻¹), calculado pela fórmula $k = \ln(2) / t_{1/2}$;

$t_{1/2}$ = tempo de meia vida (ano);

$CODD_m decomp_T$ = $CODD_m$ decomposto no ano T (tonelada).

- **Geração de metano a partir da decomposição de $CODD_m$**

A quantidade de metano gerado pela decomposição dos resíduos de aterro sanitário é dada pela Equação 6.

$$CH_4 gerado_T = CODD_m decomp_T * F * \frac{16}{12} \quad (6)$$

Onde:

$CH_4 gerado_T$ = quantidade de CH₄ gerado da decomposição de resíduos (tonelada);

$CODD_m decomp_T$ = $CODD_m$ decomposto no ano T (tonelada);

F = fração de metano presente no biogás;

16/12 = conversão de carbono em metano.

2.6.2 Modelo Landgem

O modelo desenvolvido pela U.S. EPA é conhecido como Modelo de Emissões de Gases em Aterros (Landgem – Landfill Gas Emissions). O software disponibilizado pela agência estima a emissão de metano por meio do modelo cinético de primeira ordem, exibido na Equação 7 (U.S. EPA, 1991).

$$Q_{CH_4} = L_o * R * (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (7)$$

Onde:

Q_{CH_4} = quantidade de metano gerado no tempo t (m^3 / ano);

L_o = potencial de geração de metano (m^3 CH₄ / ton resíduo);

R = média anual de rejeitos aceitos durante a vida ativa do aterro (ton / ano);

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

c = tempo desde o fechamento do aterro, c = 0 para aterros ativos (ano);

t = tempo desde o início do funcionamento do aterro.

Os padrões do modelo se baseiam em dados de aterros sanitários dos Estados Unidos. Quando há dados de campo, podem ser usados no lugar dos valores padrões. O potencial de geração de metano e a constante de geração de metano podem ser calculados, mas a U.S. EPA sugere valores padrões para estes fatores (U.S. EPA, 1991).

- **Potencial de geração de CH₄ (L_o):** varia entre 6,2 a 270 m^3 CH₄ / ton resíduo, o valor recomendado pela U.S. EPA é de 100 m^3 CH₄ / ton resíduo (U.S. EPA, 1991).
- **Constante de geração de CH₄ (k):** definida pelo índice pluviométrico da região. Na Tabela 4 são mostrados os valores recomendados pela (U.S. EPA, 1991).

Tabela 4 – Valores recomendados de k

Pluviometria	Valores de k
< 635 mm / ano	0,02
> 635 mm / ano	0,04

Fonte: U.S. EPA, 1991.

2.6.3 Modelo da CETESB

A CETESB (2006) conveniada à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) desenvolveu o programa Biogás: geração e uso energético – aterros, e um manual para uso deste, orientando o uso energético do biogás, onde estima-se as emissões de metano e biogás e a energia disponível em aterros sanitários.

O programa tem por base o modelo de primeira ordem da U.S. EPA para estimar a emissão de metano em aterros sanitários, que pode ser dado pela Equação 8, quando o aterro ainda está em funcionamento.

$$Q_x = k * R_x * L_o * e^{-k(x-T)} \quad (8)$$

Onde:

Q_x = metano gerado no ano x pelo resíduo depositado no ano T ($m^3 CH_4$ / ano);

k = constante de decaimento (ano^{-1});

R_x = fluxo de resíduo depositado no ano x (kg);

L_o = potencial de geração de metano (m^3 de biogás / kg de resíduo);

x = ano atual (ano);

T = ano de deposição do resíduo no aterro (ano).

Estima-se a vazão total de metano ao ano pela soma das vazões de metano, conforme mostra a Equação 9.

$$\sum Q_x = k * L_o * \sum (R_x * e^{-k(x-T)}) \quad (9)$$

Onde:

$\sum Q_x$ = soma de todas as vazões de metano ($m^3 CH_4$).

As informações sobre a quantidade de resíduo que o aterro recebe são fundamentais para as estimativas. Já para L_o e k há valores sugeridos, que também podem ser calculados e modificados.

- **Constante de geração de CH_4 (k):** os valores sugeridos de k pela CETESB (2006) são associados à precipitação anual no local, variando de 0,001 em climas

mais secos a 0,15 em climas mais úmidos. Caso não haja conhecimento sobre esses dados, a CETESB sugere um valor padrão de 0,08.

- **Potencial de geração de CH₄ (L₀):** o valor de L₀ recomendado pela CETESB (2006) varia de acordo com o nível de degradabilidade do resíduo, entre 0,001 para resíduos pouco orgânicos a 0,312 para resíduos muito orgânicos, se essas informações forem desconhecidas, o valor sugerido pela CETESB é de 0,12.
- **Fluxo de resíduos (R_x):** em caso de não haver conhecimento do histórico da quantidade de resíduos depositados no aterro desde o início do funcionamento, mas houver dos dados atuais, o programa calcula o fluxo anual de resíduos desde a abertura do aterro, com base no volume diário de resíduos depositados atualmente e na estimativa da taxa de crescimento do fluxo de resíduos que o aterro recebe desde a sua abertura até o seu fechamento (CETESB, 2006).

Na falta de informação a respeito do fluxo de resíduo atual, pode-se fazer a estimativa através da população atendida pelo serviço de coleta. A estimativa é feita pela Equação 10.

$$R_x = Pop_x * T_{RSD} * T_{coleta} \quad (10)$$

Onde:

R_x = fluxo de resíduos no ano x (ton / ano);

Pop_x = população atendida pelo aterro no ano x (hab.);

T_{RSD} = taxa de geração de resíduo por habitante (ton / hab. Ano), a CETESB (2006) sugere o valor de 0,183;

T_{coleta} = taxa de coleta de resíduo (%), o valor de 88 é sugerido pela CETESB (2006).

