



Universidade Federal da Paraíba

Centro de tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica

- Mestrado - Doutorado

**ANÁLISE TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DO
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DO
ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO
PESSOA**

por

Djayr Alves Bispo Junior

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de Mestre.*

João Pessoa – Paraíba

julho, 2022

DJAYR ALVES BISPO JUNIOR

**ANÁLISE TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DO
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DO
ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO
PESSOA**

Dissertação apresentada ao
curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Professor Raphael Abrahão, PhD.

Coorientadora: Professora Monica Carvalho, PhD.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

B622a Bispo Junior, Djayr Alves.

Análise termodinâmica e ambiental do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário metropolitano de João Pessoa / Djayr Alves Bispo Junior. - João Pessoa, 2022.

107 f. : il.

Orientação: Raphael Abrahão.

Coorientação: Monica Carvalho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Resíduos orgânicos. 2. Gás de aterro. 3. Pegada de carbono. 4. Ciclo Rankine. I. Abrahão, Raphael. II. Carvalho, Monica. III. Título.

UFPB/BC

CDU 628.4.042(043)

ANÁLISE TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA

por

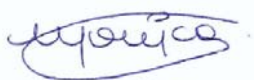
DJAYR ALVES BISPO JUNIOR

Dissertação aprovada em 19 de julho de 2022



Prof. Dr. Raphael Abrahão

Orientador - UFPB



Prof. Dra. Monica Carvalho

Coorientadora – UFPB



Prof. Dr. João Alves de Lima

Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. Ivan Felipe Silva dos Santos

Examinador Externo – UNIFEI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família inteira e a todos os meus amigos de vida.

Dedico também a toda humanidade. Espero que este estudo contribua para a ciência, e também para toda a comunidade acadêmica. Que os resultados aqui encontrados sirvam como referência e exemplo para toda rede de pesquisadores ao redor do mundo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS por todos os desafios que tive ao longo da minha vida. Sou muito grato por cada conquista, e por cada degrau que subi.

A toda a minha família, em especial ao meu pai Djair Alves Bispo, à minha mãe Maria de Fátima Ribeiro Bispo, e ao meu irmão Thyciano Ribeiro Bispo. Serei eternamente grato por todo investimento, suporte, paciência, incentivo, dedicação, confiança e amor ao longo de toda minha trajetória pessoal e profissional.

A todos os meus amigos de vida.

Ao meu orientador, Raphael Abrahão, e à minha coorientadora, Monica Carvalho. Por todos os ensinamentos, conselhos, ajudas, confiança, compreensão, cuidado, paciência, e sobretudo por “pegarem na minha mão” e mostrar como enfrentar e vencer “o caminho das pedras” para conquistar “um lugar ao sol”.

A todo o pessoal do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, pelo suporte e ajuda com as informações e a visita técnica realizada por mim.

Aos Professores da banca. A todos os Professores, colegas e funcionários do PPGEM e do PPGER da UFPB. E a todos os Professores do PPGEM da UFCG.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

“Em memória do meu amado pai: Djair Alves Bispo”.

ANÁLISE TERMODINÂMICA E AMBIENTAL DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA

RESUMO

A preocupação com a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um problema cada vez mais presente na sociedade moderna. Isto é consequência do rápido crescimento populacional, que faz com que a quantidade de RSU cresça com o passar dos anos. Existem alguns tratamentos que podem ser utilizados para os resíduos orgânicos, como uma solução energética e ambiental, a exemplo do biogás. Esta fonte renovável de energia pode ser tratada por meio da decomposição das partículas dos resíduos orgânicos, através da digestão anaeróbia em um processo bioquímico. Este procedimento acontece nos aterros sanitários. O presente trabalho foca na utilização do biogás proveniente do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, Paraíba. Foi realizada uma revisão sistemática sobre as várias formas de uso do biogás em escala global. A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada para quantificar impactos ambientais dos materiais e seus respectivos meios de transporte até a chegada na usina. Ainda foi feita uma análise termodinâmica para uma possível implementação de um ciclo Rankine à usina de biogás do aterro. Dados coletados em visitas técnicas, consultas de manuais dos fabricantes, e revisão da literatura científica foram utilizados para o dimensionamento do sistema proposto. Utilizou-se o software *Engineering Equation Solver* (EES) para os cálculos termodinâmicos. O trabalho mostra vasta possibilidade de utilização do biogás, por meio dos 17 artigos identificados na revisão sistemática, ressalta a importância da reciclagem, garantindo um benefício ambiental de cerca de 25% com relação às emissões de gases do efeito estufa, e conclui que o melhor ciclo para integração à usina de biogás do aterro estudado é o ciclo Rankine com reaquecimento, com melhor rendimento energético e maior produtividade de energia elétrica extraída do processo.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos, gás de aterro, Avaliação de Ciclo de Vida, pegada de carbono, ciclo Rankine.

THERMODYNAMIC AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF THE ENERGY USE OF BIOGAS IN THE METROPOLITAN SANITARY LANDFILL OF JOÃO PESSOA

ABSTRACT

The concern about the amount of Urban Solid Waste (MSW) is an increasingly present problem in modern society. This is a consequence of rapid population growth, which causes the amount of MSW to grow over the years. There are some examples of treatments that can be used for organics, such as an energy and environmental solution, biogas. This renewable source can be treated through the decomposition of organic particles, through biochemical digestion and biomass in a process. This procedure takes place in sanitary landfills. the present work focuses on the use of biogas from the Metropolitan Landfill of João Pessoa, Paraíba. A systematic review was carried out on the various ways of using biogas on a global scale. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was applied to quantify the environmental impacts of materials and their respective means of transport until arrival in the city. A thermodynamic analysis was also carried out for a possible implementation of a Rankine cycle to the landfill biogas plant. The dimension report on technical visits, consultation data from the authors' manuals, and scientific literature review were published in the proposed system. Software Engineering Equation Solver (EES) was used for thermodynamic calculations. The work shows a vast possibility of using biogas, through the 17 articles identified in the systematic review, highlights the importance of recycling, an environmental benefit of around 25% compared to greenhouse gases and concludes that the best cycle for integration into the studied landfill biogas plant is the Rankine cycle with reheating, with better energy efficiency and greater electrical energy productivity in the process.

Keywords: Organic waste, landfill gas, Life Cycle Assessment, carbon footprint, Rankine cycle.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVO	3
1.1.1.	Objetivo Geral	3
1.1.2.	Objetivos Específicos	3
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1.	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	4
2.1.2.	Resíduos Sólidos Urbanos em João Pessoa	7
2.1.3.	Processos de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos	10
2.2.	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	14
2.3.	BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA	15
2.4.	GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA	18
3.	ARTIGO: A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE MATÉRIA ORGÂNICA PARA FINS ENERGÉTICOS E MITIGAÇÕES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	22
3.1.	INTRODUÇÃO	22
3.2.	METODOLOGIA	25
3.2.1.	Tipo de Estudo	25
3.2.2.	Fontes de Informação	25
3.2.3.	Critérios de Inclusão	25
3.2.4.	Critérios de Exclusão	26
3.2.5.	Identificação dos Estudos	26
3.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26

3.4. CONCLUSÃO.....	37
4. ARTIGO: INVENTÁRIO E CONTABILIDADE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA A USINA DE BIOGÁS INSTALADA NO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA - PB	43
4.1. INTRODUÇÃO.....	44
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.4. CONCLUSÃO.....	52
5. ARTIGO: ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM CICLO RANKINE INTEGRADO À USINA DE BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA – PB	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	58
5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	59
5.2.1. Análises de Sensibilidade	63
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
5.4. CONCLUSÃO.....	72
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA DISSERTAÇÃO	78
APÊNDICE I.....	90
APÊNDICE II.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Geração total de RSU no Brasil	5
Figura 2.2. Geração per capita de RSU no Brasil.....	6
Figura 2.3. Imagem de satélite do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.....	9
Figura 2.4. Balança de pesagem do ASMJP.....	9
Figura 2.5. Possíveis formas de tratamento dos RSU e destinação final adequada	13
Figura 2.6. Fases da ACV.....	14
Figura 2.7. Célula em funcionamento no ASMJP	16
Figura 2.8. Estação de tratamento do chorume no ASMJP	16
Figura 2.9. Unidade de purificação do biogás do ASMJP.....	18
Figura 2.10. Vista aérea da usina de biogás no ASMJP	19
Figura 2.11. Componentes de um motor a combustão interna ciclo Otto	20
Figura 2.12. Funcionamento de um motor ciclo Otto.....	20
Figura 3.1. Diagrama do processo de revisão.....	27
Figura 3.2. Retorno para caso híbrido (Turbina Hitachi H-25), com e sem créditos de carbono e imposto sobre resíduos	30
Figura 3.3. Diagrama do processo de cogeração do aterro de Sevilha, Espanha	33
Figura 3.4. Fluxograma básico da planta proposta.....	36
Figura 4.1. <i>Layout</i> de um motor simplificado de usina de biogás com controle de combustão...	46
Figura 4.2. Detalhamento das emissões de gases de efeito estufa da usina de biogás ASMJP, considerando a reciclagem (materiais e transporte)	51
Figura 5.1. Ciclo Rankine integrado à usina de biogás do ASMJP.....	60
Figura 5.2. Ciclo Rankine com reaquecimento integrado à usina de biogás do ASMJP	64
Figura 5.3. Ciclo Rankine regenerativo integrado à usina de biogás do ASMJP.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Geração de RSU por estado da região Nordeste do Brasil nos anos de 2010 e 2019..	6
Tabela 2.2. Coleta de RSU e índice de cobertura de coleta por estado	7
Tabela 2.3. Geração total e estimada de RSU para João Pessoa	8
Tabela 4.1. Especificações técnicas do motor Jenbacher JMS 420 GS.....	47
Tabela 4.2. Inventário do Ciclo de Vida do Grupo Gerador	48
Tabela 4.3. Inventário do Ciclo de Vida do Módulo de Recuperação de Calor.....	49
Tabela 4.4. Inventário de Ciclo de Vida dos Controladores.....	49
Tabela 4.5. Emissões de gases do efeito estufa dos componentes do motor.....	50
Tabela 5.1. Balanço de energia de cada dispositivo do ciclo Rankine básico.....	62
Tabela 5.2. Dados dos gases de exaustão do motor.....	63
Tabela 5.3. Balanço de energia de cada dispositivo do ciclo Rankine com reaquecimento	65
Tabela 5.4. Balanço de energia de cada dispositivo do ciclo Rankine regenerativo.....	66
Tabela 5.5. Propriedades termodinâmicas para cada ponto do ciclo Rankine básico	67
Tabela 5.6. Resultados para os balanços de massa e energia dos equipamentos do ciclo Rankine básico.....	67
Tabela 5.7. Propriedades termodinâmicas para cada ponto do ciclo Rankine com reaquecimento.....	68
Tabela 5.8. Resultados para o balanço de energia dos equipamentos do ciclo Rankine com reaquecimento.....	68
Tabela 5.9. Propriedades termodinâmicas para cada ponto do ciclo Rankine regenerativo	69
Tabela 5.10. Resultados para o balanço de energia dos equipamentos do ciclo Rankine regenerativo	69
Tabela 5.11. Estimativa de produção de energia elétrica para cada ciclo estudado	70

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a mentalidade de eficiência e sustentabilidade tem tomado conta de diversos setores da sociedade, especialmente na área da termodinâmica e do aproveitamento energético. Dessa forma, o melhor rendimento possível de recursos energéticos (gás natural, biomassa, etc.) é tratado com extrema importância, buscando formas de promover o aumento da consciência ambiental na sociedade contemporânea. A quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem aumentado consideravelmente ao longo dos últimos anos, juntamente com as demandas globais de eletricidade (IEA, 2019). Isto é um retrato do aumento populacional, como também do estilo de vida da sociedade moderna. Os RSU podem ser tratados por diversas maneiras como: reciclagem, incineração, aterros sanitários, biodigestores (COSTI *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2010). Geralmente o tratamento pode ser por processos termoquímicos, tendo como exemplo a incineração (ZHOU *et al.*, 2014; DANG *et al.*, 2016), e por processos bioquímicos, a exemplo da digestão anaeróbia (DA) (LEITE *et al.*, 2014). O processo bioquímico resulta no biogás, caracterizado por ser um gás inflamável, que apresenta em sua composição diversos gases, como: 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). A composição desses gases varia de acordo com alguns fatores: umidade, temperatura, pH, composição dos resíduos e tamanho das partículas (RASI *et al.*, 2007; BHARATHIRAJA *et al.*, 2018). Geralmente a participação do metano, que é o gás de interesse quando o biogás é utilizado para fins energéticos, fica entre 50% e 60% da composição total do biogás (KONDUSAMY *et al.*, 2010). Como a grande quantidade de RSU gerados diariamente é preocupante, existe a necessidade da coleta, até a destinação final adequada, para o tratamento a ser realizado.

De acordo com WEILAND (2010), o biogás pode ser utilizado em diversas propostas como: caldeiras para aquecimento residencial, e evaporação de lixiviado. Também pode ser utilizado para geração de eletricidade por motores de combustão interna (MCI), microturbinas

a gás, microturbinas a vapor, ciclos combinados, sistemas híbridos que integram MCI com Ciclo Rankine Orgânico (CRO), sistemas híbridos MCI com células de combustível, combustível para veículos (CHACARTEGUI *et al.*, 2015). Outra forma de aproveitar o biogás para fins energéticos é através de propostas que abordam o ciclo Rankine (VÉLEZ *et al.*, 2012). Geralmente estes ciclos são compostos por: caldeira de recuperação, turbinas a vapor, condensador, bomba, e fluido de trabalho (COLLINGS *et al.*, 2016). O biogás se assemelha ao gás natural quando comparado o poder calorífico dos dois, possibilitando sua substituição em diversas aplicações. A principal vantagem do biogás em relação ao gás natural é ser renovável, e sua produção depender de compostos orgânicos, a exemplo da biomassa (SALOMON, 2007).

Este trabalho foca na utilização do biogás resultante de aterros sanitários. O aterro estudado com maior destaque é o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), responsável pela destinação final dos RSU gerados na capital paraibana. No ASMJP existe uma parceria com a empresa italiana *Asja*, onde todo o biogás gerado é utilizado como fonte energética.

Entre o conjunto de métodos aplicados no trabalho, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem a capacidade de quantificar os possíveis impactos ambientais, referenciando diferentes processos, produtos ou serviços de um determinado sistema. A quantificação pode ser caracterizada pela pegada de carbono, sendo um exemplo específico da ACV quantos às emissões de gases do efeito estufa na atmosfera (GEE) (NBR 14040 e NBR 14044, 2014). Dessa forma, existe a possibilidade de adotar medidas governamentais e administrativas quanto ao controle dos GEE. Desse modo, surgem maneiras de mitigar prejuízos ambientais ao longo do tempo.

A presente dissertação de mestrado está organizada em forma de artigos científicos em conformidade com as normas elaboradas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM-UFPB), como também pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Por conseguinte, além da introdução, estão apresentados os objetivos, a fundamentação teórica sobre o tema, e todos os artigos em processo de publicação ou já publicados. Os artigos são independentes entre si. Porém, abordam o tema geral da dissertação, e por isso estão correlacionados.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo Geral

Verificar o potencial de aproveitamento energético do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos, por meio de análise termodinâmica e ambiental em uma usina localizada dentro do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão sistemática sobre as diversas formas de utilização do biogás proveniente de matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos, em escala global;
- Fazer um inventário para contabilizar as emissões de gases do efeito estufa para a usina de biogás instalada no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, Paraíba;
- Analisar a possibilidade de implementação de um ciclo Rankine à usina de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Segundo a norma brasileira NBR 10004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação (ABNT, 2004), os resíduos sólidos são aqueles que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São classificados como Resíduos Classe I (Perigosos), Resíduos Classe II A (Não perigosos e não-inertes) e Resíduos Classe II B (Não perigosos e inertes). De acordo com a lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010), que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, os mesmos são definidos como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Através dessa definição é possível identificar a grande presença dos resíduos sólidos na sociedade, e o quão importante é o estudo para melhorar a coleta, o tratamento e a disposição final. A PNRS define exigências para todo o país, como a implantação de sistemas de coleta seletiva, visando a recuperação e reciclagem de materiais, e define que “a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos deverá ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação desta Lei”, prazo que se encerrou em agosto de 2014 (BRASIL, 2010). A PNRS proíbe a disposição em lixões a céu aberto, e destaca a redução, reutilização,

reciclagem, tratamento e eliminação adequada dos RSU, a fim de evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública (ALFAIA *et al.*, 2017).

Por ano são produzidos cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo (ONU, 2018). Para acomodar os 7,6 bilhões de habitantes no planeta Terra, suprir o uso de recursos e absorver o lixo gerado, seria necessário 70% de outro planeta Terra (ONU, 2018). Seguindo a tendência mundial, a expectativa é que a quantidade de RSU aumente ainda mais nos próximos anos.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), no Brasil, entre 2010 e 2019, a geração de RSU teve um aumento aproximadamente de 67 milhões de toneladas para 79 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2020). Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 379 kg/ano, como apresentado na Figura 2.1 e 2.2.

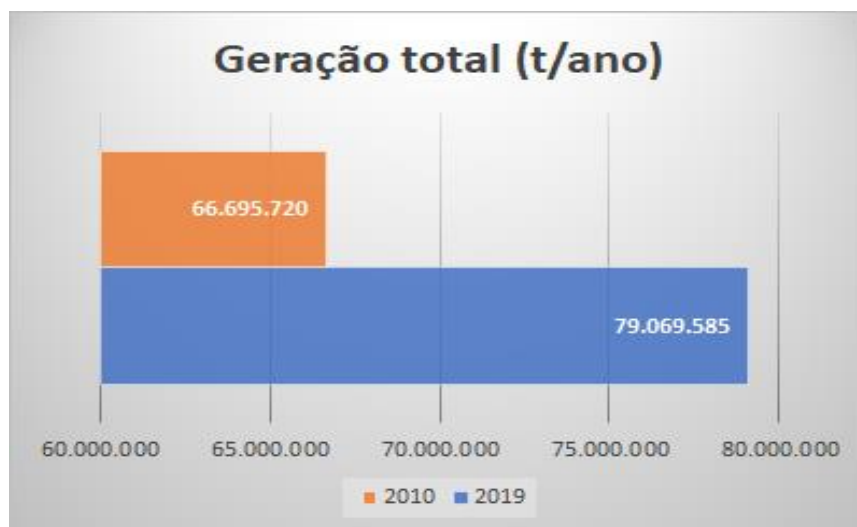


Figura 2.1. Geração total de RSU no Brasil.
Fonte: Abrelpe (2020).

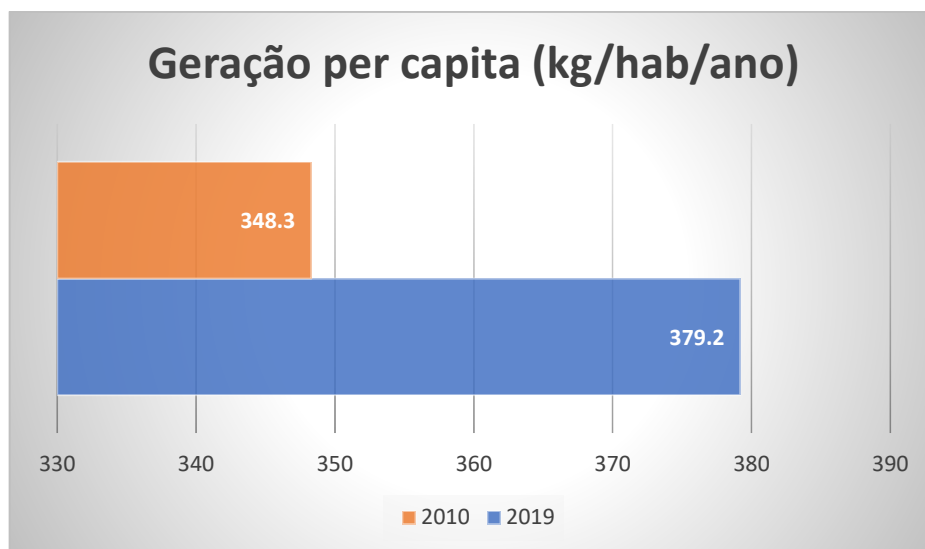


Figura 2.2. Geração per capita de RSU no Brasil.
Fonte: Abrelpe (2020).

Com relação a região Nordeste do Brasil, é possível observar a geração de RSU por estado através da Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Geração de RSU por estado da região Nordeste do Brasil nos anos de 2010 e 2019.

Região	Estado	Geração total 2010 (t/ano)	Geração total 2019 (t/ano)	Porcentagem de aumento de 2010 para 2019 (%)
Nordeste	Alagoas	884.760	1.092.810	19,03%
	Bahia	4.893.555	5.071.310	3,50%
	Ceará	3.243.025	3.534.660	8,25%
	Maranhão	1.939.245	2.514.120	22,86%
	Paraíba	1.115.440	1.282.245	13,01%
	Pernambuco	2.811.230	3.285.730	14,44%
	Piauí	1.072.735	1.141.355	6,01%
	Rio Grande do Norte	844.245	1.115.075	24,28%
	Sergipe	593.490	663.570	10,56%
Total		17.397.725	19.700.875	11,69%

Fonte: Adaptado de Abrelpe (2020).

Outro dado extremamente importante é com relação ao índice de cobertura de coleta destes resíduos na região Nordeste do Brasil. Pode-se observar estes índices através da Tabela 2.2. Detalhe que na maioria dos estados o índice de cobertura de coleta entre 2010 e 2019

melhorou, com destaque para a Paraíba, que passou de 80,8% para 86,7%, e para Sergipe (que apresentou a maior porcentagem dentre todos), passando de 85,7% para 91,4%.

Tabela 2.2. Coleta de RSU e índice de cobertura de coleta por estado.

Região	Estado	Coleta total 2010 (t/ano)	Índice de cobertura de coleta em 2010 (t/ano)	Coleta total em 2019 (t/ano)	Índice de cobertura de coleta em 2019 (t/ano)
Nordeste	Alagoas	667.950	75,5%	915.785	83,8%
	Bahia	3.700.370	75,6%	4.266.120	84,1%
	Ceará	2.476.890	76,4%	2.830.210	80,1%
	Maranhão	1.296.115	66,8%	1.605.270	63,9%
	Paraíba	900.820	80,8%	1.111.425	86,7%
	Pernambuco	900.820	79,7%	2.856.855	86,9%
	Piauí	606.630	56,5%	789.495	69,2%
	Rio Grande do Norte	715.400	84,7%	992.070	89,0%
	Sergipe	508.445	85,7%	606.265	91,4%

Fonte: Abrelpe (2020).

Políticas públicas de conscientização são importantes para melhorar o gerenciamento dos RSU, desde o descarte adequado por parte da população, a coleta realizada pela prefeitura, até a gestão final de tratamento. DEUS *et al.* (2015) destacam que as transformações políticas são essenciais, pois, a gestão dos RSU exige planejamento, manutenção, recurso e operação. Ou seja, é necessário investir no crescimento científico, teórico e prático na gestão dos resíduos sólidos, para que se criem estratégias participativas, contextualizadas e adaptadas ao cenário mundial.

2.1.2. Resíduos Sólidos Urbanos em João Pessoa

Na cidade de João Pessoa, existe uma autarquia especializada por todos os serviços de limpeza urbana. A Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana (EMLUR) possui exclusividade para exercer tal função. Segundo o Regulamento de Limpeza Urbana da Cidade

de João Pessoa/PB (Lei nº 6.811/1991), a EMLUR tem patrimônio e receitas próprias, autonomia financeira, administrativa e técnica. Além disso, a EMLUR tem competência para planejar, desenvolver, regulamentar, fiscalizar, executar, manter e operar os serviços integrantes ou relacionados com sua atividade fim, como também promover a educação para a limpeza urbana.

De acordo com o Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana (ISLU), João Pessoa é caracterizada como a capital do Nordeste e a terceira do Brasil que mais recicla seus resíduos sólidos. João Pessoa apresenta 5,93% de reciclagem do total de resíduos sólidos produzidos, enquanto a média nacional é de 3,70% (ISLU, 2018). Segundo um estudo realizado pelo governo do estado da Paraíba, através do Plano Estadual de Resíduos Sólidos, no ano de 2009, foi estimada a geração de RSU na cidade de João Pessoa até o ano de 2030. Houve um aumento significativo na quantidade da população urbana, e na geração de resíduos, respectivamente, como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Geração total e estimada de RSU para João Pessoa.

Município	População Urbana 2010 (hab.)	Geração para 2010 (t/ano)	Projeção População Urbana 2030 (hab.)	Projeção Geração Para 2030 (t/ano)
João Pessoa	723.515	832.042	1.079.731	1.241.691

Fonte: Adaptado de “Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado da Paraíba (2009)”

Atualmente a EMLUR é responsável pela coleta diária de resíduos em João Pessoa. A destinação final desses resíduos é o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), que também atende mais municípios (Cabedelo, Conde, Santa Rita, Bayeux, Pedras de Fogo, Mamanguape, Marcação, Caaporã e Baía da Traição) que fazem parte do consórcio intermunicipal (EMLUR, 2021). De acordo com informações coletadas por NASCIMENTO *et al.* (2018) e SILVA *et al.* (2020), o ASMJP teve suas atividades iniciadas em 2003, foi projetado com 24 células (cada uma com volume final de 450.000 m³), com vida útil de aproximadamente 25 anos. O aterro fica localizado a aproximadamente 19 km do centro comercial da cidade de João Pessoa (Figura 2.3).



Figura 2.3. Imagem de satélite do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa/PB.
Fonte: Google Earth (2021).

O ASMJP recebe em média 2.400 toneladas/dia de RSU (EMLUR, 2021). Todo o resíduo orgânico coletado passa pela balança de pesagem, mostrada na Figura 2.4.



Figura 2.4. Balança de pesagem do ASMJP.
Fonte: Autoria própria (2021).

A Secretaria de Planejamento (SEPLAN) e a EMLUR estão acompanhando a elaboração de estudos geotécnicos para orientar projetos para expandir a durabilidade do ASMJP. O aterro já possui 10 células com limite máximo de disposição final de RSU, o que

traz preocupações quanto aos acúmulos futuros dos resíduos orgânicos, tendo em vista que o aterro possui vida útil estimada até 2028.

2.1.3. Processos de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos

Segundo MARCHEZETTI *et al.* (2011), os RSU podem ser tratados por meio de técnicas como: gaseificação, pirólise, incineração, plasma, compostagem, reciclagem e digestão anaeróbia.

A coleta seletiva foi definida pela Lei Federal nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, como a coleta de resíduos sólidos previamente separados de acordo com a sua constituição e composição. Para RIBEIRO e BENSEN (2006), a separação dos materiais recicláveis cumpre um papel estratégico na gestão integrada de resíduos sólidos sob vários aspectos: estimula o hábito da separação do lixo na fonte geradora para o seu aproveitamento, promove a educação ambiental voltada para a redução do consumo e do desperdício e melhora a qualidade da matéria orgânica para diversos fins, a exemplo da compostagem.

A compostagem consiste em um processo biológico de reaproveitamento que transforma resíduos orgânicos urbanos, agroindustriais e agropecuários em um novo produto, como fertilizantes. Dessa maneira, podem ser utilizados na agricultura. A transformação é realizada pela atividade de microrganismos aeróbios presentes nos próprios rejeitos, capazes de degradar e estabilizar a carga orgânica de diversos materiais. O processo é realizado sob um rigoroso controle em todas as etapas, que são monitoradas com frequência, de forma a aperfeiçoar resultados e evitar fatores negativos, como maus odores e presença de vetores (DE BERTOLDI; VALLINI; PERA, 1983). Segundo GOMES *et al.* (2015), a compostagem é uma alternativa para o tratamento dos resíduos orgânicos e, por meio dela, consequentemente, ocorre a minimização da parcela a ser encaminhada ao aterro sanitário, o que também colabora para a redução da concentração da carga orgânica no lixiviado gerado e a redução da emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. A compostagem é considerada alternativa sustentável, simples, eficaz e que atende a legislação ambiental em vigor – a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que regulamenta o tema no País (BRASIL, 2010),

A incineração é um processo termoquímico baseado na combustão dos compostos orgânicos dos RSU. Geralmente a queima ocorre em usinas, convertendo o material residual em calor, gás de combustão e cinzas. O calor e o gás de combustão podem ser usados para

fins energéticos, e as cinzas para fins de construção civil. O benefício da incineração é que reduz a massa sólida dos compostos orgânicos em 80-85%, e o volume em cerca de 95% (SABBAS *et al.*, 2003; NIDONI, 2017).

A pirólise é caracterizada por ser uma reação química de decomposição, na qual o calor do fogo decompõe a substância ou material, desprovido de oxigênio ou em pequena quantidade. O lixo urbano tratado por pirólise resulta em subprodutos, como o alcatrão, o óleo e o sulfato de amônia (que também podem ser usados como matérias-primas e fontes de energia) (MORAES *et al.*, 2015).

Os aterros sanitários são tratamentos bioquímicos de RSU, que precisam estruturalmente de um sistema de impermeabilização, oferta diária de resíduos, monitoramento de águas subterrâneas, sistema de drenagem de gases, monitoramento topográfico e hidro geológico (ABNT, 1983). Os aterros sanitários são de extrema importância para obtenção e tratamento do biogás e do chorume, como também processos operacionais que conseguem reduzir as consequências ambientais (LUCAS *et al.*, 2010). Os elementos que constituem o projeto de um aterro sanitário de forma resumida são: sistemas de drenagem das águas superficiais; sistema de impermeabilização de fundo e das laterais; sistema de drenagem de lixiviado; sistema de tratamento de lixiviado; sistema de drenagem dos gases; e cobertura intermediária final (MONTAÑO, 2012). Os aterros sanitários são grandes produtores de biogás, gerando diversos gases, como: 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). A disponibilidade desses gases varia de acordo com o tempo de vida do aterro. É preciso cuidado, pois os gases, além de energéticos, também possuem alto potencial de aquecimento global, principalmente o gás metano (PIÑAS *et al.*, 2016). Dessa forma, o biogás precisa ser tratado e utilizado da maneira correta.

Sobre os processos bioquímicos para o tratamento de RSU, a digestão anaeróbia (DA) é caracterizada como um conjunto de processos em que os microrganismos degradam a matéria orgânica biodegradável na ausência do O_2 . A DA pode ocorrer por meio de reatores, podendo ser uma maneira viável de substituição dos aterros. A DA em reatores por meio da codigestão intensifica a produção de biogás. Analisando o ciclo de vida, a codigestão anaeróbia possui o melhor aproveitamento de energia renovável em comparação a DA convencional (GUERI *et al.*, 2017). Segundo SAKAR *et al.* 2009, a DA em reatores apresenta inúmeras vantagens em relação aos aterros sanitários, como: baixo grau de poluição, potencialização elevada para a conversão de matéria orgânica, redução de odores e contribui

para a diminuição desses resíduos (biodegradáveis) em aterros sanitários. Dessa forma, a DA por meio de reatores apresenta uma excelente opção para diversificar a produção do biogás.

De forma resumida, o biogás resultante dos RSU possui diversas rotas. Desde a obtenção até a destinação final adequada. A Figura 2.5 representa algumas dessas rotas do biogás resultante dos RSU.

- Rota 1: chegada do RSU ao aterro até a queima do biogás no *flare* (nome do queimador);
- Rota 2: chegada do RSU ao aterro até a geração de energia elétrica pelo biogás do aterro;
- Rota 3: chegada do RSU ao aterro até a geração de energia elétrica pelo biogás gerado por meio de tratamento mecânico biológico;
- Rota 4: chegada do RSU ao aterro até a geração de energia elétrica mediante incineração;
- Rota 5: chegada do RSU ao aterro até a geração de energia elétrica por intermédio de tratamento mecânico biológico e incineração.

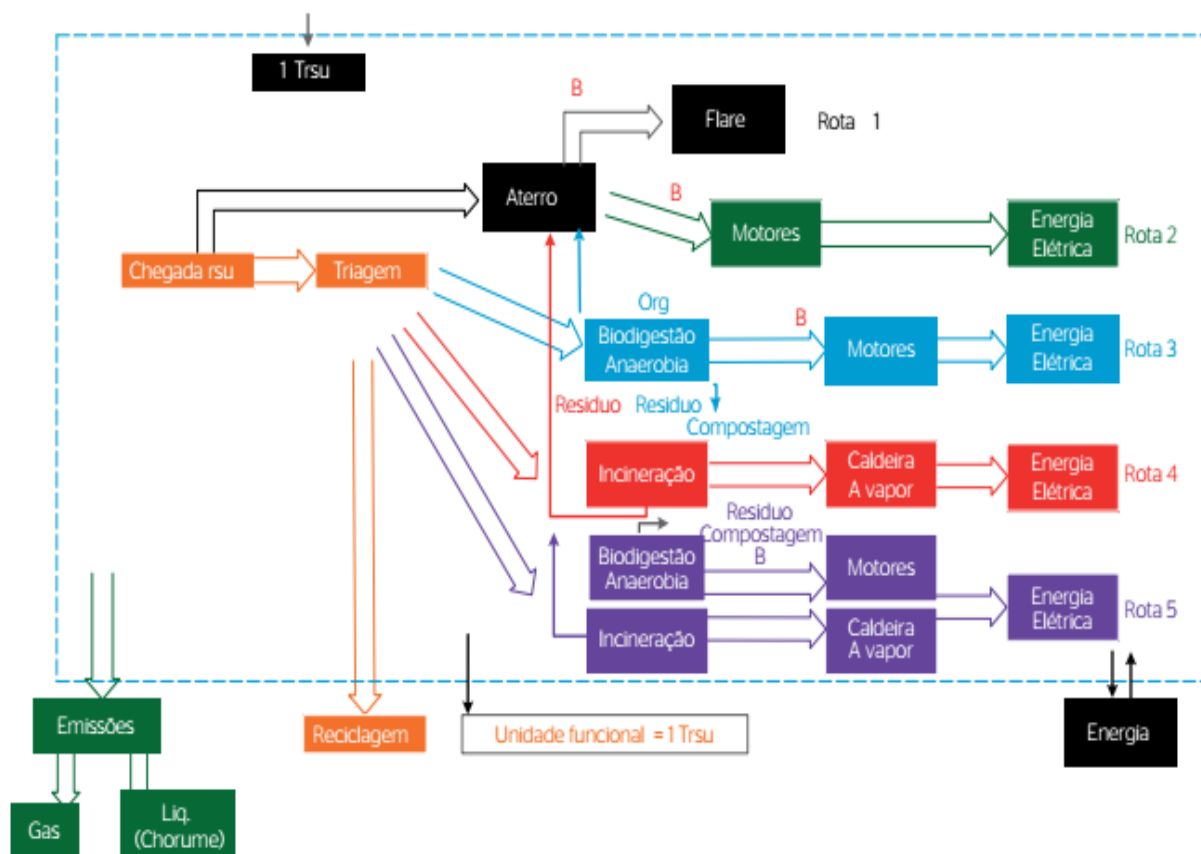


Figura 2.5. Possíveis formas de tratamento dos RSU e destinação final adequada.
Fonte: Soares *et al.* (2017).

De acordo com um levantamento realizado pelo CEMPRE (2013), 80,3% dos resíduos sólidos no Brasil são recolhidos por caminhões e levados para lixões, aterros ou reciclagem, 9,6% são queimados na propriedade, 7,2% são dispostos em caçamba, 2% são jogados em terrenos baldios ou logradouros, 0,6% são enterrados na própria propriedade, 0,2% sofrem outro tipo de destinação e 0,1% são jogados em rios, lagos ou mar. Dessa forma, a maior quantidade de biogás produzido em território brasileiro advém de aterros sanitários.

A exploração do biogás traz inúmeros benefícios que vão desde maximizar o aproveitamento e a recuperação dos materiais descartados até a erradicação das práticas de destinação impróprias, com impactos negativos à saúde de milhões de brasileiros. Segundo BLEY JR. (2015) a energia proveniente do biogás é uma alternativa viável e de ampla disponibilidade e necessita de maior exploração no Brasil, o que permitiria um acréscimo no fornecimento de energia elétrica, contribuindo para as garantias de equilíbrio da matriz energética nacional. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por meio da Resolução Normativa 8 de 2015, classifica o biogás como gás bruto proveniente da decomposição biológica oriunda de produtos ou resíduos orgânicos. Essa normativa

também estabelece que o biometano, que é originário do biogás como um biocombustível gasoso formado essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás, pode ser destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais (ANP, 2015).

2.2. AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

De acordo com WILLERS *et al.* (2013), a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é definida como um método avaliativo de impacto ambiental de bens, serviços e/ou produtos. A ACV é uma avaliação sistemática que quantifica os fluxos de energia e de materiais, permitindo alcançar oportunidades de melhoria no desempenho do sistema.

Segundo a ABNT NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014), a ACV estuda os aspectos ambientais e potenciais ao longo da vida de um produto ou sistema produtivo, desde a aquisição da matéria prima, produção, utilização, até o descarte final (ou reciclagem). Antes de chegar nessa definição, a ACV foi sendo aprimorada por princípios e requisitos gerais. A partir da primeira norma ISO 14040, foram publicadas posteriormente mais três normas (ISO 14041, 14042 e 14043) e mais dois relatórios técnicos (SOUZA, 2008). Esses documentos passaram por uma revisão geral em 2006, reformulando e resultando em apenas duas normas (ISO 14040, 2006, ISO 14044, 2006). Finalmente, em 2014 houve uma nova versão (a atual), refletindo nas NBR 14040 (ABNT, 2014) e NBR 14044 (ABNT, 2014).

A ACV, segundo a ISO, é estruturalmente dividida em 4 fases.

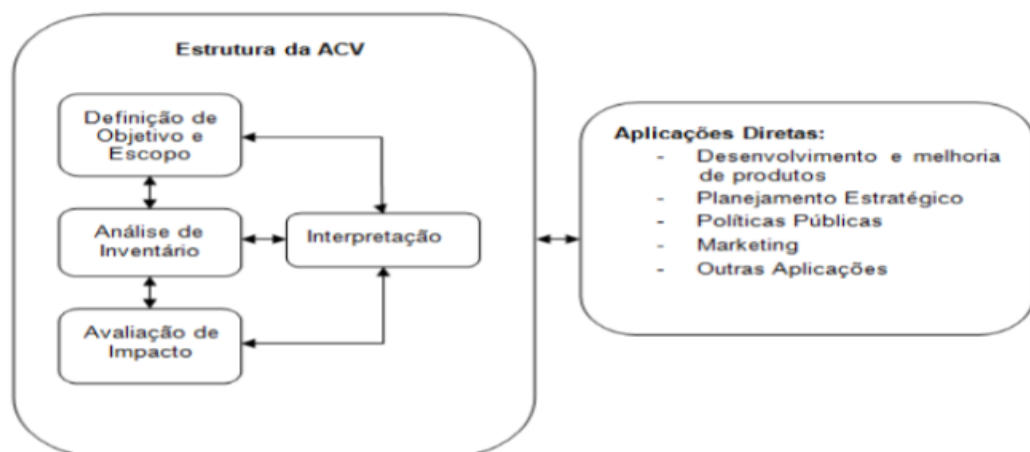


Figura 2.6. Fases da ACV.

Fonte: ABNT (2014).

A definição de objetivo e escopo deve ser estruturada para o grau de detalhamento, profundidade e extensão para atender objetivos pré-estabelecidos. A análise de inventário

expõe e quantifica as principais entradas e saídas de cada processo, por qualquer insumo ou energia, na construção de um produto ou atividade. A etapa de avaliação de impacto é o esqueleto do perfil da análise do ciclo de vida, informando assim às questões ambientais relativas associadas à entrada e saída do produto ou serviço. A etapa final é a interpretação do resultado de todo processo de estudo, possibilitando chegar à conclusão e recomendações finais do trabalho (ABNT, 2014; SOUSA, 2008).