- **População atendida pelo aterro (Pop_x):** a estimativa da população é realizada pela Equação 11.

$$Pop_x = Pop_0 * (1 + i)^{x - ano_0} \quad (11)$$

Onde:

Pop₀ = população atendida pelo aterro no ano atual (hab.);

i = taxa de crescimento populacional (%), valor sugerido de 1,7 pela CETESB;

x = ano considerado (ano);

ano₀ = ano atual (ano).

2.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a execução de um projeto é necessário fazer a análise da viabilidade econômica do investimento, para definir se o empreendimento é realizável ou não. Esta análise consiste no fornecimento de dados a respeito da rentabilidade e lucratividade do investimento. Nesta seção serão apresentadas algumas ferramentas para a realização deste estudo.

2.7.1 Fluxo de caixa (FC)

A avaliação de investimento tem como base o fluxo de caixa, medido pela diferença entre os fluxos efetivos de recursos de entrada e de saída de caixa, para todo período de tempo estipulado. O dimensionamento dos valores do fluxo de caixa é o ponto determinante para a decisão do investimento. Avaliar projetos baseando-se nos resultados de caixa se deve a uma necessidade econômica, exibindo a real capacidade da empresa em remunerar o capital aplicado e investir novamente utilizando os ganhos gerados (ASSAF NETO, 1992).

2.7.2 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

Na análise de investimento, a taxa de atratividade é considerada a meta econômica mínima a ser alcançada. O método do valor presente líquido e o método da taxa interna de retorno são exemplos de aplicação dessa taxa (ASSAF NETO, 1992). Para um projeto ser executável economicamente é necessário que ele atenda aos critérios exigidos pelos parâmetros de avaliação.

2.7.3 Valor Presente Líquido (VPL)

O método do valor presente líquido consiste na diferença entre o investimento inicial e o valor presente da entrada de caixa, descontadas a taxa de custo de capital. Quando o VPL é maior que zero, a empresa obtém um retorno monetário maior que o investimento inicial, tornando o projeto economicamente atraente, em caso contrário, o projeto acarretará em prejuízo (GITMAN, 2010)

2.7.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno é o percentual de desconto que iguala o valor presente das entradas de caixa de um projeto ao investimento inicial, resultando num VPL igual a R\$ 0,00. Também é considerada a taxa de retorno anual composta que uma empresa receberá, se conseguir obter as entradas de caixa previstas do projeto no qual investiu. Se a TIR for maior que o custo de capital, o projeto poderá ser aceito, caso contrário, o projeto deverá ser recusado (GITMAN, 2010).

2.7.5 Índice de Lucratividade (IL)

O índice de lucratividade é expresso pela associação dos valores presentes dos fluxos operacionais líquidos de entrada e saída de caixa. A obtenção de um IL superior a 1, indica um VPL maior que zero, resultando num projeto economicamente viável, do contrário, o projeto é inviável (ASSAF NETO, 1992).

2.7.6 Período de *Payback*

O período de *payback* é o tempo que a empresa leva para ter o retorno do investimento inicial, calculado através das entradas de caixa. No caso da anuidade, esse período pode ser calculado dividindo-se o investimento inicial pela entrada de caixa anual. Já no caso de variadas entradas de caixa, as entradas anuais precisam ser acumuladas até a recuperação do investimento inicial. Embora o período de *payback* seja popular, ele não é muito recomendável, pois não considera explicitamente o valor do dinheiro no tempo (GITMAN, 2010).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia deste trabalho é de finalidade aplicada com caráter exploratório, visto que faz um estudo de caso associado a uma pesquisa bibliográfica, onde os dados são definidos a partir da teoria.

O estudo de caso fundamenta-se no estudo intenso e profundo de um ou poucos objetos, permitindo um conhecimento específico, detalhado e abrangente do tópico em questão (GIL, 2002).

3.1 ESTUDO DE CASO

O Aterro Sanitário de Palmas – TO, área de estudo, encontra-se a aproximadamente 25 km de distância do centro do plano diretor de Palmas e a 6 km de Taquaralto, na zona rural ao sul da cidade (TONELLOTTI, 2019).

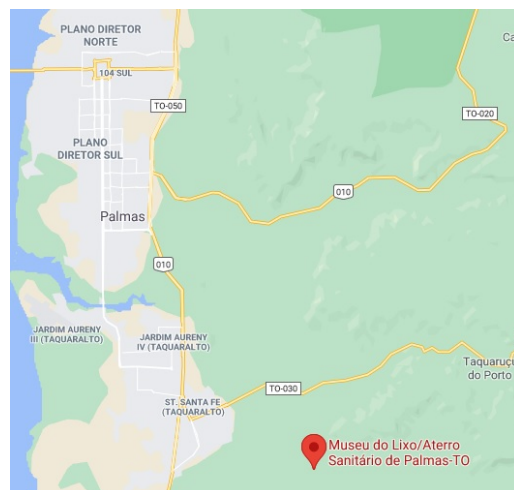


Figura 7 – Localização do Aterro Sanitário de Palmas

Fonte:GOOGLE (2021).

No local ocorre o controle de cargas que o aterro recebe por meio de uma balança com capacidade de 30 toneladas, fazendo assim a quantificação dos

resíduos gerados. Estes são dispostos em células impermeabilizadas com geomembrana de polietileno de alta densidade de 2 mm, e compactados através de um trator de esteira. Faz-se uso também de pá mecânica, retroescavadeira e caminhão basculante (TONELLOTO, 2019).