A ACV possui diversos métodos para obtenção de indicadores de impactos ambientais, de acordo com ILCD Handbook (EC-JRC, 2010), um documento baseado nas normas internacionais da ISO. O mesmo apresenta uma análise geral dos seguintes métodos da avaliação de impactos do ciclo de vida: CML 2002, Eco-Indicador 99, EDIP 1997, EDIP 2003, EPS 2000, Impacto 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Ecological Scarcity Method, TRACI, MEEup e USEtox. Cada método possui suas abordagens características, com o objetivo de gerar indicadores de impactos ambientais. Segundo GOEDKOOOP (2009), a ACV possui abordagens *midpoint* e *endpoint*.

A categoria *midpoint* representa indicadores de impacto em potencial, como por exemplo: mudança climática, uso da água e da terra, acidificação, eutrofização e efeitos tóxicos. Já a categoria *endpoint* é caracterizada pela gravidade ou as consequências de impacto de modo quantificado, exemplo: saúde humana, esgotamento de recursos e qualidade do ecossistema (JOLLIET *et al.*, 2003).

2.3. BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA

No ASMJP, o biogás é capturado, tratado e utilizado por meio de uma parceria entre a prefeitura de João Pessoa e a empresa italiana *Asja*. Como já mencionado no tópico 2.1 desta dissertação, o aterro possui 24 células (cada uma com volume final de 450.000 m³). Algumas células já encerraram suas atividades, mas outras continuam em funcionamento (Figura 2.7).



Figura 2.7. Célula em funcionamento no ASMJP.
Fonte: Autoria própria (2021).

No processo de tratamento da matéria orgânica dos RSU, a decomposição acontece por digestão anaeróbia. Certa quantidade do material decomposto transforma-se em chorume (um líquido de aspecto escuro e cheiro forte, com grande concentração de substâncias tóxicas e metais pesados). O chorume, também conhecido como lixiviado, pode provocar a contaminação do solo, do lençol freático e de corpos d'água (OLIVEIRA *et al.*, 2004). O ASMJP possui uma estação de tratamento para o chorume produzido, como apontado através das setas vermelhas mostradas na Figura 2.8.



Figura 2.8. Estação de tratamento do chorume no ASMJP.
Fonte: Google Earth (2021) (adaptado).

O biogás tratado em aterro sanitário passa pelo processo anaeróbio de decomposição. A degradação da matéria orgânica é lenta, garantindo produção de biogás por até 30 anos. O processo é caracterizado por quatro etapas, de acordo com VAN ELK (2007) e COSTA *et al.* (2019), são elas: I) Fase Acidogênica, que é caracterizada por ser a fase inicial, produzida por enzimas celulares que decompõem a matéria orgânica, formando compostos mais simples, como ácidos solúveis (ácidos graxos, aminoácidos e açúcares). Os subprodutos formados são principalmente água, hidrogênio e dióxido de carbono; II) Fase Metanogênica Instável, que é a segunda fase do processo anaeróbio, que ocorre na presença de microorganismos normalmente presentes no solo. As bactérias são a *Methanobacterium brvanti* e a *Methanosarcina barkeri*, que transformam os ácidos orgânicos e o dióxido de carbono em metano; III) Fase Metanogênica Estável, que é a fase mais longa, estendendo-se por décadas. A composição básica é de cerca de 60% de metano (CH_4), 40% de dióxido de carbono (CO_2) e pequenas frações variáveis de outros gases, só sofrendo grandes variações em caso de perturbações do equilíbrio de fatores como umidade e cobertura da massa de resíduos; IV) Fase final, que ocorre após várias décadas, quando a porcentagem de metano na composição do biogás tenha chegado a um índice desprezível, praticamente esgotando-se o material degradável nas condições do aterro.

Existem fatores que afetam a composição química do biogás resultante dos aterros sanitários. Os mais relevantes são: umidade, temperatura, pH, composição dos resíduos, tamanho das partículas, forma de construção e operação do aterro (TARAZONA, 2010). Antes de ser utilizado para fins energéticos, o biogás passa por um processo de purificação. Segundo informações obtidas pela visita técnica realizada na empresa *Asja* (responsável pelo uso do biogás), existe uma unidade responsável para realizar o controle adequado de temperatura e de pH do biogás, podendo ser observada na Figura 2.9.



Figura 2.9. Unidade de purificação do biogás do ASMJP.
Fonte: Autoria própria (2021).

A empresa *Asja* é responsável por controlar os parâmetros que influenciam na qualidade do biogás que advém das células do aterro. A faixa ótima de temperatura para a geração de metano é de 30°C a 40°C. O pH ótimo para o desenvolvimento dessas bactérias está na faixa de aproximadamente 6,5 e 7,5 (CHRISTENSEN *et al.*, 2020). Além da preocupação quanto a quantidade de metano, existe também o controle para garantir benefícios ambientais (como já explicado anteriormente).

2.4. GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA

Após todo o processo de obtenção e tratamento do biogás, o gás metano pode ser utilizado para fins energéticos. Projetos que abordam este tema começaram a surgir por volta de 1970. Dessa forma, por meio de estudos científicos, os projetos foram sendo cada vez mais aprimorados. Fatores como eficiência, confiabilidade e mitigações ambientais foram alcançados. O uso do biogás a partir de motores a combustão interna ganhou notoriedade nos anos de 1990 (USEPA, 2016). Entre a década de 1990 e os anos 2000, o biogás tornou-se pauta como alternativa para redução das emissões de GEE por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e os Créditos de Carbono (CIBIOGÁS, 2020). Dessa forma, o biogás vem sendo cada vez mais utilizado com o passar dos anos, como combustível energético, podendo ser aproveitado em turbinas, microturbinas, motores a combustão interna, dentre outras maneiras (CHACARTEGUI *et al.*, 2015).

Segundo a prefeitura municipal de João Pessoa, foram realizados diversos estudos em parceria com a empresa *Asja* sobre o projeto de instalação de motores a combustão interna. A usina foi implantada para realizar a última etapa do processo de tratamento/utilização do biogás, ocorrendo a queima por combustão, resultando em energia elétrica e térmica (gases de exaustão). A vista aérea da usina pode ser observada na Figura 2.10.



Figura 2.10. Vista aérea da usina de biogás no ASMJP.

Fonte: Google Earth, 2021 (adaptado).

Os motores funcionam através do ciclo Otto, um ciclo termodinâmico idealizado que descreve o funcionamento de um típico motor de pistão de ignição com faísca. De acordo com PETRESCU *et al.* (2018), este ciclo é uma descrição do que acontece com uma massa de gás submetida a trocas de calor e variações de pressão, temperatura e volume. A massa de gás sujeita a essas mudanças é chamada de sistema, logo o sistema, neste caso, é definido como o fluido (gás) dentro do cilindro (WU, 2004). Os motores do ciclo Otto geralmente possuem os componentes identificados na Figura 2.11. As fases de motores do ciclo Otto são divididas em quatro tempos:

- 1º tempo: O cilindro de admissão recebe o combustível, e após estar cheio, a válvula de admissão que estava aberta durante este tempo, fecha-se;
- 2º tempo: Então a mistura de ar e combustível sofre a compressão.

- 3º tempo: A seguir uma centelha elétrica na vela de ignição deflagra a explosão e, conseqüentemente, a expansão da mistura gasosa.
- 4º tempo: Finalmente a válvula de escape abre-se, ocorrendo simultaneamente a descarga da mistura gasosa para a atmosfera e a exaustão do restante dos gases queimados.

Pode-se observar os componentes gerais de um motor ciclo Otto na Figura 2.11. Na Figura 2.12 estão ilustradas as fases de um motor a combustão interna por centelha.

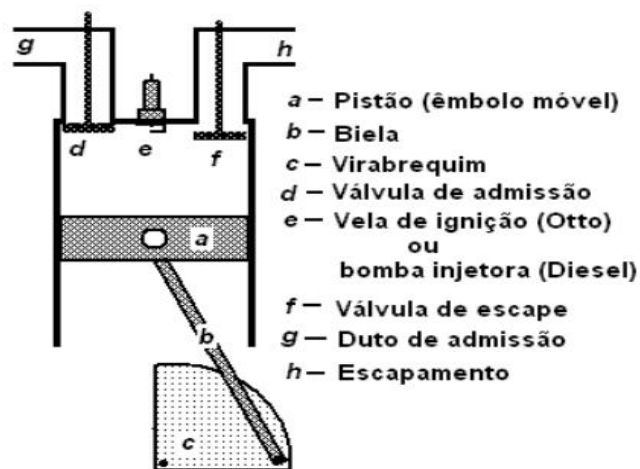


Figura 2.11. Componentes de um motor a combustão interna ciclo Otto.
Fonte: Silveira (2009).

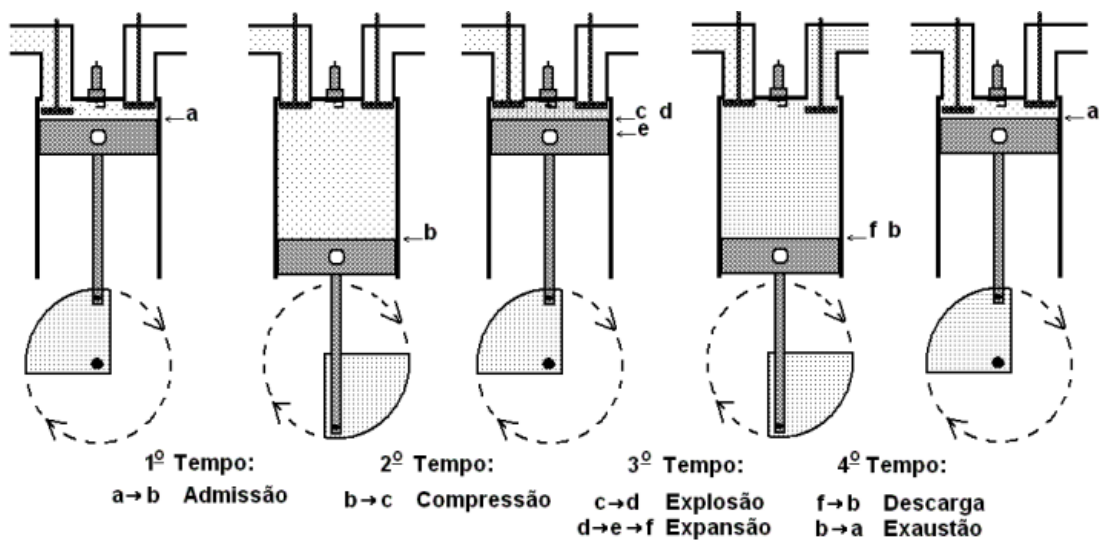


Figura 2.12. Fases e funcionamento de um motor ciclo Otto.
Fonte: Silveira (2009).

O gerador que está acoplado ao motor converte a energia mecânica em energia elétrica. Este processo ocorre pelos geradores que possuem ímãs com bobinas de fios de cobre, carregados por um forte campo magnético, através da agitação dos elétrons resultantes da movimentação dos pistões no ciclo Otto (COVIC e BOYS, 2013). Os motores do ciclo Otto geralmente possuem maior simplicidade mecânica, fácil manutenção, arranque rápido e são caracterizados por ignição por centelha.

CAPÍTULO III

3. ARTIGO: A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE MATÉRIA ORGÂNICA PARA FINS ENERGÉTICOS E MITIGAÇÕES AMBIENTAIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO

A quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem aumentado consideravelmente ao longo dos anos, isto é consequência direta de vários fatores, incluindo o crescimento populacional e intensificação do consumo. A preocupação com o meio ambiente tem ganhado destaque na sociedade, pois a mentalidade de sustentabilidade tem desencadeado uma série de possibilidades para avanços científicos e tecnológicos no sentido da preservação ambiental. O objetivo deste trabalho foi mostrar como o biogás proveniente da matéria orgânica dos RSU pode oferecer uma solução energética, por meio de sistemas termodinâmicos, além do tratamento adequado para garantir mitigações ambientais. Dessa forma, foi realizada uma revisão sistemática sobre as diversas formas de utilização do biogás para fins energéticos, priorizando os estudos com boa eficiência. Dos 157 artigos inicialmente identificados na estratégia de busca, somente 17 participaram da revisão final, após aplicação dos critérios de exclusão e inclusão. As alternativas para a utilização do biogás são vastas, possibilitando que o problema de acúmulo dos Resíduos Sólidos Urbanos apresente uma solução para a diversificação da matriz energética global, além das mitigações ambientais alcançadas nos estudos identificados.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, lixo, gás de aterro, aterro, energia.

3.1. INTRODUÇÃO

A quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) tem aumentado consideravelmente ao longo dos últimos anos, juntamente com as demandas globais de eletricidade (IEA, 2018).

Isto é consequência direta do aumento populacional, como também do modo de vida da sociedade moderna. Dessa maneira, surge a necessidade de encontrar alternativas para diversificar a matriz energética, como também mitigar os impactos ambientais do planeta. Para isto, pode-se usar o biogás proveniente de RSU para fins energéticos, por meio de sistemas termodinâmicos com várias possibilidades de implementação.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), no Brasil, de 2010 a 2019, a geração de RSU passou de 67 milhões para 79 milhões de toneladas produzidas por ano. Na mesma década, a quantidade de RSU coletados passou de cerca de 59 milhões para 72,7 milhões de toneladas, e a cobertura de coleta passou de 88% para 92%. Na Itália, a produção de RSU no ano de 2016 foi de 30,1 milhões de toneladas, com aumento de 2% em relação a 2015 (NOVELLI *et al.*, 2019). Em 2008, a Índia já produzia cerca de 90 milhões de toneladas de RSU anualmente (TALYAN *et al.*, 2008). De acordo com XIAOLI *et al.* (2016), os EUA recebem cerca de 250 milhões de toneladas de RSU anualmente, e a China produziu cerca de 105 milhões de toneladas de RSU em 2013. Por ano, são produzidos cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos no mundo (ONU, 2018). Para acomodar os 7,6 bilhões de habitantes no planeta terra, suprir o uso de recursos e absorver o lixo gerado, seria necessário 70% de outro planeta terra (ONU, 2018). Seguindo a tendência mundial, a expectativa é que a quantidade de RSU no mundo todo aumente ainda mais.

De acordo com MOURAD *et al.* (2002), os RSU podem ser tratados de diversas formas, como: reciclagem, tratamento biológico, incineração e aterro. A parte mais adequada da porcentagem gravimétrica dos RSU para fins energéticos são os compostos orgânicos. Geralmente o tratamento pode ser por processos termoquímicos, tendo como exemplo a incineração (BHASKAR *et al.*, 2015; EMUN *et al.*, 2010), e por processos bioquímicos, tendo como exemplo a Digestão Anaeróbia (DA) (WALKER *et al.*, 2009; PERALTA-YAHYA *et al.*, 2012). Como a grande quantidade de RSU gerados diariamente é preocupante, existe a necessidade da coleta, até a destinação final adequada, para o tratamento a ser realizado.

A incineração é um processo termoquímico baseado na combustão dos compostos orgânicos dos RSU. Geralmente a queima ocorre em usinas, convertendo o material residual em calor, gás de combustão e cinzas. O calor e o gás de combustão podem ser usados para fins energéticos, e as cinzas para fins de construção civil. O benefício da incineração é que reduz a massa sólida dos compostos orgânicos em 80-85%, e o volume em cerca de 95%

(SABBAS *et al.*, 2003; NIDONI, 2017). Porém, é necessário cuidado para evitar que os gases sejam depositados diretamente na atmosfera.

Os aterros sanitários são tratamentos bioquímicos de RSU, que precisam estruturalmente de um sistema de impermeabilização, oferta diária de resíduos, monitoramento de águas subterrâneas, sistema de drenagem de gases, monitoramento topográfico e hidro geológico (ABNT, 1983). Os aterros sanitários garantem a coleta e tratamento do biogás¹ e do chorume, como também possuem processos operacionais que conseguem reduzir as consequências ambientais (LUCAS *et al.*, 2010). Os aterros sanitários são grandes produtores de biogás, gerando diversos gases, como: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂). A disponibilidade desses gases varia de acordo com o tempo de vida do aterro. O metano representa cerca de 50% do biogás (LUCAS *et al.*, 2010). É preciso cuidado, pois os gases além de energéticos também possuem alto potencial de toxicidade para atmosfera (PIÑAS *et al.*, 2016). Dessa forma, o biogás é considerado uma fonte muito valiosa.

Segundo CHACARTEGUI *et al.* (2015), o biogás pode ser utilizado em diversas propostas: caldeiras para aquecimento residencial, aplicações térmicas, e evaporação de lixiviado. Também pode ser utilizado para geração de eletricidade por motores de combustão interna (MCI), micro turbinas a gás, micro turbinas a vapor, ciclos combinados, sistemas híbridos que integram MCI com ciclo orgânico de Rankine (ORC), sistemas híbridos MCI com células de combustível, combustível para veículos. De acordo com SALOMON (2007), o biogás se assemelha ao gás natural quando comparamos o poder calorífico dos dois, possibilitando sua substituição em diversas aplicações. A principal vantagem do biogás em relação ao gás natural é ser renovável, e sua produção depender de compostos orgânicos, a exemplo da biomassa.

Sobre os processos bioquímicos para o tratamento de RSU, a DA pode ocorrer por meio de reatores, podendo ser uma maneira viável de substituição dos aterros. Segundo STOCKMANN *et al.* (2016), a DA em reatores por meio da codigestão intensifica a produção de biogás. Analisando o ciclo de vida, a codigestão anaeróbia possui o melhor aproveitamento de energia renovável em comparação a DA convencional (STOCKMANN *et al.*, 2016). CARNEIRO (2009) destaca que a DA em reatores apresenta inúmeras vantagens em relação aos aterros sanitários, como: baixo grau de poluição, potencial elevado para a conversão de matéria orgânica, redução de odores e contribui para a diminuição desses

¹ O biogás é um termo mais amplo, e no caso específico de aterros sanitários, também se utiliza o termo gás (ou biogás) de aterro (landfill gas, LFG).

resíduos (biodegradáveis) em aterros sanitários. Dessa forma, a DA por meio de reatores apresenta uma excelente opção para diversificar a produção do biogás, e possui muito potencial a ser explorado com um olhar sobre o futuro.

Reconhecendo as oportunidades energéticas presentes no biogás originado de RSU, o objetivo deste trabalho foi mostrar a importância da sua utilização, por meio de uma revisão sistemática dos estudos teóricos e experimentais já desenvolvidos.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Tipo de Estudo

De acordo com a importância e relevância do estudo, aplica-se aqui uma revisão sistemática, caracterizada por ser uma metodologia qualitativa (PEREIRA *et al.*, 2018). A revisão sistemática busca melhor entendimento sobre métodos e resultados obtidos pelos pesquisadores, por meio das oportunidades energéticas do biogás proveniente de RSU. A ideia da revisão sistemática é identificar e discutir os estudos realizados com a intenção de mitigar impactos ambientais, como também diversificar a matriz energética global. A coleta dos dados ocorreu de maio a junho de 2021.

3.2.2. Fontes de Informação

Todas as buscas foram realizadas de forma manual, por meio da plataforma SCOPUS, limitando as pesquisas para artigos e revisões. Os descritores utilizados nas buscas foram: Solid Urban Waste, Landfill, Biogas, Cogeneration e Thermodynamics, assim como seus sinônimos correspondentes, além dos operadores booleanos AND e OR, para encontrar mais estudos que relacionassem discussões e resultados próximos aos descritores utilizados inicialmente. As buscas foram realizadas somente em inglês. Para a obtenção do maior número de estudos, não foi realizada nenhuma restrição temporal.

3.2.3. Critérios de Inclusão

Foram incluídos os estudos que avaliaram a utilização do biogás como forma de energia, buscando atender as maiores eficiências da sua utilização. Dessa maneira, estudos

que mostram a obtenção de energia térmica e elétrica (cogeração) de forma simultânea foram identificados, assim como aqueles que demonstraram resultados relevantes quanto às mitigações ambientais.

3.2.4. Critérios de Exclusão

Os resultados derivados de livros, anais, resumos de conferências e outras formas de divulgação não foram considerados. Alguns estudos voltados apenas para a questão do tratamento dos RSU foram excluídos. Artigos semelhantes e duplicados também foram excluídos desta revisão sistemática.

3.2.5. Identificação dos Estudos

Após a realização das buscas na plataforma SCOPUS, com a utilização dos descritores e os operadores booleanos, foi feita uma triagem a partir da análise dos títulos e resumos dos estudos. A etapa seguinte foi caracterizada pela leitura na íntegra dos resultados obtidos, para elencar os principais pontos dos dados e das informações relevantes e pertinentes, com a aplicação dos critérios de exclusão e inclusão.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3.1 representa o processo da revisão sistemática, de acordo com a metodologia que foi seguida. Inicialmente foram identificados 157 artigos, e logo após foram removidos os artigos duplicados. A etapa seguinte foi realizada com 83 artigos, que incluiu triagem com a leitura de títulos e resumos. Os 45 estudos identificados nesta etapa foram lidos na íntegra, finalizando com a obtenção de 17 estudos.

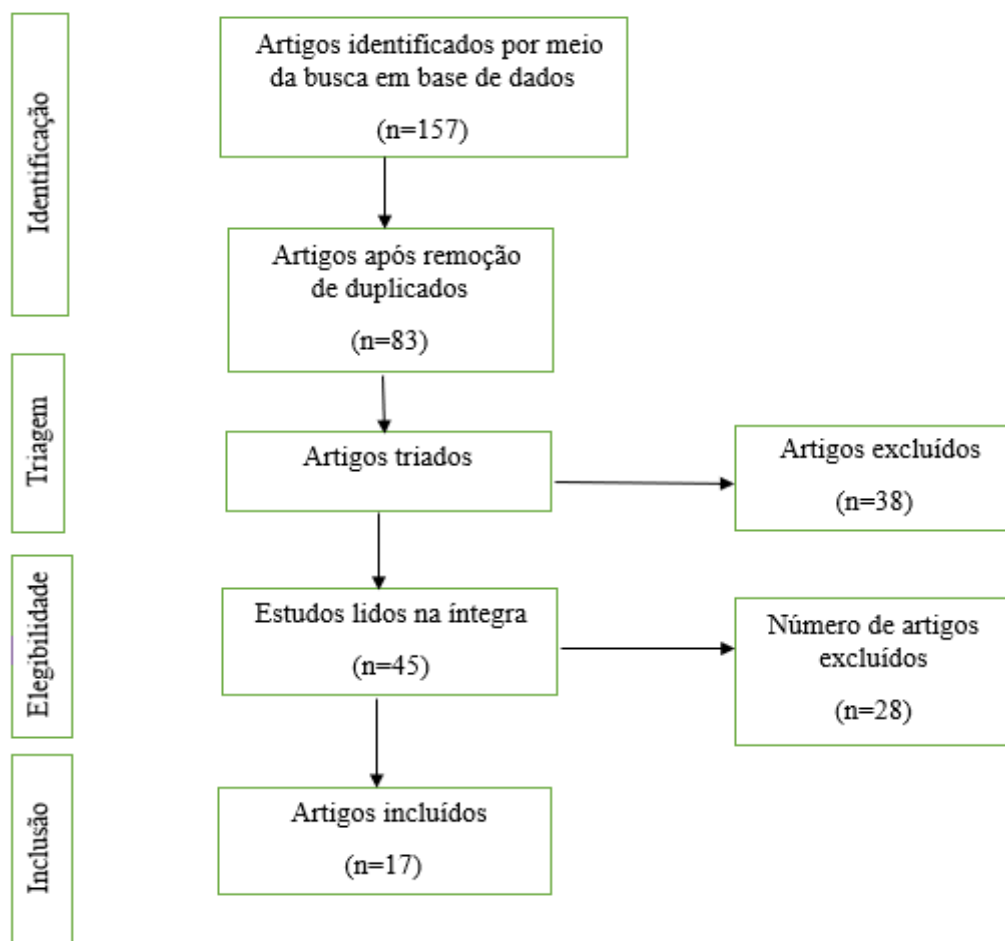


Figura 3.1. Diagrama do processo de revisão.
Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com a Figura 3.1, ao término das análises, 17 artigos preencheram os requisitos de inclusão da revisão sistemática. Os identificados foram: MORIN *et al.* (2010), SARAVIA *et al.* (2012), RUBIO-ROMERO *et al.* (2013), NISKANEN *et al.* (2013), BALCAZAR *et al.* (2013), MILANI *et al.* (2014), KUMAR *et al.* (2014), AHMED *et al.* (2015), CHACARTEGUI *et al.* (2015), BOSKOVIC *et al.* (2016), KIEFFER *et al.* (2016), NASCIMENTO *et al.* (2019), NOVELLI *et al.* (2019), GALLEGO *et al.* (2019), ORNELAS-FERREIRA *et al.* (2020), THANOPOULOS *et al.* (2020), BRIGAGÃO *et al.* (2021). Os estudos identificados foram publicados entre os anos de 2010 e 2021.

MORIN *et al.* (2010) investigaram as possibilidades econômicas de utilizar matéria orgânica, fração orgânica de RSU, e lodo de esgoto municipal por DA, para geração do biogás. O estudo foi feito para uma província de Quebec, Canadá, com cerca de 150.000 habitantes. Os autores aplicaram o biogás para cogeração, em um tanque de DA, utilizando o software MATTEUS (programa desenvolvido pela Hydro-Quebec). Dessa forma, gerando

eletricidade e calor residual, que seria utilizado para aquecimento na estação de tratamento de águas residuais do município. Os resultados mostraram um retorno no investimento de 3,7 anos para o preço de eletricidade de 0,10 \$/kWh. A adição de esterco de fazendas vizinhas aumentaria a produção de biogás em 37%. O retorno passaria a ser de 6,8 anos, devido aos gastos com os sistemas de captação de biogás, manutenção, e criação dos animais. Mas se o restante do digerido fosse usado para fins agrônômicos, ainda assim seria vantajoso. O projeto garante redução na emissão dos gases do efeito estufa (GEE) em 4.261 toneladas de CO₂ eq./ano. Caso o projeto para captação do biogás em um tanque de DA não seja adotado, esses gases serão emitidos, por falta de tratamento adequado.

SARAVIA *et al.* (2012) realizaram uma avaliação técnica e econômica de usinas de ciclo combinado movidas à biogás de aterro sanitário. O estudo foi realizado em uma usina localizada em Monterrey, no México. A proposta além de aumentar a eficiência energética, traz benefícios ambientais por meio da redução de emissões dos GEE, com ênfase na reciclagem de produtos reutilizáveis (vidros, metais, papel e plástico). O ciclo combinado proposto é caracterizado pela integração de MCI com Ciclo Orgânico de Rankine (mais conhecido por sua sigla em inglês, *Organic Rankine Cycle* - ORC). O objetivo principal é reaproveitar os gases de exaustão do ciclo MCI (que geralmente possui uma eficiência elétrica de até 42%, segundo os autores).

Uma planta ORC opera com temperaturas de evaporação relativamente baixas (70-300°C), pois em vez da água, a caldeira ou o evaporador é alimentado com um fluido orgânico (Isopentano, n-pentano, ciclohexano, n-butano, n-octano, isobutano, etc.). Dessa forma, os fluidos orgânicos têm baixa entalpia de evaporação, inferior à da água, possuindo melhor capacidade na recuperação de calor dos gases de exaustão do ciclo MCI. As plantas ORC são instaladas em módulos que incluem: evaporador, turbina, condensador, sistema de bomba e regenerador. Dessa forma, geralmente possuem capacidade de produção de 60 kWe à 2,7 MWe. No estudo de caso dos autores, o aterro sanitário possui 16 módulos MCI, com capacidade de geração de energia de 16,94 MWe (no total), todos alimentados pelo biogás do aterro. Os 16 MCI rejeitam 7.792 kWt de calor residual para o meio ambiente. Os autores consideram que os gases de exaustão dos ciclos MCI tenham no mínimo uma temperatura de 180°C. São comparados 5 métodos da integração de módulos ORC aos 16 módulos MCI. O método mais adequado, com melhor retorno financeiro, econômico e ambiental é integrar apenas 1 módulo ORC com 1,5 MWe de capacidade de produção, aos 16 módulos MCI. Dessa maneira, a capacidade de geração de eletricidade de 16,94 MWe passaria para 18,44

MWe (aumento de 8,9%), gerando 11,24 GWh/ano de eletricidade. O retorno financeiro seria recuperado em menos de 8 anos (quando os preços de eletricidade forem superiores a 0,09 US\$/kWh), e após isto a obtenção do lucro, possibilitando a venda da energia gerada e armazenada. Além disso, a nova planta evitaria emitir 4.159 M.T. de CO₂ por ano, ao meio ambiente. Os autores ainda consideram que o retorno financeiro pode acontecer muito antes do estimado, com um cenário mais otimista do que o proposto.

RUBIO-ROMERO *et al.* (2013) avaliaram a rentabilidade da produção de eletricidade a partir do biogás de aterros sanitários, em Andaluzia, Espanha. Para o estudo, consideraram os 34 aterros presentes na comunidade autônoma espanhola, localizada na costa sul do país. Dessa forma, definiram uma planta padrão de cogeração como base, caracterizada por um motor modelo GE Jenbacher JGC 320 de 1048 kW, com vida útil de aproximadamente 7,5 anos. Dos 34 aterros, apenas 6 não eram rentáveis economicamente, pois possuíam capacidade inferior a 166 kW, gerando menos de 118,8 m³/h de biogás. Como resultado, a pesquisa considerou o investimento da planta de cogeração em todos os 34 aterros. Concluindo que o retorno sobre o investimento é de 116%, um índice de retorno interno de 32,59%, e um *Payback* de 3,07 anos. Ou seja, após pouco mais de 3 anos o projeto passaria a ter lucro. Além disso, os autores afirmam que por meio de uma análise de sensibilidade, embora alguns aterros não fossem lucrativos individualmente, o investimento total para o grupo de 34 é extremamente rentável, e ajuda a estimular o uso da cogeração para garantir mitigações ambientais.

NISKANEN *et al.* (2013) realizaram um estudo na Finlândia, comparando 3 cenários para o tratamento e utilização do biogás gerado nos aterros sanitários. O primeiro cenário é caracterizado pela produção combinada de calor e energia (cogeração), por meio de um MCI. O segundo cenário é a combinação da geração de calor para o processo produtivo de asfalto no verão, e a produção distrital de calor por uma caldeira de água no inverno. O terceiro cenário busca o aprimoramento do biogás de aterros sanitários para a produção do biometano. De acordo com os autores, o método que tem menor emissão de gases do efeito estufa é o primeiro cenário, sendo o mais recomendado.

BALCAZAR *et al.* (2013) apresentam um estudo sobre um sistema de transformação de RSU em energia, com base na integração de turbinas a gás e a vapor a um incinerador. A planta híbrida, de ciclo combinado, busca a cogeração como solução para a disposição de RSU na cidade de São José dos Campos, São Paulo. O estudo técnico e econômico realizado mostra uma viabilidade atraente para o sistema proposto. Segundo os autores do estudo, São

José dos Campos tinha aproximadamente 630.000 habitantes naquele ano, com uma produção de 670 toneladas de RSU por dia. O sistema proposto é caracterizado por um ciclo combinado híbrido, ou seja, um primeiro ciclo que funciona com uma turbina a gás, e o segundo ciclo com uma turbina a vapor. Um incinerador é integrado ao ciclo para alimentar a turbina a vapor, com o intuito de aumentar a eficiência energética do sistema, como também diminuir o acúmulo de RSU por meio da queima direta. Caldeiras de recuperação também são implementadas no sistema, com trocadores de calor. Os autores desejam alimentar a turbina a gás com o biogás dos aterros, e com o uso alternativo do gás natural. A segunda turbina é alimentada com os gases resultantes do primeiro ciclo (em forma de vapor), e com os vapores provenientes do processo de incineração. Os pontos importantes para aplicação dos conceitos da termodinâmica são enumerados, como os fluxos de massa e o balanço energético. Para os cálculos de eficiência do sistema global, e retorno financeiro de investimento, os autores consideram taxas de juros com crédito de carbono e imposto sobre resíduos. Dessa forma, a conta não é tão simples, pois leva-se em conta também o uso do gás natural como combustível alternativo. Os valores encontrados para retorno financeiro variam de acordo com a Figura 3.2 (para mais informações consultar BALCAZAR *et al.*, 2013).

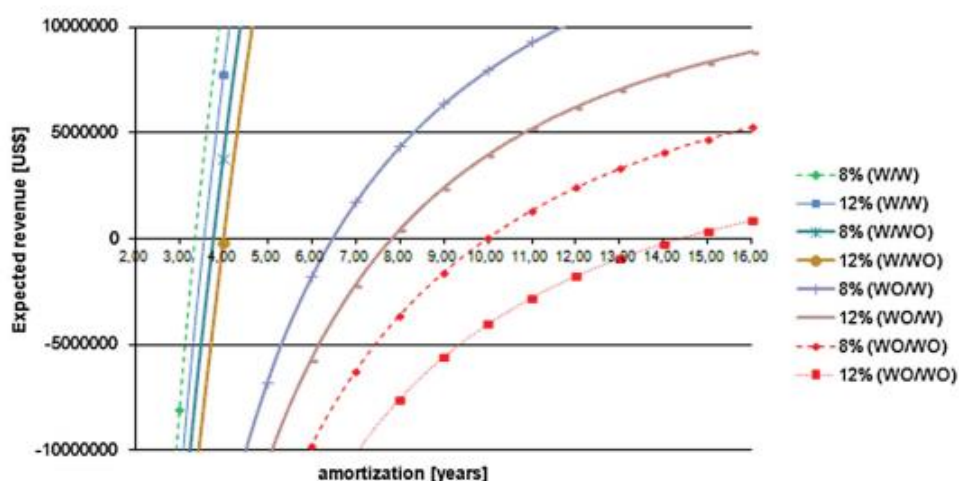


Figura 3.2. Retorno para caso híbrido (Turbina Hitachi H-25), com e sem créditos de carbono e imposto sobre resíduos.

Fonte: Balcazar *et al.* (2013).

Com relação a Figura 3.2, os autores consideraram duas taxas de juros anuais (8 e 12%) em relação às emissões de carbono. Dessa forma, foram feitas análises para o retorno financeiro quando créditos de carbono são computados e existe imposto sobre resíduos (W/W). Quando créditos de carbono são computados e não existe imposto sobre resíduos

(W/WO). Quando créditos de carbono não são computados e existe imposto sobre resíduos (WO/W). E quando créditos de carbono não são computados e não existe imposto sobre resíduos (WO/WO) (BALCAZAR *et al.*, 2013).

Tendo em vista que o aterro estudado por BALCAZAR *et al.* (2013) possui vida útil de 50 anos, o sistema proposto é altamente recomendado, tanto em um cenário otimista, quanto em um cenário pessimista. Pois, além de apresentar uma taxa interna de retorno (TIR) de 30%, diminui a emissão de GEE, e o acúmulo de RSU na cidade. Segundo os autores, o ciclo combinado híbrido proposto é o que apresenta maior eficiência energética.

MILANI *et al.* (2014) investigaram o desempenho de um sistema integrado de recuperação de energia, a partir de biomassa e RSU, com base em sistemas anaeróbicos incluindo digestão, gaseificação e tratamento de água. No sistema, a fração orgânica dos resíduos da biomassa digestível é alimentada em um digestor anaeróbico, enquanto uma parte da fração combustível dos RSU é gaseificada. Dessa forma, o biogás e o gás de síntese obtidos são usados como combustível para funcionamento de um sistema de cogeração, baseada em um MCI. A água residual produzida pela planta integrada é recuperada por meio de osmose direta e inversa. O estudo levou em consideração 3 províncias italianas, onde as simulações numéricas mostraram redução na emissão de GEE, máximo aproveitamento da biomassa e redução na quantidade de RSU. Os resultados finais mostram que aproximadamente 70% da biomassa sólida é utilizada como insumo para a planta integrada, além da economia da água utilizada para o funcionamento da usina, que é recuperada e purificada no processo.

KUMAR *et al.* (2014) realizaram um estudo sobre a ameaça de aquecimento global por meio dos GEE por despejo de RSU, em 23 cidades metropolitanas indianas usando o software LandGEM (versão 3.02 durante os anos 2001-2020). Para o cálculo do rendimento do CH₄ foram utilizados os dados do IPCC (2006). O estudo mostra que durante 20 anos (2001-2020) Mumbai tem a maior emissão de CO₂ e CH₄, com 16.598 e 6.049 Gg, respectivamente, e Visakhapatnam tem o mínimo, com 45,85 e 16,71 Gg de CO₂ e CH₄, respectivamente. Segundo os autores, no ano de 2007 a Índia emitiu 57,73 M.T. de CO₂ eq. e 2,52 M.T. de CH₄. Para mitigar estes impactos ambientais, os autores sugerem a adoção de aterros sanitários. Cerca de 60 a 90% de CH₄ podem ser recuperados em forma de biogás, e 47.474 Gg de carbono podem ser sequestrados como um benefício adicional. As opções do biogás recuperado incluem produção de energia, cogeração e aplicação direta como combustível de alta qualidade.

AHMED *et al.* (2015) desenvolveram um estudo no aterro sanitário de Seelong, na Malásia. A produção de biogás proveniente do aterro, usando o modelo IPCC, resultou na coleta de 10.000 toneladas de biogás estimados por ano. Os lucros obtidos foram cerca de 7,6 vezes maiores do que os ganhos sem o modelo proposto (US \$ 1,89 milhão/ano, contra US \$ 248.000/ano). Este aumento deve-se a utilização de turbinas a vapor para a cogeração, com vantagens em eficiência e robustez. A cogeração proposta é de 2.420 toneladas de equivalentes de petróleo, com cerca de 0,0035% da produção total de energia da Malásia. Com a utilização do biogás, a redução nacional dos GEE é cerca de 0,007%. Os autores sugerem a implementação desta tecnologia nos demais aterros sanitários do país.

CHACARTEGUI *et al.* (2015) analisaram o potencial de geração de biogás em uma estação de tratamento de RSU, na província de Sevilha, no sul da Espanha. O objetivo do estudo foi identificar o potencial energético associado ao aterro, e o uso do calor fornecido para acelerar a evaporação do lixiviado, reduzindo os riscos do excedente de chorume. O estudo compara as legislações de 2007 e 2014, para o caso do sistema de cogeração implantado no aterro. Segundo os autores, o regime de 2014 restringe as horas máximas e mínimas anuais de operação para cogeração no aterro, resultando em uso limitado de biogás para geração de eletricidade. Os resultados obtidos mostram que mesmo com uma legislação mais restrita, os valores para os investimentos são aceitáveis e lucrativos. Os valores para a legislação anterior são melhores. A Figura 3.3 representa o processo de utilização do biogás por cogeração no aterro.