Os gases produzidos no aterro são drenados por tubos de concreto, verticais e perfurados, com 0,4 m de diâmetro interno, protegidos por brita nº 04 e tela. Para realizar o tratamento do chorume são utilizados dois sistemas, cada um é composto por três lagoas de tratamento e uma vala de infiltração. Essas lagoas ocupam uma área de 26 mil m², onde o chorume passa por um tratamento natural decorrente de bactérias e microrganismos presentes no próprio líquido. Na última lagoa, a água já conta com mais de 80% de pureza (TONELLOTO, 2019).

3.2 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE BIOGÁS GERADO

Para estimar a vazão de biogás, aplicou-se a metodologia da CETESB, por ser nacional, tendo assim, mais proximidade com a realidade das condições climáticas e ambientais da região. Também por apresentar estimativas de potência e energia elétrica.

Tanto o potencial de geração do metano (L_o), quanto o carbono orgânico degradável (COD) foram calculados por métodos do IPCC. O L_o foi calculado pela Equação 12, determinada pelo IPCC (1997) e o COD pela Equação 3.

$$L_o = FCM * COD * COD_f * F * \frac{16}{12} \quad (12)$$

Onde:

L_o = potencial de geração do metano (m³ CH₄ / kg resíduo);

FCM = fator de correção do metano;

COD = carbono orgânico degradável;

COD_f = parte do carbono orgânico degradável que se degrada;

F = porcentagem de metano que compõe o biogás;

16/12 = massa molecular do metano e do carbono.

3.3 ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE POTÊNCIA DISPONÍVEL

A CETESB (2006) apresentou uma fórmula matemática para estimar a potência disponível do biogás gerado em aterro sanitário, apresentada a seguir.

$$P = \frac{Q * PCI}{31.536.000} * E_c * \frac{1}{1000} \quad (13)$$

Onde:

P: potência disponível (kW);

Q: vazão de biogás coletado (m³ /ano);

PCI: poder calorífico inferior do biogás (kJ / m³), (35,53x10⁶ J / m³ CH₄);

31.536.000: tempo de operação em um ano (s)

E_c: eficiência de coleta do gás (adotado valor padrão de 75%);

1/1000 = para transformação de unidade de J/s para kW.

A transformação do metano em energia no período de um ano é dada pelo seguinte cálculo:

$$E = P_x * t \quad (14)$$

Onde:

E: energia elétrica útil (kWh/mês);

P_x: potência elétrica (kW);

t: número de horas de funcionamento no ano, (valor adotado de 22 h/dia, 30 dias/mês, descontando algumas horas para eventuais paradas de manutenção).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

As primeiras informações que o programa da CETESB versão 1.0 solicita para estimativa de biogás de aterro são: localização do aterro e quantidade de drenos existentes no local, que, segundo Tonello (2019), são 37 drenos.

Após preenchidos os dados sobre a localização do aterro, foram pedidos os dados de entrada para calcular a produção de metano. As informações requeridas foram: constante de decaimento (k), potencial de geração do metano (L_0) e fluxo de resíduos (R_x). Para k foi considerado o valor sugerido pelo programa de 0,08.

O potencial de geração do metano foi calculado de acordo com a fórmula do IPCC (Equação 12), primeiramente calculando o COD (Equação 3). Para determinar o COD faz-se necessário conhecer a composição dos resíduos dispostos no local. Conforme Coelho e Oliveira (2012), o perfil da composição gravimétrica dos resíduos do Aterro Sanitário de Palmas – TO é apresentado na Figura 7.

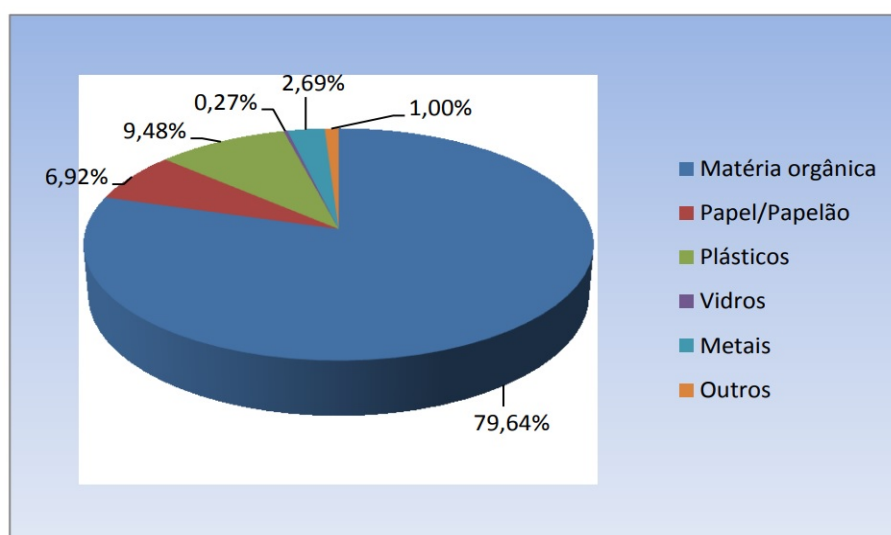


Figura 8 – Gráfico da composição gravimétrica dos resíduos do Aterro Sanitário de Palmas – TO

Fonte: COELHO e OLIVEIRA (2012)