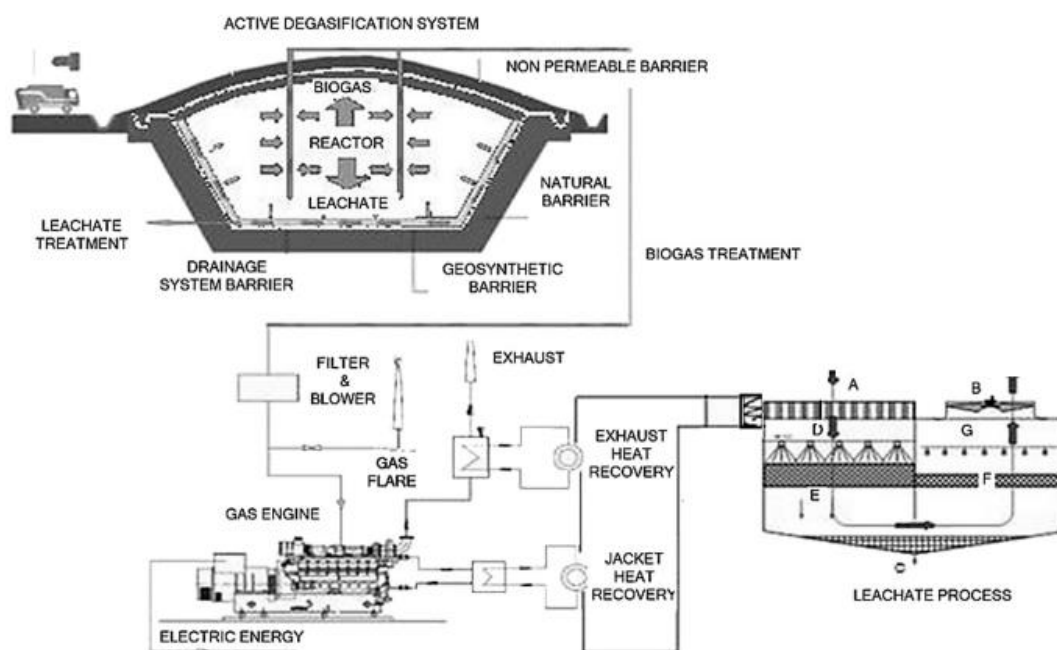


Figura 3.3. Diagrama do processo de cogeração do aterro de Sevilha, Espanha.
Fonte: Chacartegui *et al.* (2015).

A metodologia utilizada por CHACARTEGUI *et al.* (2015) foi o IPCC, juntamente com o método GasSim (DONOVAN *et al.*, 2010). O motor identificado para o processo foi o Jenbacher JMS 420 por apresentar melhor integração com a disponibilidade do biogás. Ao longo de sua vida útil o motor produz 134.843 MWh, com uma operação nominal de 1.414 kW, com calor total disponível de 883 kW distribuído em diferentes sistemas. A capacidade total de evaporação do lixiviado do aterro sob as condições atmosféricas é de 4.003 m³/ano, podendo chegar a 8.000 m³/ano com o calor adicional fornecido pela cogeração (cumprindo a meta esperada pelos autores). O estudo mostra que a capacidade de biogás capturado é de aproximadamente 65.000 toneladas em 30 anos. Os resultados mostram TIR com valores acima de 10% para diferentes cenários. Os autores ainda sugerem que, de acordo com a nova legislação, o acúmulo do biogás em razão do armazenamento pode ser utilizado nos anos futuros, ou vendido para consumidores externos.

BOSKOVIC *et al.* (2016) fizeram um estudo sobre o aproveitamento do biogás proveniente de 51 aterros sanitários na Sérvia, com a implementação de plantas de cogeração. Segundo os autores, todos os aterros possuem mais de 100.000 m³ cada. A modelagem de geração de biogás foi feita por meio da equação da metodologia IPCC. Para a geração de eletricidade os autores consideraram motores do ciclo Otto. Os resultados mostram que o investimento total em 14 usinas de cogeração é lucrativo. Os demais aterros não possuem quantidade suficiente de biogás para a planta proposta. A potência nominal total destas 14

usinas é de 7 MW de energia elétrica, e 7,9 MW de energia térmica, com um período de retorno médio cerca de 61 meses. Além do retorno financeiro, o investimento nestas usinas reduz o CO₂ eq. para 161.000 toneladas por ano. O estudo garante benefícios econômicos e ambientais com a implementação de usinas de cogeração nos 14 aterros identificados.

KIEFFER *et al.* (2016) concluíram um estudo sobre a exploração dos RSU somado ao gás natural, com o objetivo de produzir fontes primárias de energia (eletricidade e combustíveis). Foram analisadas de maneira técnica e econômica processos como a DA, a síntese de Fischer-Tropsch (FTS) e o ciclo combinado. A DA produz o biogás e matéria orgânica residual (podendo ser usado como nutrientes para o solo), a FTS converte o gás de síntese resultante em combustíveis líquidos, e o ciclo combinado gera eletricidade. Os equipamentos deste estudo tomaram como referência informações do Laboratório Nacional de Tecnologia de Energia (NETL, 2013), juntamente com o simulador AspenPlus e o método Monte Carlo. Os resultados mostram que ao adicionar o biogás com o gás natural, mais oportunidades podem ser exploradas, a fim da obtenção de modelos mais lucrativos e que causem menor impacto ambiental, diversificando portfólios de matéria prima e produtos.

NASCIMENTO *et al.* (2019) realizaram um estudo em um aterro sanitário na cidade de João Pessoa (Nordeste do Brasil). O foco da pesquisa foi o aproveitamento do biogás para geração de eletricidade e evaporação de lixiviado. Os autores aplicaram o método GasSim, com dados reais sobre a disposição de RSU no aterro, com capacidade para 1.100 t/dia de resíduos (com 23% de material reciclável). O motor de preferência para a pesquisa foi o Jenbacher JMS 620 GS-BL, chegando a 216 GWh durante a vida do aterro. O aproveitamento dos gases de exaustão do motor é realizado por uma estação de tratamento do lixiviado, com um fluido circulando em um ciclo secundário. Dessa forma, o calor é transferido para processos que demandam energia térmica, com o objetivo de evaporação do lixiviado. Segundo o estudo, o pico de produção do biogás é de 11.277,28 toneladas em 2028, com produção até 2042. A utilização da cogeração garante resultados econômicos líquidos positivos, com TIR superior a 30% após 26 anos, com lucro de aproximadamente R\$ 32 milhões. Além de ser uma alternativa lucrativa é autossustentável.

NOVELLI *et al.* (2019) analisaram a produção de biogás em uma planta administrada no município de Sedegliano (Nordeste da Itália). A planta começou a funcionar em junho de 2016. A principal atividade consiste na exploração da fração orgânica dos RSU e da coleta seletiva do verde florestal. A planta garante a produção de biogás (usado em uma instalação de cogeração), e composto de qualidade, que pode ser usado na agricultura como fertilizantes,

após submissão a análises físico-químicas para verificação do estado de fim dos resíduos. A energia térmica é parcialmente recuperada para a produção de água quente para aquecer o digestor anaeróbio, o tanque de coleta do lixiviado e as salas da fábrica. Aproximadamente 10% da eletricidade é autoconsumida para as necessidades dos processos anaeróbios, o valor restante é alimentado diretamente na rede elétrica pública. A planta é caracterizada por 2 motores de cogeração, com potencial de 998 kW, a energia térmica é usada para aquecer os fermentadores para manter uma temperatura de 37°C. Os potenciais da planta são de 31.000 t/ano de resíduos recebidos, 3 milhões N.m³/ano de produção de biogás, e 10.300 t/ano de produção de composto. Dessa forma, a planta garante destinação final adequada dos resíduos, boa eficiência energética e impactos ambientais mínimos.

GALLEGO *et al.* (2019) analisaram termodinamicamente o comportamento de ciclos combinados operando com biogás proveniente de RSU, na cidade de Santo André (Brasil). O município gera 750 t/dia de resíduos. Neste trabalho, o biogás é utilizado por um ciclo combinado composto por um MCI, com sistema de gaseificação de RSU, combinado com sistema de queima de gás de síntese para alimentar um ciclo Rankine, além de um ORC, que foi proposto, modelado e simulado. O simulador utilizado no trabalho foi o *Engineering Equation Solver* (EES). Segundo os autores, o valor médio da eficiência exergética foi de 15,2% e 3.112 kW de potência líquida total para o Ciclo Combinado. Para a potência total do Ciclo Combinado, o motor representou 39,1% de participação, o Ciclo Rankine a Vapor representou 53,9%, e eficiência média de 11,1%. O ciclo ORC contribuiu em média com 6,9% do total da potência, com eficiência média de 17,2%. A quantidade de CO₂ emitido foi de 1.969 g/kWh e 91,5 g/kWh de CH₄ emitidos. Este ciclo proposto representa flexibilidade em relação a geração de eletricidade, com alta eficiência energética.

ORNELAS-FERREIRA *et al.* (2020) estudaram estratégias para recuperação de energia pela metanização de um lote de estado sólido (SSBM) para os diferentes usos do biogás. O estudo foi realizado no Rio de Janeiro, Brasil. A planta em escala de demonstração é capaz de tratar 23,5 t/dia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (OFMSW). Existem 4 unidades principais, de acordo com a Figura 3.4: i) 6 reatores de SSBM; ii) 1 reator híbrido que pode ser operado como SSBM ou como reator de secagem térmica; iii) 1 reator anaeróbio completamente misturado para estabilidade do lixiviado e produção do inóculo; iv) unidades de condicionamento de biogás, tratamento e utilização.

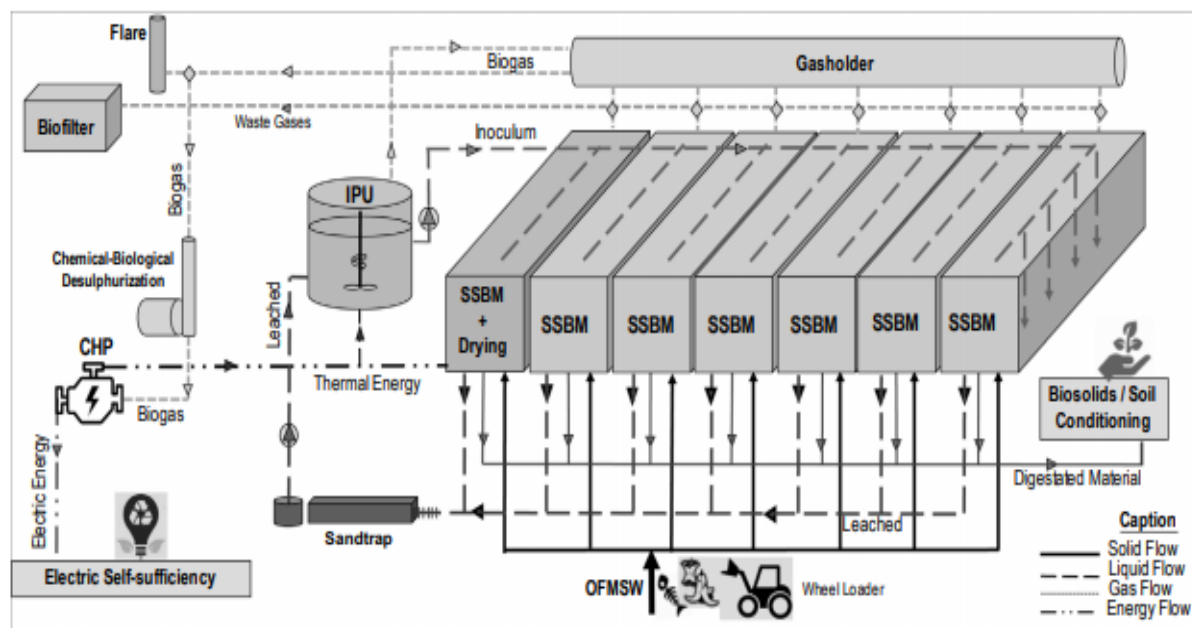


Figura 3.4. Fluxograma básico da planta proposta.

Fonte: Ornelas-Ferreira *et al.* (2020).

O biogás produzido pode ser usado como combustível para um MCI combinando calor e energia, para gerar eletricidade, mas seu uso para produção de biometano também foi considerado no estudo. Os autores afirmam que o uso do biometano ao invés do diesel nos caminhões de transporte de resíduos, reduziria a emissão dos GEE em $167 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.t}^{-1}$ de OFMSW. Segundo o estudo, os melhores cenários de uso do biogás para geração de energia elétrica ou produção de biometano garantem prevenção de 462 e $537 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.t}^{-1}$ de OFMSW respectivamente.

THANOPOULOS *et al.* (2020) realizaram uma análise técnico-econômica de um esquema de tratamento mecânico-biológico integrado, que inclui a DA para cogeração por meio do biogás. O estudo foi realizado no município de Vari-Voula-Vouliagmeni, localizado nos subúrbios ao sul de Atenas, Grécia. Um número total de 34.495,18 toneladas de RSU é gerado na região, que corresponde a 706,62 kg por cidadão ao ano. Os autores compararam 3 tipos de tratamento de RSU (incineração, gaseificação e DA), de acordo com os requisitos: i) práticas ecologicamente corretas de tratamento de resíduos com as tecnologias mais comprovadas; ii) minimização dos custos operacionais de gestão de resíduos; iii) desempenho de produção de energia suficiente; iv) aceitação pela comunidade local. A DA mostrou ser a mais aplicável para o estudo, por meio de um reator no processo de obtenção do biogás. Um MCI para cogeração é implementado na planta. Após o balanço de massa e energia, o substrato orgânico do lixo doméstico (8.887 toneladas) é misturado com o fluxo de resíduos

verdes triturados (9.908 toneladas), juntos, são bombeados para o reator. A produção de biogás registrada foi cerca de 1.700.000 N.m³ por ano. O motor recebe este biogás e produz cerca de 3.950 MWh_{el} de eletricidade, e 4.365 MWh_{th} de calor para uma rede de aquecimento local. O projeto possui um retorno financeiro em 100% após 11,5 anos, com tempo de vida de 15 anos. Além de reduzir em 64% a quantidade anual de RSU que vão para o aterro.

BRIGAGÃO *et al.* (2021) compararam uma planta de ciclo combinado, sem captura de carbono, a uma com captura de carbono, ambas as plantas operando com o biogás de aterro. Os autores investigaram a viabilidade de conceitos de emissão zero de gás de aterro com a tecnologia de oxi-combustão (captura de carbono). A análise econômica e ambiental foi feita por meio do simulador Aspen-HYSYS. Os resultados ambientais mostram que a planta que utiliza a oxi-combustão em comparação com a planta convencional, reduz as emissões de GEE de 425,90 t CO₂-eq/h para 75,05 t CO₂-eq/h (base GWP100). Quanto aos resultados econômicos a planta convencional mostrou melhores resultados, porém políticas de taxaço para reduço de emissão de GEE pode tornar a planta convencional menos atraente no decorrer dos anos, devido ao aumento dos impostos sobre a emissão de CO₂. Em alguns países os níveis de tributação já estão sendo amplamente empregados. A planta com captura de carbono é alimentada por 1,08·10⁶ m³/d gás de aterro, gerando 85,33 MW de potência, podendo suprir a demanda de aproximadamente 70.000 residências médias nos EUA. Portanto, a planta com captura de carbono, além de garantir mitigaçoões ambientais, pode ser lucrativa no decorrer dos anos, envolvendo benefícios sociais e de saúde.

Todos os estudos identificados neste artigo de revisão sistemática corroboram com a utilização do biogás como solução energética, evitando o acúmulo exacerbado dos RSU como tendência mundial na sociedade moderna. Além das mitigaçoões ambientais alcançadas. Os estudos identificados podem servir como referência para aplicação em diversos lugares do mundo, afim de diversificar a matriz energética global. As diversas tecnologias incorporadas e adaptadas ao uso do biogás proveniente da matéria orgânica comprovam de maneira contundente a mentalidade de eficiência e sustentabilidade. Dessa maneira, a demanda por pesquisas neste sentido tende a estar cada vez mais presentes no cotidiano.

3.4. CONCLUSÃO

Por meio dos artigos apresentados neste estudo, e das referências utilizadas na literatura, constatou-se a importância da utilização desta fonte alternativa e renovável de

energia. O biogás tem uma aplicação extremamente flexível, podendo ser incorporado a diversos sistemas termodinâmicos para fins energéticos. Como mostrado ao longo deste trabalho, diversas pesquisas buscam soluções para o acúmulo de RSU, considerando também a redução dos impactos ambientais. Dos 17 artigos identificados, 12 mostraram o biogás resultante do processo bioquímico, e 5 mostraram o biogás resultante da junção do processo bioquímico mais o termoquímico. De acordo com as estimativas realizadas pelos autores, todos os artigos da revisão sistemática corroboram com a redução de emissões dos gases do efeito estufa.

A estratégia de incentivar o uso do biogás por meio desta revisão sistemática, busca contribuir para a literatura científica deste ramo, com base em valores obtidos por meio dos estudos identificados. Ainda existem muitas possibilidades de aplicação do biogás proveniente da matéria orgânica dos RSU. Para isto, estudos futuros deverão receber incentivos para melhorar ainda mais os processos de eficiência energética e mitigações ambientais, com o objetivo de diminuir o tempo de retorno financeiro dos investimentos empregados nos trabalhos desenvolvidos.

Experiências de sucesso em outras regiões do mundo podem ser estendidas e adaptadas para o Brasil, principalmente nos momentos de reduzida geração hidrelétrica (e consequente bandeira vermelha na fatura elétrica), com benefícios para o governo e para a população. O aproveitamento energético do biogás traz vantagens econômicas e ambientais, reduzindo a sobrecarga das concessionárias de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983. NBR 8419: apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1983.
- ABRELPE- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2020. Panorama de resíduos sólidos no Brasil, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso: 18 junho 2021.
- AHMED, S. I., *et al.*, 2015. “Optimal landfill gas utilization for renewable energy production”. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34(1), 289-296.
- BALCAZAR, J. G. C., DIAS, R. A., & BALESTIERI, J. A. P., 2013. “Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities”. **Energy**, 55, 728-741.

- BHASKAR, T. & STEELE, P. H., 2015. "Thermo-chemical conversion of biomass". **Bioresource Technology** 178: 1.
- BOSKOVIC, G. B., *et al.*, 2016. "Co-generation potentials of municipal solid waste landfills in Serbia". **Thermal Science**, 20(4), 1271-1281.
- BRIGAGÃO, G. V., *et al.*, 2021. "A zero-emission sustainable landfill-gas-to-wire oxyfuel process: Bioenergy with carbon capture and sequestration". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 138, 110686.
- CARNEIRO, D. R. C., 2009. "Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos". (2009). 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Portugal. 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/66701>. Acesso: 27 maio 2021.
- CHACARTEGUI R., CARVALHO, M., ABRAHÃO, R., BECERRA, J., 2015. "Analysis of a solid plant in an urban waste landfill in southern Spain". **Applied Thermal Engineering**. v. 91, pgs. 706-717.
- CHAI, X., TONJES, D. J., & MAHAJAN, D., 2016. "Methane emissions as energy reservoir: context, scope, causes and mitigation strategies". **Progress in Energy and Combustion Science**, 56, 33-70.
- DONOVAN, S. M., BATESON, T., GRONOW, J. R., & VOULVOULIS, N., 2010. "Modelling the behaviour of mechanical biological treatment outputs in landfills using the GasSim model". **Science of the total environment**, 408(8), 1979-1984.
- EMUN, F., *et al.*, 2010. Integrated gasification combined cycle (IGCC) process simulation and optimization. **Computers & chemical engineering**, 34(3), 331-338.
- GALLEGO, A., KUBO, H., GUTIERREZ-GOMEZ, A. C., BERECHÉ, R. P., NETO, A. P. & ROCHA, A. D., 2019. Thermodynamic analysis of behaviour in a combined cycles operating with biogas and municipal solid waste. **International Journal of Thermodynamics**, 22(2), 74-82.
- IEA- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2019. "Relatório de status de energia global de CO₂". "As últimas tendências em energia e emissões em 2018". Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>. Acesso: 18 junho 2021.