O cálculo de COD, realizado a partir da Equação 3, adotando-se os valores de Coelho e Oliveira (2012), sendo 6,92% de papel e papelão e 79,64% de matéria orgânica, é mostrado a seguir:

$$COD = (0,4 \times 6,92\%) + (0,15 \times 79,64\%)$$

$$COD = 14,714\%$$

$$COD = 0,147 \text{ kg de C / kg de resíduo}$$

Depois de determinado o COD, calculou-se o potencial de geração do metano, conforme a Equação 12:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times (16/12)$$

$$L_0 = 1 \times 0,147 \times 0,77 \times 0,5 \times (16/12)$$

$$L_0 = 0,075 \text{ kg de CH}_4 \text{ / kg de resíduo}$$

A densidade do metano em condições normais de pressão e temperatura é $\rho = 0,0007168 \text{ ton / m}^3$. Portanto, utilizando a densidade para transformar o valor encontrado de massa (m) em volume, unidade de medida padrão do potencial de geração de metano, obtêm-se o seguinte cálculo:

$$L_0 = m / \rho$$

$$L_0 = 0,075 / 0,0007168$$

$$L_0 = 104,632 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ / ton. de resíduo}$$

$$L_0 = 0,105 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ / kg de resíduo}$$

O fluxo de resíduos que o aterro sanitário de Palmas recebe foi previsto por meio da taxa de crescimento populacional, em conjunto com a população atual e a quantidade de resíduos gerados por habitante ao ano.

Essa foi a opção escolhida por não se ter os dados desde a abertura do aterro. Também definiu-se o ano de 2019 como o ano de início, pelo mesmo motivo. Há dados de campo a respeito desse ano, aferidos por Tonellotto (2019), o que facilita observar se os dados teóricos estão em conformidade.

A taxa de crescimento populacional da cidade de Palmas – TO foi determinada a partir da média entre as taxas dos últimos 5 anos, exibidas na Tabela 5, sucedendo numa taxa de crescimento populacional igual a 2,3%.

Tabela 5 – Taxa de crescimento populacional de Palmas – TO

Ano	População (hab.)¹	Taxa de crescimento (%)
2016	279.856	2,61
2017	286.787	2,48
2018	291.855	1,77
2019	299.127	2,49
2020	306.296	2,40

Fonte: Autor (2020).

Tonellotto (2019) constata que o fluxo diário de resíduos em 2017 era de 221 toneladas. Neste mesmo ano, a população era de 286.787 habitantes, segundo IBGE *apud* PALMAS (2017), resultando numa média de 0,771 kg/ hab./dia.

Considerando um aumento de 1% ao ano na taxa diária de resíduos gerados por pessoa, em 2020, essa taxa chega a aproximadamente 0,794 kg/ hab./dia de resíduos ou a 0,29 ton./hab./ano. Segundo o IBGE (2020), a população de Palmas – TO é estimada em 306.296 habitantes em 2020.

O programa processou esses dados e computou um fluxo de resíduos igual a 111.396 t./ano. Em seguida, os resultados da estimativa de vazão de metano são mostrados, conforme observado no Apêndice A.

O comportamento da curva de geração de metano é dada em relação ao período em que o aterro recebe lixo e o pico dessa curva acontece no último ano de funcionamento do aterro, ou seja, o ano em que o aterro apresenta maior fluxo de metano é o seu último ano recebendo resíduos.

Conforme estudo de campo realizado no Aterro Sanitário de Palmas – TO pela Tonellotto (2019), o biogás coletado era composto principalmente por metano, sendo este elemento responsável pela composição de 55,3% da mistura gasosa.

No local da pesquisa foi aferido um acúmulo de 18,12 m³ de biogás por dia em apenas um dreno do aterro. Avaliando a existência de 37 drenos no local, pode-se prever um acúmulo diário de aproximadamente 670,44 m³ de biogás

¹ Estimativa do IBGE.

(TONELLOTTI, 2019). Consequentemente a quantidade de metano chega a 370,75 m³ por dia e a 135.325 m³ por ano, considerando a concentração de 55,3%.

Todavia, mediante estimativa teórica, a quantidade coletada de metano no ano de 2021 seria de 547.000 m³. Vale ressaltar que há margem de erro nos cálculos, além de outros fatores, como a falta de condições para averiguar na prática alguns valores, instabilidade da coleta do metano, poucas amostras para comparação e os drenos não possuírem a mesma vazão uns dos outros, o que afeta o valor final se aferido apenas em um dreno e em um curto período de tempo.

4.2 CÁLCULO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL

A potência disponível é exibida após os resultados da vazão de metano. Os valores são gerados automaticamente pelo programa a partir da Equação 13. O Apêndice B mostra estes dados computados.

Para o ano de 2021 foi previsto uma potência disponível de 1.752 kW e para o ano de 2040, último ano de funcionamento do aterro, uma potência de 9.114 kW, máximo valor previsto de potência disponível ao longo dos anos.

Através desta mensuração é possível determinar os equipamentos necessários para a geração de energia elétrica. No caso, a melhor escolha são motores de combustão interna, acoplados a geradores, por serem mais eficientes e relativamente econômicos que as turbinas a gás em projetos de pequeno porte; e a possibilidade de modificação do sistema, depois de construído, devido a incerteza da produção futura de biogás.

Os motores de combustão interna apresentam uma eficiência média de 28%. Aplicando essa taxa à potência disponível, obtêm-se a potência elétrica do grupo motogerador. Os resultados dessa ação são expostos no Apêndice B.

4.3 ENERGIA ELÉTRICA ÚTIL

Após obtido os resultados da estimativa do potencial elétrico, aplica-se esses valores na Equação 14 para definir a energia elétrica útil. Com os dados de potência elétrica, utilizou-se a plataforma LibreOffice Calc para calcular a energia elétrica útil fornecida por mês, os resultados, mais detalhes são apresentados no Apêndice B.

4.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Para determinar a viabilidade econômica do projeto, primeiramente deve-se orçar os custos de implantação e manutenção da usina de energia elétrica. A Tabela 6 mostra o orçamento de implantação, fornecido pela empresa ER-BR Fontes Renováveis para um projeto de menor escala, adaptado para o projeto desta pesquisa. O custo de manutenção, valor das peças e mão de obra, foi previsto em R\$ 10,14 por hora, resultando em R\$ 70.980,00 por ano.