- KIEFFER, M., BROWN, T., & BROWN, R. C., 2016. “Flex fuel polygeneration: Integrating renewable natural gas into Fischer–Tropsch synthesis”. **Applied Energy**, 170, 208-218.
- KUMAR, A., & SHARMA, M. P., 2014. “GHG emission and carbon sequestration potential from MSW of Indian metro cities”. **Urban climate**, 8, 30-41.
- LUCAS, J. F. R., *et al.*, 2010. “Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu – PR”. XIII Congresso de Engenharia Química. 2010. Disponível em: <https://xdocs.com.br/doc/cobeq-biogas-final-corrigido-vqoewex572o6>. Acesso: 26 maio 2021.
- MILANI, M., MONTORSI, L., & STEFANI, M., 2014. “An integrated approach to energy recovery from biomass and waste: Anaerobic digestion–gasification–water treatment”. **Waste management & research**, 32(7), 614-625.
- MORIN, P., MARCOS, B., MORESOLI, C., & LAFLAMME, C. B., 2010. “Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada”. **Applied energy**, 87(1), 275-283.
- MOURAD, A. L., GARCIA, E. E., VILHENA, A., 2022. “Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações”. Campinas: Cetea/Cempre. 2002. 92 p.
- NASCIMENTO, D. P., MENEZES, V. L., CARVALHO, M., & CHACARTEGUI, R., 2019. Energy analysis of products and processes in a sanitary landfill. **IET Renewable Power Generation**, 13(7), 1063-1075.
- NETL, 2013. “Analysis of natural gas-to liquid transportation fuels via Fischer– Tropsch”. Washington, DC: U.S. DOE; 2013.
- NIDONI, P. G., 2017. “Incineration Process for Solid Waste Management and Effective Utilization of By Products”, **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 4, n. 12, pp. 378-382.
- NISKANEN, A., *et al.*, 2013. Enhancing landfill gas recovery. **Journal of Cleaner Production**, 55, 67-71.
- NOVELLI, V., *et al.*, 2019. “Biomass Exploitation for Energy Supply and Quality Compost Production. An Exemplary Case or Circular Economy in the Northeast of Italy”. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, 18(10).
- ONU BRASIL, 2018. “Humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, diz ONU em dia mundial”. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/humanidade->

- produz-mais- de-2-bilhoes-de-toneladas-de-lixo-porano-diz-onu-em-dia-mundial/. Acesso: 27 maio 2019.
- ORNELAS-FERREIRA, B., *et al.*, 2020. “Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro-Brazil”. **Renewable Energy**, 146, 1976-1983.
- PERALTA-YAHYA, P. P., *et al.*, 2012. “Microbial engineering for the production of advanced biofuels”. **Nature**, 488(7411), 320-328.
- PEREIRA, A. S., *et al.*, 2018. “Metodologia da pesquisa científica”. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf. Acesso: 18 junho 2021.
- PIÑAS, J. A. V., *et al.*, 2016. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, 33, 175-188.
- RUBIO-ROMERO, J. C., ARJONA-JIMÉNEZ, R., & LÓPEZ-ARQUILLOS, A., 2013. Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste landfills. **Journal of Cleaner Production**, 55, 84-91.
- SABBAS, A., *et al.*, 2003. “Management of solid waste incineration residues”. **Waste Manage**, v. 23, pp. 61–88.
- SALOMON, K. R., 2007. “Avaliação Técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.” Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1721>. Acesso: 27 maio 2021.
- SARAVIA, J. R., *et al.*, 2012. “Technical and economical evaluation of landfill-biogas fired combined cycle plants”. **Distributed Generation & Alternative Energy Journal**, 27(3), 7-25.
- STOCKMANN, A. J., CAETANO, M. O., GOMES, L. P., 2016. “Análise de ciclo de vida da destinação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos: codigestão anaeróbia, digestão anaeróbica e aterros sanitários”. In.: 7º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos. Porto Alegre, RS. Anais. Disponível em:

<http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/51>. Acesso: 27 maio 2021.

- TALYAN, V., DAHIYA, R. P., & SREEKRISHNAN, T. R., 2008. "State of municipal solid waste management in Delhi, the capital of India". **Waste management**, 28(7), 1276-1287.
- THANOPOULOS, S., *et al.*, 2020. "Analysis of alternative MSW treatment technologies with the aim of energy recovery in the municipality of Vari-Voula-Vouliagmeni". **Waste and Biomass Valorization**, 11(4), 1585-1601.
- WALKER, L., CHARLES, W., & CORD-RUWISCH, R., 2009. Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes. **Bioresource technology**, 100(16), 3799-380.

CAPÍTULO IV

4. ARTIGO: INVENTÁRIO E CONTABILIDADE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA A USINA DE BIOGÁS INSTALADA NO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA - PB

RESUMO

Nas últimas décadas, houve um aumento na quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados. Os potenciais impactos ambientais associados à produção de resíduos urbanos são uma preocupação crescente, especialmente no que diz respeito às emissões de gases de efeito de estufa. A matéria orgânica contida nos resíduos sólidos pode ser empregada para gerar biogás (e referido como gás de aterro), um combustível renovável. O objetivo deste estudo foi construir o inventário do sistema de biogás instalado no Aterro Sanitário Metropolitano da cidade de João Pessoa, Nordeste do Brasil, e aplicar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida para quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao sistema energético. Em parceria com a prefeitura de João Pessoa, a empresa italiana *Asja* é responsável pela operação do sistema de energia de biogás no aterro. O sistema energético conta com motores de combustão interna, e todo o biogás gerado é utilizado para fins energéticos. A energia elétrica gerada ajuda a diversificar o portfólio da matriz energética, podendo contribuir para a mitigação de impactos ambientais. O estudo apresenta informações coletadas *in loco* em visitas técnicas, revisões de literatura e simulações. As formas de transporte dos materiais da planta foram as responsáveis pela maior emissão de gases do efeito estufa. Enquanto o processo de reciclagem garante benefício ambiental de 25% em relação às emissões causadas. Os resultados aqui apresentados contribuem para estudos de *benchmarking* em usinas de biogás em aterros sanitários.

Palavras-chave: Pegada de carbono, gás de aterro, ODS 12, resíduos sólidos urbanos, resíduos municipais.

4.1. INTRODUÇÃO

Com o grande crescimento populacional nas últimas décadas, a quantidade de Resíduos Sólidos Municipais (RSU) aumentou consideravelmente. Cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos são produzidos em todo o mundo a cada ano (ONU, 2018). Seguindo a tendência mundial, a expectativa é que a quantidade de RSU em todo o mundo aumente ainda mais. Reconhecendo esse problema, pesquisas e trabalhos começaram a ganhar destaque no sentido de conscientização e preservação ambiental. De acordo com a norma brasileira NBR 10004/2004 - Resíduos Sólidos - Classificação (ABNT, 2004), resíduos sólidos são aqueles resultantes da atividade industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. São classificados como Resíduos Classe I (Perigosos), Resíduos Classe II A (Não perigosos e não inertes) e Resíduos Classe II B (Não perigosos e inertes). Os RSU são definidos como: material, substância, objeto ou bem descartado resultante das atividades humanas em sociedade, cuja destinação final seja procedida, se proponha a proceder ou seja obrigada a proceder, em estado sólido ou semissólido, bem como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades inviabilizem seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água, ou requeiram soluções técnica ou economicamente inviáveis diante da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define requisitos para todo o país, como a implantação de sistemas de coleta seletiva, visando à recuperação e reciclagem de materiais (BRASIL, 2010). Assim como a Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010), que define “a destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos”, a fim de evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública (ALFAIA *et al.*, 2017). Segundo MARCHEZETTI *et al.* (2011), os RSU podem ser tratados por meio de técnicas como gaseificação, pirólise, incineração, plasma, compostagem, reciclagem e Digestão Anaeróbia (DA). A DA é caracterizada como um conjunto de processos em que os microrganismos degradam a matéria orgânica biodegradável na ausência de O₂. Este procedimento ocorre em aterros, caracterizados por tratamentos bioquímicos, e estruturalmente necessitam de sistema de impermeabilização, abastecimento diário de resíduos, monitoramento de águas subterrâneas, sistema de drenagem de gases, monitoramento hidro geológico e topográfico (ABNT, 1983). Os elementos que constituem o desenho de um aterro são: sistemas de drenagem de águas superficiais; sistema de impermeabilização de fundo e laterais; sistema de drenagem de lixiviação; sistema de

tratamento de lixiviação; sistema de drenagem de gás; cobertura intermediária final (VAN ELK, 2007). Os aterros sanitários são grandes produtores de biogás (também chamado de gás de aterro), gerando diversos gases, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), gás hidrogênio (H_2S), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). A disponibilidade desses gases varia de acordo com a vida útil do aterro.

Além da utilização do biogás para fins energéticos, há também a preocupação com possíveis impactos ambientais. A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) pode ser aplicada para a quantificação dos impactos ambientais de bens, serviços e/ou produtos. A ACV é uma avaliação sistemática que quantifica os fluxos de energia e materiais, alcançando oportunidades de melhoria e desempenho do sistema (VIGON *et al.*, 1993; BENETTO *et al.*, 2009). De acordo com a ABNT NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014), a ACV estuda os aspectos ambientais e potenciais ao longo da vida de um produto ou sistema produtivo, desde a aquisição da matéria-prima, produção, uso, até a disposição final (ou reciclagem).

O objetivo deste trabalho foi construir o inventário para a usina de biogás instalada no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), localizado no Nordeste do Brasil, e aplicar a metodologia de ACV para quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao sistema energético. Esta é a primeira vez que é apresentado um detalhamento dos materiais e componentes que constituem o sistema energético da usina estudada.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

No município de João Pessoa, todos os serviços de limpeza urbana devem ser regidos exclusivamente pela Autoridade Especial Municipal de Limpeza Urbana (EMLUR). De acordo com o Regulamento de Limpeza Urbana do Município de João Pessoa/PB (LEI Nº 6.811/1991), a EMLUR possui patrimônio e receita próprios, autonomia financeira, administrativa e técnica. Além disso, a EMLUR tem competência para planejar, desenvolver, regular, fiscalizar, executar, manter e operar serviços que fazem parte ou relacionados à sua atividade fim, bem como promover a educação para a limpeza urbana. Atualmente a EMLUR é responsável pela coleta diária de resíduos em João Pessoa. O destino final desses resíduos é o Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP), que também atende mais municípios (Cabedelo, Conde, Santa Rita, Bayeux, Pedras de Fogo, Mamanguape, Marcação, Caaporã e Baía da Traição) que fazem parte do consórcio intermunicipal (EMLUR, 2021). O aterro está localizado a aproximadamente 19 km do centro comercial da cidade de João

Pessoa. O ASMJP teve suas atividades iniciadas em 2003, foi projetado com 24 células (cada uma com volume final de 450.000 m³), instalada em uma área de 100 hectares, com vida útil de aproximadamente 25 anos (NASCIMENTO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

O biogás gerado no aterro é tratado e utilizado para fins energéticos por meio de uma parceria entre a prefeitura de João Pessoa e a empresa italiana *Asja*. A central de biogás foi instalada pela empresa *Asja*, para começar a distribuir energia renovável na rede elétrica. Inicialmente, o projeto foi instalado para gerar 4,2 MW de energia. Produzir cerca de 30.000 MWh de eletricidade por ano, o suficiente para atender às necessidades de 45.000 pessoas, e evitar a emissão de 95.000 toneladas de CO₂ na atmosfera (ASJA, 2019). Foram instalados Motores de Combustão Interna (ICE), ciclo Otto, modelo Jenbacher JMS 420 GS para biogás. Em 2017, dois motores foram instalados na fábrica. Mais tarde, em 2019, dois outros motores do mesmo modelo foram adicionados à planta. Atualmente a usina de biogás presente no ASMJP possui quatro motores funcionando diariamente.

A Figura 4.1 mostra o layout da planta de biogás de forma simplificada, representando apenas um motor, desde a entrada do combustível no misturador de gás, passando pelo motor (combustão), até os gases de escape. A Tabela 4.1 mostra as especificações técnicas do motor Jenbacher JMS 420 GS para biogás.

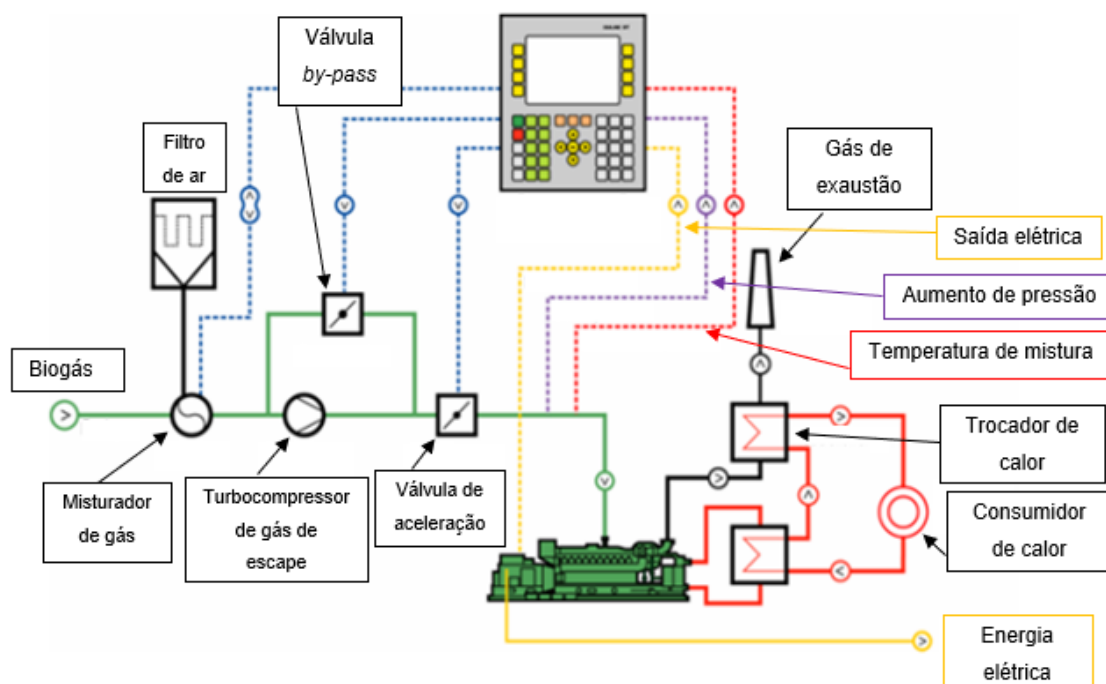


Figura 4.1. Layout de um motor simplificado de usina de biogás com controle de combustão.

Fonte: Adaptado de Baumann (2012).

Tabela 4.1. Especificações técnicas do motor Jenbacher JMS 420 GS

Motor Jenbacher JMS 420 GS - B. L		
Saída elétrica	kW	1.415
Tipo do motor/configuração	J 420 GS-A21 / V 70°	
Número de cilindros	20	
Eficiência total	%	84,3
Peso seco	kg	6.600
Velocidade nominal	rpm	1.500
Velocidade de trabalho dos pistões	m/s	9,25
Pressão de fluxo do gás	mbar	80-200
Capacidade de enchimento para óleo lubrificante	L	457

Fonte: Adaptado de Jenbacher (2002).

O inventário de ciclo de vida foi construído com base em visitas técnicas à usina de biogás e consulta aos manuais dos fabricantes dos equipamentos. Além dos motores, a planta possui módulos de recuperação de calor e controladores. De acordo com a Figura 4.1, para realizar o inventário do ciclo de vida dos controladores, foram considerados componentes do motor (gerador), o turbocompressor dos gases de escape, e a válvula de aceleração.

O painel é responsável pelo controle das válvulas, temperatura e exaustão dos gases de trabalho, geração de energia elétrica, rotação e potência do motor, tempo de operação, etc. A planta pode funcionar manualmente, automaticamente ou desligada, com base no painel de controle. O controle de combustão da mistura é LEANOX, um sistema que garante a proporção correta de ar para gás em todas as condições de operação. Isso tem a vantagem de minimizar as emissões de gases de escape, mantendo a operação estável do motor.

No que diz respeito ao transporte de equipamentos, para grupos geradores e recuperação de calor, fabricação, montagem, pintura e testes são feitos na Áustria (JENBACHER, 2002; BRACIER, 2013). Da sede da Jenbacher ao porto de Mirabello (Itália), foi considerado o transporte rodoviário (946 km). Entre o Porto de Mirabello e o Porto de Suape (Brasil), o transporte foi aquaviário (7.370 km), e do Porto de Suape até o local de instalação em João Pessoa, o rodoviário (159 km). Para os equipamentos dos controladores, a válvula by-pass é transportada de Belo Horizonte (MG) por rodovia (2.148 km), o filtro vem da China (aéreo para Recife, 15.948 km, e depois rodoviário, 124 km). O misturador é fabricado em Minas Gerais e vem por rodovia (1.776 km).

Após o ASMJP encerrar suas atividades, no ano de 2042, todos os equipamentos da usina de biogás podem ser reciclados. As empresas interessadas em compras de aços e materiais recicláveis encontram-se em Recife, a 120 km do ASMJP.

A contabilização das emissões de gases de efeito estufa (GEE) foi feita para os materiais e seus respectivos meios de transporte, até a chegada na usina. Utilizou-se o software *SimaPro* (2021), com a base de dados *Ecoinvent* v. 3.6 (2019) e método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2022), que agrupa os GEE num horizonte temporal de 100 anos.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base em visitas técnicas e consultas aos manuais dos fabricantes, as Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os inventários de ciclo de vida do grupo gerador e do módulo de recuperação de calor. A Tabela 4.4 mostra o inventário dos componentes do controlador. A última coluna de cada tabela representa a soma total dos pesos de cada componente dos quatro motores, já que os estoques representam a usina de biogás do ASMJP.

Tabela 4.2. Inventário do Ciclo de Vida do Grupo Gerador

Componente	Material	Quantidade	Total
Gerador	Ferro fundido	15.400 kg	61.600 kg
Camisas de água (entrada /saída)	(DN/PN 100/10) Ferro fundido nodular	24 kg	96 kg
Conector de saída do gás de escape	(DN/PN 300/10) Ferro fundido nodular	72 kg	288 kg
Conector do trem de gás	(DN/PN 100-150/16) Ferro fundido nodular	37 kg	148 kg
Conector de água do intercooler	(DN/PN 65/10) Ferro fundido nodular	17,5 kg	70 kg

Fonte: Construído com dados de (JENBACHER, 2002; HIDRAMACO, 2010).

Tabela 4.3. Inventário do Ciclo de Vida do Módulo de Recuperação de Calor

Componente	Material	Quantidade	Total
Camisas de água quente (entrada/saída)	(DN/PN 100/10) Ferro fundido nodular	24 kg	96 kg
Conector de saída do gás de escape	(DN/PN 300/10) Ferro fundido nodular	72 kg	288 kg
Dreno do condensado	(DN/PN 50/10) Ferro fundido nodular	12,5 kg	50 kg
Linha de drenagem	Ferro fundido nodular de 1/2"	3,98 kg/m	15,92 kg

Fonte: Construído com dados de (JENBACHER, 2002; HIDRAMACO, 2010; MARVITUBOS, 2017).

Tabela 4.4. Inventário de Ciclo de Vida dos Controladores

Componente	Material	Quantidade	Total
Painel de controle	PC-10" display colorido	0,5 kg	2 kg
Misturador de gás	Aço inoxidável	4,5 kg ¹	18 kg
Filtro de ar	Capsula de metal com elemento filtrante formado de material sintético	5 kg ²	20 kg
Válvula <i>by-pass</i>	Aço	68 kg ³	272 kg

Fonte: Construído com dados de (JENBACHER, 2002; APERAM, 2021; ALIBABA, 2021; CASA DAS VÁLVULAS, 2021)

¹Foi considerado o misturador estático, feito de aço 304L ou 316 (SNATURAL AMBIENTE, 2021).

Foi considerado um diâmetro nominal de 3" (APERAM, 2021). ² Alibaba (2021) ³Casa das Válvulas (2021).

A quantificação de emissões de GEE está mostrada na Tabela 4.5. O descomissionamento refere-se à finalização das atividades quando os materiais são reciclados.

Tabela 4.5. Emissões de gases do efeito estufa dos componentes do motor.

Componente	Processos	Emissões kg CO₂-eq
Grupos geradores	Materiais	113.549,20
	Transporte oceânico	42.729,50
	Transporte rodoviário	131.446,60
	Descomissionamento	-97.105,00
	TOTAL	190.620,30
Módulos de recuperação de calor	Materiais	821,32
	Transporte oceânico	30,64
	Transporte rodoviário	94,36
	Descomissionamento	-697,20
	TOTAL	249,12
Controladores	Materiais	648,78
	Transporte aéreo	121,00
	Transporte rodoviário	112,80
	Descomissionamento	-482,41
	TOTAL	400,17
TOTAL		191.269,59

Fonte: SimaPro (2021).

Para a Tabela 4.5, considerou-se (ECOINVENT, 2019): 5,19 kg CO₂-eq/kg para o aço inoxidável, 2,01 kg CO₂-eq/kg para o aço de baixo carbono, 1,81 kg CO₂-eq/kg para o ferro, 32 kg CO₂-eq/kg para os eletrônicos, 0,172 kg CO₂-eq/tkm para o transporte rodoviário num caminhão de 1-32 t, 0,0093 kg CO₂-eq/tkm para o transporte oceânico em container, 0,752 kg CO₂-eq/tkm para o transporte aéreo de longa distância, e 1,27 kg CO₂-eq/tkm para a coleta de resíduos urbanos. No caso da reciclagem de aço e ferro, a emissão é de -1,70 kg CO₂-eq/kg.

A produção anual de eletricidade da planta de biogás é de aproximadamente 30.000 MWh (ASJA, 2019), contabilizando a vida útil com oferta de biogás até 2042 (NASCIMENTO *et al.*, 2019) a planta consegue produzir 600.000 MWh de eletricidade até o final das atividades no aterro, representando 0,319 kg CO₂-eq/MWh.

Ao considerar o descomissionamento, o material é reciclado após a finalização das atividades, então há um benefício ambiental de 25% em relação à emissão total de GEE. Ou

seja, cerca de 25% das soluções sanitárias no ciclo de vida do aterro são evitadas por meio do processo de reciclagem do material. A Figura 4.2 ilustra o percentual de emissões de materiais e transporte de componentes da planta, juntamente com o benefício ambiental garantido pelo processo de reciclagem de materiais.

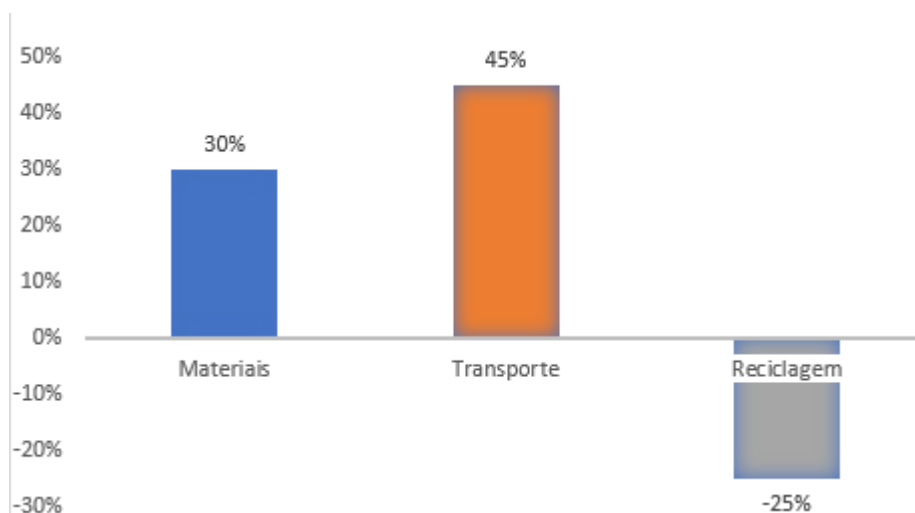


Figura 4.2. Detalhamento das emissões de gases de efeito estufa da usina de biogás ASMJP, considerando a reciclagem (materiais e transporte)

Fonte: Autoria própria (2021).

Alguns estudos destacam a importância da reciclagem para garantir mitigações ambientais no ciclo de vida dos materiais, diminuindo as emissões de GEE (MOTTA *et al.*, 2013; PASSUELLO *et al.*, 2014; MERSONI *et al.*, 2017).

Através do uso do biogás de aterro para fins energéticos, existem algumas formas de aumentar seu rendimento, como a cogeração (geração de duas ou mais formas de energia de uma única fonte). O estudo de NASCIMENTO *et al.* (2019), mostra o ganho na eficiência energética do sistema através do uso da cogeração, no mesmo aterro desta obra (o ASMJP). No primeiro processo foi feita uma simulação para um MCI. O segundo processo é caracterizado pelo uso da energia térmica resultante do primeiro processo para evaporação do lixiviado. O projeto garantirá um equilíbrio na economia ao longo da vida útil do aterro de aproximadamente R\$ 32 milhões até o ano de 2042.

Outro estudo realizado com essa mesma proposta (cogeração em biogás de aterro) foi CHACARTEGUI *et al.* (2015). A pesquisa foi para um estudo de caso em um aterro sanitário na província de Sevilha, Espanha. Os autores concluíram que o projeto apresenta uma taxa interna de retorno (TIR) com valores positivos acima de 10%, captando aproximadamente 65.000 toneladas de biogás em 30 anos. Ambos os estudos corroboram com o benefício no

uso do biogás como fonte renovável para melhores rendimentos energéticos, econômicos e ambientais.

De acordo com o Objetivo 12 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 12), este trabalho busca justificar a relevância de padrões sustentáveis de produção e consumo. Por exemplo: alcançar uma gestão ambientalmente saudável de produtos químicos e resíduos ao longo de todo o seu ciclo de vida; minimizar os impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente; incentivar as empresas a integrar informações de sustentabilidade em seus ciclos de relatórios; apoiar os países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis; entre outras formas (ONU, 2022).

Devido à limitação de estudos publicados sobre o caso específico de inventários de usinas de biogás, não foi possível comparar os resultados com outros estudos, o que reforça a necessidade de estudos futuros e maior divulgação deste tema. Como contribuição científica, este estudo demonstrou que a metodologia ACV pode ser muito útil e adequada em estudos de suscetibilidade no setor de energia. Apesar das limitações associadas à realização de um estudo de ACV baseado em um estudo de caso, os resultados podem ser usados como *benchmarking* na geração de eletricidade com biogás de aterro sanitário.

4.4. CONCLUSÃO

Este trabalho mostra a importância do tratamento dos resíduos sólidos urbanos, bem como a preocupação com a sua destinação final adequada. O objeto de estudo foi o sistema de energia a biogás instalado no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, Nordeste do Brasil. O sistema utiliza biogás de aterro como solução energética para a produção de eletricidade.

Os inventários de ciclo de vida dos equipamentos do sistema foram construídos após visitas técnicas, consultas aos manuais dos fabricantes e revisões de literatura. Os inventários são cruciais para quantificar as emissões de gases de efeito estufa. Aqui, foi considerado um horizonte temporal de 100 anos. Os resultados demonstram que o transporte dos equipamentos é o maior contribuinte para as emissões globais, seguido dos materiais utilizados na fabricação dos equipamentos. Como benefício ambiental, quando a reciclagem foi considerada, as emissões globais diminuíram 25%, garantindo a mitigação de impactos ambientais relevantes.

Este estudo incidiu sobre as emissões fixas associadas à construção de um sistema energético de biogás. Uma continuação deste estudo é quantificar as emissões operacionais associadas ao sistema, quantificando as emissões evitadas pela substituição de eletricidade da rede. Isso evidencia a necessidade de garantir destinação final adequada aos resíduos produzidos, juntamente com uma solução energética para diversificar o portfólio das matrizes energéticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983. NBR 8419: apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1983.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040, Rio de Janeiro.
- ALFAIA, R. G. D. S. M., COSTA, A. M., & CAMPOS, J. C., 2017. Municipal solid waste in Brazil: A review. *Waste Management & Research*, 35(12), 1195-1209.
- ALIBABA, 2021. “Filtro de ar do motor de alta qualidade”. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/machinery-engine-parts-high-quality-air-filter-1227732-642705-for-jenbacher-j412-j416-j420-gas-engine-1600209233717.html>. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- ASJA, 2019. “João Pessoa: uma nova usina de biogás asja no Brasil”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/joao-pessoa-uma-nova-planta-de-biogas-da-asja-no-brasil/>. Acesso: 19 de outubro de 2021.
- APERAM, 2021. Disponível em: https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Aperam_Inox_Tubos_Brasil-Cat%C3%A1logo_de_Produtos_v2.pdf. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- BAUMANN, D.P., 2012. "GE Jenbacher. Power Generation with Biogas and Alternative Gases Using Alternative Engines. XX Edition", the Green Expo. 25-27.
- BENETTO, E., *et al.*, 2009. “Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment”. **Science of the total environment**, 407(5), 1506-1516.

- BRACIER, 2013. “A GE espera gerar 300 MW com a venda de motores a gás até 2016”. Disponível em: <http://www.bracier.org.br/noticias/brasil/4273-ge-preve-geracao-de-300mw-com-venda-de-motores-a-gas-ate-2016.html>. Acesso: 18 de fevereiro de 2022.
- BRASIL, 2010. “Lei Federal nº 12.305 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e faz outras providências”. Diário Oficial da União.
- CASA DAS VÁLVULAS, 2021. Disponível em: <https://casadasvalvulasmg.com.br/informacoes-tecnicas/valvulas-bypass/>. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- CHACARTEGUI, R., CARVALHO, M., ABRAHÃO, R., BECERRA, J., 2015. "Analysis of a solid plant in an urban waste landfill in southern Spain". **Applied Thermal Engineering**. v. 91, pgs. 706-717.
- DA SILVEIRA, F. L., 2009. Motores térmicos escolhidos internamente pela Otto e Diesel. Instituto de Física da UFRGS. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/arquivos/maqterm.pdf>. Acesso: 13 de outubro de 2021.
- ECOINVENT, 2019. “A base de dados ecoinvent 3.6”. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/>. Acesso: 25 de abril de 2022.
- EMLUR, 2021. “Seplan e Emlur acompanham estudos para aumentar a vida útil do aterro”. Disponível em: <https://www.joaopessoa.pb.gov.br/noticias/secretarias-e-orgaos/seplan-e-emlur-acompanham-estudos-para-aumentar-vida-util-do-aterro-sanitario/>. Acesso: 22 de julho de 2021.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2021. “Climate change 2021: the foundation of physical science. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. AR6 report. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press, 2021
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2022. Derived methods derived from the Kyoto protocol and good practice guidelines. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>. Access: April 25, 2022.
- HIDRAMACO, 2010. “Soluções de Qualidade em Ferro Fundido”. Disponível em: https://www.hidramaco.com.br/Catalogo_Hidramaco.pdf. Acesso: 20 de outubro de 2021.

- JENBACHER GAS ENGINES, 2022. "Technical specification. JMS 420 GS-B.L". Available at: <https://pdf4pro.com/view/technical-specification-cogeneration-com-ua-529c7.html>. and https://www.clarke-energy.com/wp-content/uploads/ETS_E_T4_update13_rz.pdf. Access: October 20, 2021.
- LEGISLAÇÃO MUNICIPAL DE JOÃO PESSOA/PB, 1991. "Lei nº 6.811, de 4 de novembro de 1991". Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/pb/j/joao-pessoa/lei-ordinaria/1991/681/6811/lei-ordinaria-n-6811-1991-altera-a-natureza-juridica-da-empresa-de-limpeza-urbana-municipal-inlur-e-determina-outras-afins-e-complementares-disposicoes>. Acesso: 19 de outubro de 2021.
- LUCAS, J. F. R., MARAN, M. A., FRARE, L. M., 2010. "Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu – PR". XIII Congresso de Engenharia Química. 2010. Disponível em: <https://xdocs.com.br/doc/cobeq-biogas-final-corregidovqoewex572o6>. Acesso: 26 de maio. 2021.
- MARCHEZETTI, A. L., *et al.*, 2011. "Application of the AHP method for the ranking of alternatives for the treatment of household solid waste". **Built Environment**, 11(2), 173-187.
- MARTINS, W. A., 2017. "Avaliação do ciclo de vida do programa de coleta seletiva no município de João Pessoa-PB, Brasil". Dissertação (Dissertação em engenharia civil e ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.
- MARVITUBOS, 2017. "Tabela de Medição de Tarugos de Ferro Fundido". Disponível em: https://www.marvitubos.com.br/imagem_texto/_20170808_165252_tabela-ferro-fundido.pdf. Acesso: 20 de outubro de 2021.
- MERSONI, C., & REICHERT, G. A., 2017. "Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS". **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 22, 863-875.
- MOTTA, W. H., 2013. Análise do ciclo de vida e logística reversa. X SEGeT.
- NASCIMENTO, D. P., MENEZES, V. L., CARVALHO, M., CHACARTEGUI, R., 2019. "Energy analysis of products and processes in landfill". **IET Renewable Energy Generation**. v. 13, pp. 1063-1075.
- ONU BRASIL, 2018. "A humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, Dia Mundial da ONU". Disponível em: <https://nacoesunidas.org/humanidade-produz-mais-de-2-bilhoes-de-tonladas-de-lixo-porano-diz-onu-em-dia-mundial/>. Acesso: 27 de maio. 2019.

- ONU BRASIL, 2022. “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável”. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso: 22 de abril de 2022.
- PASSUELLO, A. C. B., *et al.*, 2014. “Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida dos Impactos Ambientais de Materiais de Construção em Análise: Estudo de Caso Alternativo da Pegada de Carbono do clínquer”. **Ambiente construído**, 14(4), 7-20.
- SILVA, G. A., MORAIS, J. A., & ROCHA, E. R., 2016. “Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos”. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21, 11-16.
- SOFTWARE SIMAPRO, 2021. Disponível em: www.simapro.nl. Acesso: 25 de abril de 2022.
- SNATURAL AMBIENTE, 2017. “Misturadores Estáticos”. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Misturador-Estatico.pdf>. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- TARAZONA, C. F., 2010. “Estimativa da Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos”. Dissertação (Dissertação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- VAN ELK, A. G. H. P., 2007. “Redução de Emissões na Disposição Final”. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado aos resíduos sólidos. Disponível em: https://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_mdl_1.pdf. Acesso: 15 de abril de 2022.
- VIGON, B. W., *et al.*, 1993. "Life Cycle Assessment: Inventory Principles and Guidelines", EPA/600/R-92/245, Cincinnati, US Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- WU, C., 2004. "Thermodynamic cycles: auxiliary computer design and optimization". New I.I.: New York: M. Dekke.

CAPÍTULO V

5. ARTIGO: ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM CICLO RANKINE INTEGRADO À USINA DE BIOGÁS DO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA – PB

RESUMO

O presente estudo mostra uma análise e simulação termodinâmica da integração de um ciclo Rankine à uma usina de biogás real. A usina utiliza motores a combustão interna e está localizada no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, Paraíba. Os resíduos sólidos urbanos são tratados no aterro, e passam por um processo de decomposição bioquímica através da digestão anaeróbica de suas partículas. A usina fica responsável pelo tratamento adequado do biogás, e também pelo seu uso. Todo o biogás é aproveitado por meio de um primeiro processo termodinâmico, através de motores a combustão interna. Este trabalho propõe a integração de um ciclo Rankine à usina, para reaproveitar os gases de exaustão em um segundo processo termodinâmico. Além do ciclo Rankine básico, foram analisados mais dois arranjos para o ciclo, nas análises de sensibilidade para fins comparativos. Os dados utilizados neste trabalho foram coletados em visitas técnicas à usina do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, em consultas a manuais de fabricantes, e revisão da literatura científica. Para a modelagem termodinâmica utilizou-se o software *Engineering Equation Solver*. Os resultados mostram que a integração de um ciclo Rankine à usina atual de biogás incrementa a geração de energia elétrica. Esta proposta pode ser readaptada para diferentes realidades em escala global, permitindo o uso mais racional e a extração do máximo potencial termodinâmico dos recursos naturais.

Palavras-chave: Gases de exaustão, Turbina a vapor, Rendimento energético, Sustentabilidade.

5.1. INTRODUÇÃO

O ciclo Rankine é caracterizado por ser uma das mais importantes formas de transformar energia térmica em energia mecânica e/ou elétrica. Esse ciclo é normalmente implementado em usinas nucleares e a carvão, mas também pode ser implementado de várias outras maneiras, como por exemplo nas atividades agroindustriais que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como matéria prima para geração de energia elétrica. O processo é feito pela queima desta fonte renovável de energia, com aproveitamento do calor dos gases de exaustão em turbinas a vapor (DANTAS *et al.*, 2013), ou em ciclos combinados que utilizam este calor em um primeiro processo termodinâmico, para reaproveitamento em um ciclo Rankine em um segundo processo. Os ciclos combinados são bastante comuns em usinas que utilizam a tecnologia de cogeração, que é caracterizada pela obtenção de duas ou mais formas de energia através de uma única fonte (COLONNA *et al.*, 2015).

Os principais componentes de um ciclo Rankine são: condensador, bomba, vaporizador (ou caldeira), e turbina, além do fluido de trabalho (TCHANCHE *et al.*, 2011). O fluido de trabalho pode ser a água (convencional), ou fluidos orgânicos. Quando o fluido de trabalho do ciclo é do tipo orgânico, o ciclo é chamado de Ciclo Orgânico de Rankine (mais conhecido por sua sigla em inglês, *Organic Rankine Cycle* - ORC). Os fluidos orgânicos possuem uma baixa entalpia de evaporação, e geralmente são utilizados em temperaturas e pressões mais baixas, muitas vezes oferecendo melhor rendimento energético, como no caso da energia solar, geotérmica, e produtos de biomassa (MAGO *et al.*, 2008). Assim, existe uma grande variedade de fluidos orgânicos para aplicação em um ORC, como por exemplo R113, R123, R134a, isobutano, R12 e R22 (VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2005; DRESCHER *et al.*, 2007; QUOILIN *et al.*, 2013). Algumas características importantes para um bom fluido de trabalho são a baixa toxicidade, boa compatibilidade do material e limites de estabilidade do fluido, além da baixa inflamabilidade, corrosão e incrustação (SOMAYAJI *et al.*, 2006).

Existem formas de garantir melhor desempenho em um ciclo Rankine, a exemplo do reaquecimento e regeneração (LI *et al.*, 2016a; 2016b). Isto é possível por modificações nos componentes básicos do ciclo.

No que se refere à alimentação do ciclo Rankine ou ORC, devido a preocupações ambientais a tendência é que combustíveis renováveis ganhem cada vez mais espaço (e.g., biomassa, biogás - GHAFFARPOUR *et al.*, 2018). BISPO JUNIOR *et al.* (2021) apresentaram uma revisão sistemática sobre as diversas formas de utilização do biogás

resultante de matéria orgânica, onde o biogás pode ser aproveitado em diversas propostas por meio de ciclos termodinâmicos para produção de energia elétrica e térmica. Frequentemente, além das vantagens financeiras (CHACARTEGUI *et al.*, 2015) existem vantagens ambientais (PALACIO *et al.*, 2019).

A eficiência energética do biogás (também chamado de gás de aterro) depende principalmente do conteúdo do gás metano na sua composição (que em média é de 50%, LUCAS *et al.*, 2010). A disponibilidade do biogás e seu potencial energético também dependem do tempo de vida do aterro, faixa de temperatura da geração de metano (preferencialmente entre 30°C e 40°C), e pH para o desenvolvimento de bactérias (entre 6,5 e 7,5) (CHRISTENSEN *et al.*, 2020).

No trabalho de NASCIMENTO *et al.* (2019), houve uma análise de viabilidade técnica e financeira da utilização do biogás do ASMJP para geração de energia elétrica, juntamente com o aproveitamento da energia térmica para evaporação do lixiviado (cogeração). Nesse caso, o aterro consegue gerar 11.277,28 t/ano de biogás no seu pico de produção, que ocorrerá no ano de encerramento das suas atividades, em 2028. A cogeração foi tecnicamente viável com o motor Jenbacher 620 GS-BL, gerando eletricidade para suprir as necessidades das atividades do aterro, e vendendo o excedente para a concessionária de energia elétrica. O balanço econômico total, ao longo da vida útil do aterro, é de pouco mais de R\$ 29 milhões positivos, considerando todas as possibilidades de uso do biogás citadas acima.