Tabela 6 – Custos de implantação e manutenção da usina

	Unidade	Dimensão da Usina
Custo do projeto	-	R\$ 70.000,00
Painel – proteção geração distribuída – até 500 kW/h (2x420 kVA)	R\$ 95.970,00	R\$ 479.850,00
Grupo gerador – SCANIA 420 kVA / 260 kW	R\$ 537.700,00	R\$ 5.377.000,00
Tratamento de biogás	R\$ 45.700,00	R\$ 457.000,00
Start up	R\$ 12.700,00	R\$ 127.000,00
Custo geração distribuída	R\$ 88.700,00	R\$ 887.000,00
Total	-	R\$ 7.327.850,00

Fonte: adaptado ER-BR Energias Renováveis.

Em seguida, deve-se calcular o retorno que o projeto vai oferecer. Para isso faz-se necessário o conhecimento do preço da energia elétrica no mercado de venda. Em 2019 esse valor foi previsto para R\$ 176,00 / MWh (InfoPLD *apud* CANAL ENERGIA, 2019). Este foi o valor adotado para calcular as receitas líquidas, conforme apresentado no Apêndice C.

Estabelecidos os valores do custo do investimento inicial, da manutenção e das receitas líquidas anuais, pode-se então avaliar a viabilidade econômica do projeto. As ferramentas utilizadas para essa finalidade foram: fluxo de caixa (FC), valor presente líquido (VPL), taxa mínima de atratividade (TMA) e taxa interna de retorno (TIR). O *Excel* foi o programa escolhido para a realização dos cálculos.

O fluxo de caixa estimado é apresentado na Tabela 7, sendo o valor presente do fluxo de caixa livre (VP do FCL) calculado por meio de uma taxa mínima de atratividade igual a 10,5%. Conclui-se que o investimento salda a dívida e começa a gerar lucro a partir do décimo ano.

Tabela 7 – Fluxo de caixa do investimento aplicando a taxa mínima de atratividade

Fluxo de caixa (R\$)					
Ano	Entrada ²	Saída ³	FCL	VP do FCL	FCL acumulado
0	-	-7.327.850,00	-7.327.850,00	-7.327.850,00	-7.327.850,00
1	683.801,40	-70.980,00	612.821,40	554.589,50	-6.773.260,50
2	888.707,64	-70.980,00	817.727,64	669.705,89	-6.103.554,60
3	1.083.856,44	-70.980,00	1.012.876,44	750.705,56	-5.352.849,04
4	1.270.028,39	-70.980,00	1.199.048,39	804.243,57	-4.548.605,47
5	1.448.004,10	-70.980,00	1.377.024,10	835.853,47	-3.712.751,99
6	1.618.954,44	-70.980,00	1.547.974,44	850.335,12	-2.862.416,87
7	1.782.879,44	-70.980,00	1.711.899,44	851.024,97	-2.011.391,90
8	1.940.949,96	-70.980,00	1.869.969,96	841.271,94	-1.170.119,96
9	2.093.556,33	-70.980,00	2.022.576,33	823.463,62	-346.656,33
10	2.241.479,12	-70.980,00	2.170.499,12	799.717,93	453.061,60

2 Valores das receitas líquidas anuais.

3 Custo anual de manutenção.

Fluxo de caixa (R\$)					
Ano	Entrada	Saída	FCL	VP do FCL	FCL acumulado
11	2.385.498,93	-70.980,00	2.314.518,93	771.748,30	1.224.809,89
12	2.525.225,47	-70.980,00	2.454.245,47	740.577,75	1.965.387,65
13	2.661.829,63	-70.980,00	2.590.849,63	707.510,02	2.672.897,66
14	2.795.311,41	-70.980,00	2.724.331,41	673.268,11	3.346.165,77
15	2.926.451,40	-70.980,00	2.855.471,40	638.621,66	3.984.787,43

Fonte: Autor (2021).

Para o VPL do investimento considerou-se dois descontos, 18% e 15%, conforme exposto na Tabela 8. Pode-se observar que o projeto tornou-se viável apenas para o desconto de 15% em um período de 15 anos.

Tabela 8 – Valor Presente Líquido do Investimento

VPL		
	Período	
	10 anos	15 anos
Desconto de 18%	-R\$ 1.647.337,02	-R\$ 54.385,39
Desconto de 15%	-R\$ 836.746,76	R\$ 1.372.355,09

Fonte: Autor (2021).

A taxa interna de retorno aplicada em 15 anos foi igual a 12%, ou seja, o retorno que se espera obter com o investimento.

Como o valor presente líquido é positivo considerando o desconto de 15% e a taxa interna de retorno é maior do que a taxa mínima de atratividade, o projeto é viável do ponto de vista econômico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho lidou com o estudo da viabilidade de uso do biogás proveniente do aterro sanitário da cidade de Palmas/TO para a geração de energia elétrica. Para isso, como se pode observar no corpo do trabalho, várias etapas foram percorridas, desde o estudo do estado da arte até a avaliação final para determinação da exequibilidade do projeto, dado os retornos envolvidos. Diante do estudo algumas conclusões foram possíveis.

As fontes renováveis ocupam a maior parte da matriz elétrica brasileira, mas esta composição se deve majoritariamente a hidrelétricas, o que é bom no primeiro caso mas não tão bom no segundo devido à falta de diversificação das fontes energéticas.

A solução proposta para este problema é a utilização do biogás como fonte alternativa para geração de eletricidade, possibilitando assim uma melhoria na diversificação da matriz elétrica brasileira.

Com base na análise da viabilidade econômica, pelos dados apresentados, conclui-se que o investimento tem retorno, conforme prazo, sendo assim, a implantação do projeto mostra-se viável. Mesmo a implantação da usina sendo viável, este resultado é sensível a variações do valor presente líquido. Porém, o investimento é de suma importância, tornando-se relevante buscar métodos eficazes para executá-lo.

Os principais pontos positivos que o projeto apresenta são:

- O benefício ambiental devido à redução de metano emitido na atmosfera;
- A comunidade, onde a execução deste gera empregos;
- Redução nos gastos com energia elétrica;
- Favorecimento e diversificação da matriz elétrica.

Conclui-se que o presente trabalho cumpriu seus objetivos e que existe viabilidade da utilização do biogás proveniente do aterro sanitário da cidade de Palmas/TO para geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama**. São Paulo, [2019]. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 09 out. 2020.

ASSAF NETO, Alexandre. **Os métodos quantitativos de análise de investimentos**. Caderno de Estudos, n. 6, São Paulo, FIPECAFI, Out. 1992.

BARROS, T. F. **Geração de energia elétrica com biogás gerado em aterro sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/108487>. Acesso em: 20 out. 2020.

BEN – BANCO ENERGÉTICO NACIONAL. **Balanco Energético Nacional 2020: ano-base 2019**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 22 out. 2020.

BNDES – BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. **Biogás: a próxima fronteira da energia renovável**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biogas>. Acesso em: 27 set. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010**. Dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 28 out. 2020.

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. *In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: https://www.fans.edu.br/wp-content/uploads/2015/06/texto_matrizes_energeticas_brasil_cenario_2010.2030.pdf. Acesso em: 21 out 2020.

CANAL ENERGIA. **CCEE: preço médio em 2019 deve ficar em R\$ 176/MWh**. [S. l.], 30 jul. 2019. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/noticias/53106618/ccee-preco-medio-em-2019-deve-ficar-em-r-176mwh>. Acesso em: 19 jan. 2021.

CANDIANI G.; SILVA, M. R. M. **Análise do biogás no aterro sanitário Caieiras**. Seminário de Ciências Exatas e tecnológicas: Londrina, n. 1, p. 69-77, 2011.

Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/download/7902/8317>. Acesso em: 26 out. 2020.

CARVALHO, J. F. **O declínio da era do petróleo e a transição da matriz energética brasileira para um modelo sustentável**. Tese (Doutorado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10062011-163905/en.php>. Acesso em: 21 out. 2020.

CEBDS – CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **O que é desenvolvimento sustentável?** Rio de Janeiro, 24 jan. 2018. Disponível em: <https://cebds.org/desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 23 out. 2020.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético – aterros – versão 1.0**. São Paulo, SMA: CETESB: MCT: 2006. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/softwares/>. Acesso em: 16 nov. 2020.

_____. **Aterros sanitários, aterros controlados e lixões: entenda o destino do lixo no Paraná**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/2017/08/01/aterros-sanitarios-aterros-controlados-e-lixoes-entenda-o-destino-do-lixo-no-parana/>. Acesso em: 12 out. 2020.

_____. **Biogás**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 13 out. 2020.

COELHO, T. C.; OLIVEIRA, R. M. S. **Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro sanitário de Palmas – TO**. Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 1, p. 177-189, 2012. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/include/getdoc.php?id=2074&article=735&mode=pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

DAVIES, F.D e STULP, S. Determinações de gás metano (CH₄) gerado em estação de tratamento de efluentes, com avaliação do poder calorífico para queima em caldeira. **Revista Destaques Acadêmicos**. Lajeado, 2016. Disponível em: <http://univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/1213/1103>. Acesso em: 15 out. 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. [s.d.]. Brasília. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe3qf9d0sy.html>. Acesso em: 18 maio 2021.

ENERGIA. In: MICHAELIS, Dicionário Brasileiro de Língua Portuguesa. 2015. São Paulo: Melhoramentos. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/energia/>. Acesso em: 21 out. 2020.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <https://limpezapublica.com.br/textos/GAS%20-%20ESTUDO%20ATERRO%20DELTA.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética**. In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, out. 2017. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf. Acesso em: 27 out. 2020.

_____. **Matriz energética e elétrica**. [S. l.], [2018]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 27 set. 2020.

FERNANDES, G.; MARIANI, L. **O alto potencial de produção e uso fará do biogás a próxima fronteira da energia renovável no Brasil?** FGV Energia. [S. l.], 2019. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/27831/A28%20coluna_opinioao_2_-_marco.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 26 out. 2020.

FIGUEIREDO, N. J. V. de. 2011. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/publico/NatalieFigueiredo.pdf>. Acesso em 16 out. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GOOGLE, INC. **Google Maps**. 2021. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/Museu+do+Lixo%2FAterro+Sanit%C3%A1rio+de+Palmas-TO/@-10.3247072,-48.2096904,11z/data=!4m5!3m4!1s0x933b252b466c2101:0xb2ef3a9a0873e1f2!8m2!3d-10.3599152!4d-48.2386343>. Acesso em: 18 jun. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/to/palmas.html>. Acesso em: 15 dez. 2020.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and statistics**. [S. l.], [2020]. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/>

country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=Electricity%20generation%20by%20source. Acesso em: 26 set. 2020.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 1997. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>. Acesso em: 20 nov. 2020.

_____. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 5: Waste**. 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>. Acesso em: 10 nov. 2020.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no país vão para reciclagem**. [S. l.], 25 jan. 2017. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296. Acesso em: 09 out. 2020.

KUNZ, A. *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concordia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

MARTINS, L. O. S.; SILVA, L. T.; CARNEIRO, R. A. F. **Análise da viabilidade econômica e financeira da implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus – BA**. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo: Curitiba, v. 2, n. 2, p. 142-166, 2017.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha energética brasileira: ano base 2019**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energetica+Brasileira+-+edi%C3%A7%C3%A3o+2020/ab9143cc-b702-3700-d83a-65e76dc87a9e>. Acesso em: 20 nov. 2020.

MONTAGNA, T. B. **Biogás produzido em aterro sanitário como fonte de energia – uma revisão bibliográfica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – União de Ensino do Sudoeste do Paraná, Dois Vizinhos, Paraná, 2013. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/biogas_produzido_em_aterro_sanitario_como_fonte_de_energia.pdf. Acesso em: 9 set. 2020.

PALMAS é a capital com maior crescimento populacional diz IBGE. **G1**. Tocantins. 30 ago. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/palmas-e-a-capital-com-maior-crescimento-populacional-diz-ibge.ghtml>. Acesso em: 15 dez. 2020.

PEREIRA, J. C. **Motores e geradores: princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupo diesel geradores**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.joseclaudio.eng.br/>. Acesso em: 18 out. 2020.

POHLAND F. G.; HARPER S. R. **Critical Review And Summary Of Leachate And Gas Production From Landfills**. [S. l.]: NEPIS, 1986. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=20007KHC.txt>. Acesso em: 25 out. 2020.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira. **Revista Novos Estudos CEBRAP**. 2007. Disponível em: <http://novosestudos.com.br/produto/edicao-79/>. Acesso em: 21 out. 2020.

TONELLOTO, L. M. **Produção e caracterização do biogás produzido no aterro sanitário de Palmas, Tocantins**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, *Campus Palmas*, 2019. Disponível em: <http://www.ifto.edu.br/palmas/campus-palmas/ensino/biblioteca/Acervo/trabalhos-academicos/engenharia-civil/2019/luana-marinho-tonello.to.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

U.S. EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills - Background Information for Proposed Standards and Guidelines**. 1991. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100AEYT.txt>. Acesso em: 26 nov. 2020.

_____. **Powering Microturbines With Landfill Gas**. 2002. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100112N.txt>. Acesso em: 19 out. 2020.

_____. **Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions form Municipal Solid Waste Landfills**. Washington, 2008. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/draft/db02s04.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2020.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21429297#:~:text=Os%20resultados%20apresentados%20neste%20trabalho,de%20m3%20CH4%20por%20dia.&text=O%20biog%C3%A1s%20tamb%C3%A9m%20se%20mostra,e%20no%20setor%20de%20transporte>. Acesso em: 26 out. 2020.

APÊNDICE A

Tabela 9 – Estimativa da vazão de metano no Aterro Sanitário de Palmas – TO

Ano	Vazão (10³ m³/ano)	Metano coletado (10³ m³/ano)	Lixo Coletado (kg)	Lixo Acumulado (kg)
2019	729	547	86.828.778	86.828.778
2020	1.419	1.065	88.825.840	175.654.618
2021	2.074	1.555	90.868.834	266.523.452
2022	2.695	2.021	92.958.818	359.482.270
2023	3.287	2.465	95.096.870	454.579.140
2024	3.851	2.888	97.284.098	551.863.239
2025	4.391	3.293	99.521.633	651.384.871
2026	4.909	3.681	101.810.630	753.195.501
2027	5.406	4.055	104.152.275	857.347.776
2028	5.885	4.414	106.547.777	963.895.553
2029	6.349	4.761	108.998.376	1.072.893.929
2030	6.797	5.098	111.505.338	1.184.399.267
2031	7.233	5.425	114.069.961	1.298.469.228
2032	7.657	5.743	116.693.570	1.415.162.799
2033	8.071	6.053	119.377.522	1.534.540.321
2034	8.476	6.357	122.123.205	1.656.663.527
2035	8.874	6.655	124.932.039	1.781.595.566
2036	9.265	6.949	127.805.476	1.909.401.042
2037	9.651	7.238	130.745.002	2.040.146.044
2038	10.033	7.525	133.752.137	2.173.898.181
2039	10.411	7.808	136.828.436	2.310.726.618
2040	10.786	8.090	139.975.490	2.450.702.108
2041	9.957	7.468	0	0
2042	9.191	6.893	0	0
2043	8.485	6.363	0	0
2044	7.832	5.874	0	0

Ano	Vazão (10³ m³/ano)	Metano coletado (10³ m³/ano)	Lixo Coletado (kg)	Lixo Acumulado (kg)
2045	7.230	5.423	0	0
2046	6.674	5.006	0	0
2047	6.161	4.621	0	0
2048	5.687	4.266	0	0
2049	5.250	3.938	0	0
2050	4.847	3.635	0	0
2051	4.474	3.355	0	0
2052	4.130	3.097	0	0
2053	3.812	2.859	0	0
2054	3.519	2.639	0	0
2055	3.249	2.437	0	0
2056	2.999	2.249	0	0
2057	2.768	2.076	0	0
2058	2.556	1.917	0	0
2059	2.359	1.769	0	0
2060	2.178	1.633	0	0

Fonte: elaborado pela autora com base nos cálculos realizados no programa da CETESB.

APÊNDICE B

Tabela 10 – Estimativa da potência elétrica e energia elétrica no Aterro Sanitário de Palmas – TO

Ano	Potência Disponível (kW)	Potência (m³/h)	Potência Elétrica (kW)	Energia Elétrica (kWh/mês)
2021	1.752	200	490,56	323.769,60
2022	2.277	260	637,56	420.789,60
2023	2.777	317	777,56	513.189,60
2024	3.254	371	911,12	601.339,20
2025	3.710	424	1.038,80	685.608,00
2026	4.148	473	1.161,44	766.550,40
2027	4.568	521	1.279,04	844.166,40
2028	4.973	568	1.392,44	919.010,40
2029	5.364	612	1.501,92	991.267,20
2030	5.743	656	1.608,04	1.061.306,40
2031	6.112	698	1.711,36	1.129.497,60
2032	6.470	739	1.811,60	1.195.656,00
2033	6.820	779	1.909,60	1.260.336,00
2034	7.162	818	2.005,36	1.323.537,60
2035	7.498	856	2.099,44	1.385.630,40
2036	7.829	894	2.192,12	1.446.799,20
2037	8.155	931	2.283,40	1.507.044,00
2038	8.478	968	2.373,84	1.566.734,40
2039	8.797	1.004	2.463,16	1.625.685,60
2040	9.114	1.040	2.551,92	1.684.267,20
2041	8.413	960	2.355,64	1.554.722,40
2042	7.767	887	2.174,76	1.435.341,60
2043	7.169	818	2.007,32	1.324.831,20
2044	6.618	756	1.853,04	1.223.006,40

Ano	Potência Disponível (kW)	Potência (m³/h)	Potência Elétrica (kW)	Energia Elétrica (kWh/mês)
2045	6.109	697	1.710,52	1.128.943,20
2046	5.640	644	1.579,20	1.042.272,00
2047	5.206	594	1.457,68	962.068,80
2048	4.806	549	1.345,68	888.148,80
2049	4.436	506	1.242,08	819.772,80
2050	4.095	467	1.146,60	756.756,00
2051	3.780	432	1.058,40	698.544,00
2052	3.490	398	977,20	644.952,00
2053	3.221	368	901,88	595.240,80
2054	2.974	339	832,72	549.595,20
2055	2.745	313	768,60	507.276,00
2056	2.534	289	709,52	468.283,20
2057	2.339	267	654,92	432.247,20
2058	2.159	247	604,52	398.983,20
2059	1.993	228	558,04	368.306,40
2060	1840	210	515,2	340.032,00

Fonte: elaborado pela autora com base nos cálculos realizados no programa da CETESB e no LibreOffice Calc.

APÊNDICE C

Tabela 11 – Faturamento com a venda de energia elétrica

Ano	Energia Elétrica (kWh/mês)	Valor de Venda da Energia Elétrica (R\$/mês)	Valor de Venda da Energia Elétrica (R\$/ano)
2021	323769,6	R\$ 56.983,45	R\$ 683.801,40
2022	420789,6	R\$ 74.058,97	R\$ 888.707,64
2023	513189,6	R\$ 90.321,37	R\$ 1.083.856,44
2024	601339,2	R\$ 105.835,70	R\$ 1.270.028,39
2025	685608,0	R\$ 120.667,01	R\$ 1.448.004,10
2026	766550,4	R\$ 134.912,87	R\$ 1.618.954,44
2027	844166,4	R\$ 148.573,29	R\$ 1.782.879,44
2028	919010,4	R\$ 161.745,83	R\$ 1.940.949,96
2029	991267,2	R\$ 174.463,03	R\$ 2.093.556,33
2030	1061306,4	R\$ 186.789,93	R\$ 2.241.479,12
2031	1129497,6	R\$ 198.791,58	R\$ 2.385.498,93
2032	1195656,0	R\$ 210.435,46	R\$ 2.525.225,47
2033	1260336,0	R\$ 221.819,14	R\$ 2.661.829,63
2034	1323537,6	R\$ 232.942,62	R\$ 2.795.311,41
2035	1385630,4	R\$ 243.870,95	R\$ 2.926.451,40
2036	1446799,2	R\$ 254.636,66	R\$ 3.055.639,91
2037	1507044,0	R\$ 265.239,74	R\$ 3.182.876,93
2038	1566734,4	R\$ 275.745,25	R\$ 3.308.943,05
2039	1625685,6	R\$ 286.120,67	R\$ 3.433.447,99
2040	1684267,2	R\$ 296.431,03	R\$ 3.557.172,33
2041	1554722,4	R\$ 273.631,14	R\$ 3.283.573,71
2042	1435341,6	R\$ 252.620,12	R\$ 3.031.441,46
2043	1324831,2	R\$ 233.170,29	R\$ 2.798.043,49
2044	1223006,4	R\$ 215.249,13	R\$ 2.582.989,52
2045	1128943,2	R\$ 198.694,00	R\$ 2.384.328,04

Ano	Energia Elétrica (kWh/mês)	Valor de Venda da Energia Elétrica (R\$/mês)	Valor de Venda da Energia Elétrica (R\$/ano)
2046	1042272,0	R\$ 183.439,87	R\$ 2.201.278,46
2047	962068,8	R\$ 169.324,11	R\$ 2.031.889,31
2048	888148,8	R\$ 156.314,19	R\$ 1.875.770,27
2049	819772,8	R\$ 144.280,01	R\$ 1.731.360,15
2050	756756,0	R\$ 133.189,06	R\$ 1.598.268,67
2051	698544,0	R\$ 122.943,74	R\$ 1.475.324,93
2052	644952,0	R\$ 113.511,55	R\$ 1.362.138,62
2053	595240,8	R\$ 104.762,38	R\$ 1.257.148,57
2054	549595,2	R\$ 96.728,76	R\$ 1.160.745,06
2055	507276,0	R\$ 89.280,58	R\$ 1.071.366,91
2056	468283,2	R\$ 82.417,84	R\$ 989.014,12
2057	432247,2	R\$ 76.075,51	R\$ 912.906,09
2058	398983,2	R\$ 70.221,04	R\$ 842.652,52
2059	368306,4	R\$ 64.821,93	R\$ 777.863,12
2060	340032,0	R\$ 59.845,63	R\$ 718.147,58

Fonte: elaborado pela autora com base nos cálculos realizados no programa LibreOffice Calc.