O objetivo do presente estudo foi desenvolver e simular um modelo termodinâmico para a integração de um ciclo Rankine à usina de biogás do ASMJP. A proposta baseia-se no aproveitamento dos gases de exaustão dos motores a combustão interna existentes na usina. Também foram realizadas análises de sensibilidade para verificar o impacto de estratégias de aumento de eficiência: reaquecimento e regeneração.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

Na cidade de João Pessoa, a destinação final de todos os resíduos coletados é o ASMJP. Os resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos são coletados pela Autarquia Especial Municipal de Limpeza Urbana (EMLUR) de João Pessoa/PB (Lei nº 6.811/1991). Dessa maneira, os serviços de limpeza urbana são de total e exclusiva responsabilidade da EMLUR. Além de João Pessoa, o ASMJP recebe resíduos de outras cidades que fazem parte de um consorcio intermunicipal. As cidades são: Cabedelo, Conde, Santa Rita, Bayeux, Pedras de

Fogo, Mamanguape, Marcação, Caaporã e Baia da Traição (EMLUR, 2021). Para atender a toda a demanda dos resíduos coletados destes municípios, o ASMJP foi projetado com 24 células (cada uma com volume final de 450.000 m³), instalado numa área de 100 hectares, com vida útil de aproximadamente 25 anos (SILVA *et al.*, 2016). O aterro recebe em média 2.400 toneladas/dia de RSU, teve suas atividades iniciadas em 2003, e fica a aproximadamente 19 km do centro comercial da cidade de João Pessoa (EMLUR, 2021).

Os RSU coletados, tratados, e depositados no aterro, sofrem um processo bioquímico de decomposição (WALKER *et al.*, 2009; PERALTA-YAHYA *et al.*, 2012), transformando grande parte da matéria orgânica em biogás. A usina de biogás foi instalada com o intuito de começar a distribuir energia renovável na rede elétrica. Inicialmente, o projeto foi instalado com 4,2 MW de potência, produzindo cerca de 30.000 MWh de eletricidade por ano (ASJA, 2019). A usina de biogás do ASMJP possui quatro motores modelo Jenbacher JMS 420. Aqui se propõe a integração de um ciclo Rankine básico à usina de biogás existente, onde os gases de exaustão que saem dos motores vão diretamente para uma caldeira de recuperação. A Figura 5.1 ilustra o sistema proposto.

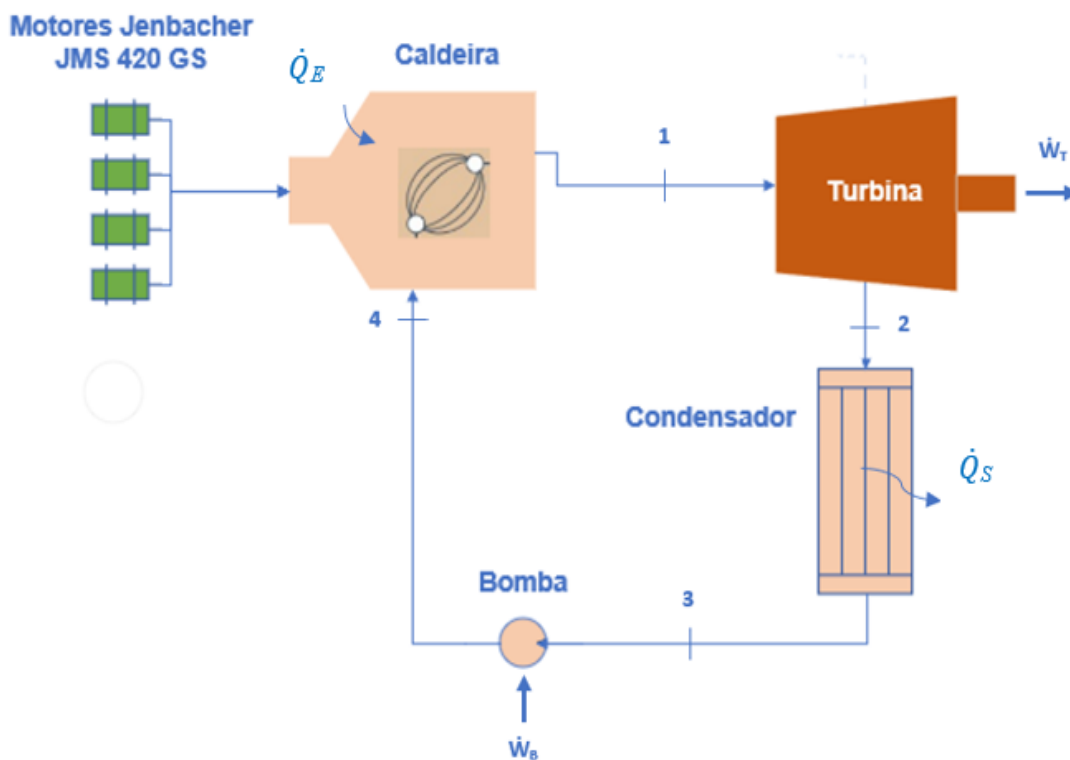


Figura 5.1. Ciclo Rankine integrado à usina de biogás do ASMJP.
Fonte: Autoria própria.

O fluido de trabalho na caldeira é a água, que é alimentada por uma bomba que retira água de um reservatório localizado na usina. Dessa forma, os gases de exaustão, ao entrarem em contato com as tubulações que contêm água dentro, produzem vapor, e o vapor alimenta a turbina, gerando trabalho. Acoplado à turbina existe um gerador, que converte a energia mecânica em energia elétrica. Através do processo de condensação do sistema, o fluido na fase líquida é encaminhado para um condensador, que por sua vez recupera parte da água e encaminha novamente para o ciclo.

Os pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 identificados nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são utilizados na análise termodinâmica da planta. A Equação 5.1 representa a equação geral para a Primeira Lei da Termodinâmica (PLT).

$$\left(\frac{dE}{dt}\right) = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{entra} h_{entra}^T - \sum \dot{m}_{sai} h_{sai}^T \quad (5.1)$$

A taxa de variação temporal de energia contida no volume de controle em um determinado instante é representada pelo termo $\left(\frac{dE}{dt}\right)$, $\dot{Q}$ representa a taxa líquida de calor (kW), $\dot{W}$ é a taxa líquida de trabalho (kW), $\dot{m}$ refere-se a vazão mássica (kg/s), h^T é a entalpia total, que inclui as componentes de energias cinética e potencial (kJ/kg).

Neste trabalho as seguintes considerações foram feitas: regime permanente, não há perda de carga nas tubulações, e as variações de energia cinética e potencial foram desconsideradas. A Tabela 5.1 mostra a aplicação da PLT para cada volume de controle da Figura 5.1, onde $\dot{Q}_{caldeira}$ é taxa de transferência de calor na caldeira, $\dot{W}_t$ é a potência da turbina, $\dot{W}_b$ é a potência da bomba, e $\dot{Q}_{condensador}$ é taxa de transferência de calor no condensador.

Tabela 5.1. Balanço de energia de cada dispositivo do ciclo Rankine básico

Dispositivo	Balanço de energia
Caldeira	$\frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{m}} = h_1 - h_4$
Turbina	$\frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$
Bomba	$\frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{m}} = h_4 - h_3$
Condensador	$\frac{\dot{Q}_{condensador}}{\dot{m}} = h_2 - h_3$

Fonte: Autoria própria (2022).

O rendimento energético total do ciclo Rankine integrado à usina de biogás do ASMJP pode ser calculado pela Equação 5.2, que, por sua vez, depende da resolução da Equação 5.3 (para um ciclo Rankine básico e para ciclo Rankine regenerativo).

$$\eta = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{caldeira}} \quad (5.2)$$

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba} \quad (5.3)$$

As simulações termodinâmicas foram modeladas e resolvidas no software *Engineering Equation Solver* (EES, 2022). O software EES tem sido usado como uma ferramenta de programação para analisar e simplificar as equações de balanço de energia de plantas termodinâmicas. Tem como função básica resolver um conjunto de equações algébricas, incluindo equações não-lineares, equações diferenciais e equações com variáveis complexas (GHODBANE e HUSSEIN, 2021). Aqui considerou-se rendimento isentrópico de 90% para a bomba e a turbina.

Na Tabela 5.2 estão os dados obtidos para os motores da usina. Para a integração de um ciclo Rankine à usina, os dados de interesse são aqueles referentes aos gases de escape dos motores após o processo de combustão.

Tabela 5.2. Dados dos gases de exaustão do motor

Propriedades	Dados
Temperatura de escape	465 °C
Vazão mássica de escape	7,924 kg/h

Fonte: Jenbacher Gas Engines (2012).

Para o dimensionamento da planta termodinâmica esquematizada nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, os equipamentos precisam atender às demandas reais da usina. Considerando que são quatro motores, a vazão mássica total é 31,696 kg/h. Dessa forma, a caldeira de recuperação de calor precisa trabalhar com gases à aproximadamente 465°C e com essa vazão mássica.

5.2.1. Análises de Sensibilidade

Esta seção analisa o impacto de estratégias direcionadas ao aumento da eficiência do ciclo Rankine.

Para o caso do ciclo Rankine com reaquecimento, seguindo a Figura 5.2, o vapor se expande através de uma turbina no primeiro estágio (processo 1-2), até um valor de pressão entre as pressões da caldeira e do condensador. Após ocorrer o reaquecimento, o vapor é expandido para um segundo estágio (processo 2-3), alimentando a segunda turbina. Depois da conversão da energia mecânica em energia elétrica, o fluido é encaminhado para o condensador (processo 3-4). Após a condensação, a água é transferida novamente para o ciclo através de uma bomba de sucção.

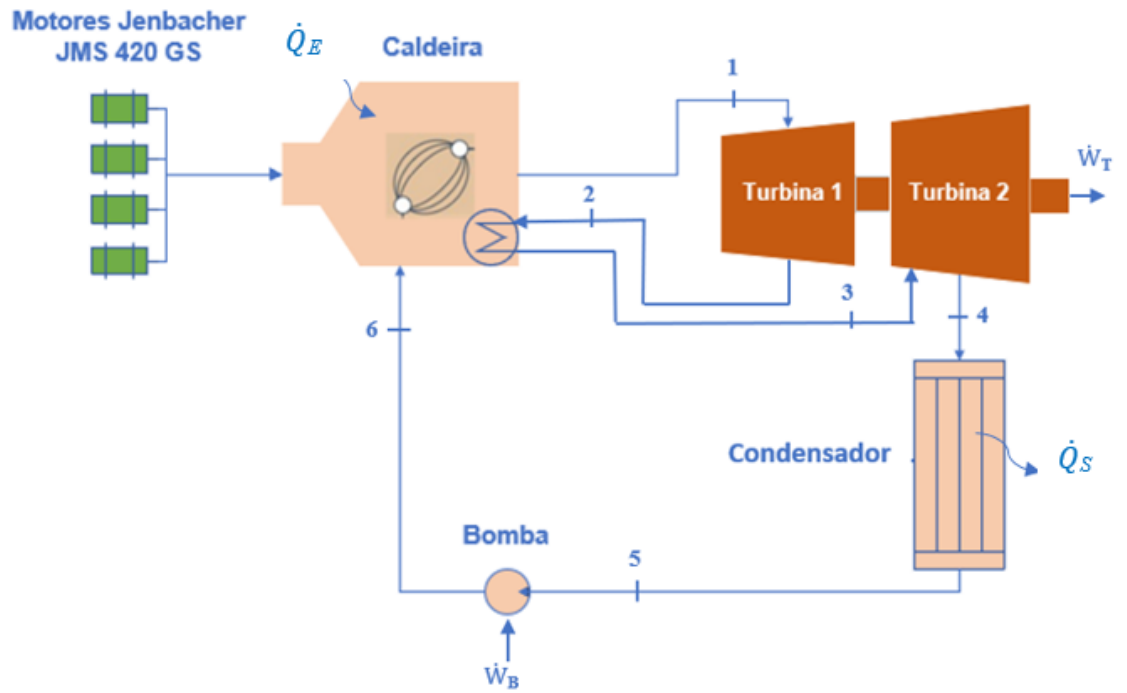


Figura 5.2. Ciclo Rankine com reaquecimento integrado à usina de biogás do ASMJP.
Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, a equação 5.3 é substituída pela equação 5.4, que representa o ciclo Rankine com reaquecimento.

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{turbina\ 1} + \dot{W}_{turbina\ 2} - \dot{W}_{bomba} \quad (5.4)$$

A Tabela 5.3 representa a aplicação da PLT para cada volume de controle estudado referente à Figura 5.2. $\dot{W}_{t1}$ e $\dot{W}_{t2}$ representam respectivamente a potência nas turbinas 1 e 2.

Tabela 5.3. Balanço de energia de cada dispositivo do ciclo Rankine com reaquecimento

Dispositivo	Balanço de energia
Caldeira	$\frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{m}} = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)$
Turbina 1	$\frac{\dot{W}_{turbina\ 1}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$
Turbina 2	$\frac{\dot{W}_{turbina\ 2}}{\dot{m}} = h_3 - h_4$
Bomba	$\frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{m}} = h_6 - h_5$
Condensador	$\frac{\dot{Q}_{condensador}}{\dot{m}} = h_4 - h_5$

Fonte: Autoria própria (2022).

Para o caso do ciclo Rankine regenerativo, seguindo a Figura 5.3, a regeneração é efetuada por meio de um aquecedor de água de alimentação. O vapor entra na turbina de primeiro estágio no estado 1 e se expande até o estado 2, onde é extraída uma fração de escoamento total para o aquecedor de água de alimentação. O restante do vapor se expande através da turbina no segundo estágio até o estado 3. Esta parcela é condensada para líquido saturado, no estado 4. Em seguida é bombeada até a pressão de extração, e introduzida no aquecedor no estado 5. Uma única corrente misturada deixa o aquecedor no estado 6. E, finalmente, o líquido é bombeada para o estado 7, e entra em contato com a caldeira resultando nas condições do estado 1.

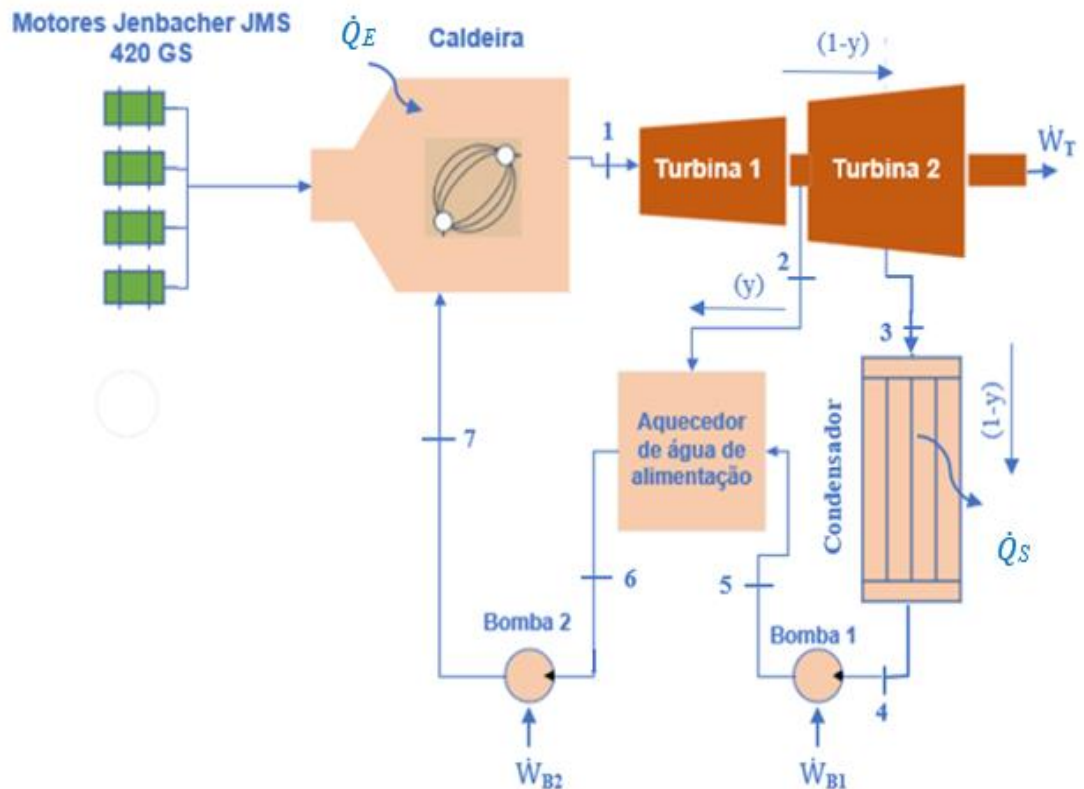


Figura 5.3. Ciclo Rankine regenerativo integrado à usina de biogás do ASMJP.
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5.4 representa a aplicação da PLT para cada volume de controle estudado referente à Figura 5.3. A fração do escoamento total extraído no estado 2 é determinada por y (representada pela aplicação dos princípios de conservação da massa e de energia ao volume de controle no entorno do aquecedor de água de alimentação).

Tabela 5.4. Balanço de energia de cada dispositivo do ciclo Rankine regenerativo

Dispositivo	Balanço de energia
Caldeira	$\frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{m}} = h_1 - h_7$
-	$y = (h_6 - h_5)/(h_2 - h_5)$
Turbina	$\frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) + (1 - y) * (h_2 - h_3)$
Bomba	$\frac{\dot{Q}_{bomba}}{\dot{m}} = (h_7 - h_6) + (1 - y) * (h_5 - h_4)$
Condensador	$\frac{\dot{Q}_{condensador}}{\dot{m}} = (1 - y) * (h_3 - h_4)$

Fonte: Autoria própria (2022).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5.5 mostra os valores de pressão (P), entalpia (h), entropia (s), volume específico (v) e temperatura (T) para cada ponto do sistema representado na Figura 5.1, considerando as eficiências isentrópicas da turbina e da bomba. A Tabela 5.6 mostra os resultados do balanço de energia (PLT). De acordo com a Tabela 5.6, $\dot{W}_{\text{líquido}}$ representa a potência total do ciclo. Ou seja, a potência da turbina menos a potência da bomba. E η representa o rendimento energético do ciclo considerando as perdas isentrópicas do sistema.

Tabela 5.5. Propriedades termodinâmicas para cada ponto do ciclo Rankine básico.

Fluxo	P (kPa)*	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	v (m ³ /kg)	T (°C)
1	8000	3310,0	6,608	-	465
2	8	2191,0	-	-	-
3	8	173,9	0,5925	0,0010	-
4	8000	182,8	-	-	-

Fonte : EES (2022).

*(TRAN e VAKKILAINNEN, 2008 ; MORAN *et al.*, 2014).

Tabela 5.6. Resultados para o balanço de energia dos equipamentos do ciclo Rankine básico.

$\dot{Q}_{\text{caldeira}}$ m (kJ/kg)	$\dot{Q}_{\text{bomba}}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{\text{turbina}}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{\text{líquido}}$ m (kJ/kg)	η (%)
3128	8,955	1119	1110	35,50

Fonte : EES (2022).

A Tabela 5.7 mostra os valores de pressão (P), entalpia (h), entropia (s), volume específico (v) e temperatura (T) para cada ponto do sistema representado na Figura 5.2, considerando as eficiências isentrópicas da turbina e da bomba. A Tabela 5.8 mostra os resultados do balanço de energia (PLT). $\dot{W}_{\text{Turbina 1}}$ e $\dot{W}_{\text{Turbina 2}}$ representam respectivamente a potência das turbinas 1 e 2. $\dot{W}_{\text{líquido}}$ representam a potência total do ciclo. Dada pela soma da potência das duas turbinas, menos a potência da bomba. E η representa o rendimento energético do ciclo considerando as perdas isentrópicas do sistema.

Tabela 5.7. Propriedades termodinâmicas para cada ponto do ciclo Rankine com reaquecimento

Fluxo	P (kPa)*	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	v (m ³ /kg)	T (°C)
1	8000	3310,0	6,608	-	465
2	700	2778,0	-	-	-
3	700	3353,0	7,757	-	440
4	8	2521,0	-	-	-
5	8	173,9	0,5925	0,0010	-
6	8000	182,8	-	-	-

Fonte : EES (2022).

*(TRAN e VAKKILAINNEN, 2008 ; MORAN *et al.*, 2014).

Tabela 5.8. Resultados para o balanço de energia dos equipamentos do ciclo Rankine com reaquecimento

$\dot{Q}_{caldeira}$ m (kJ/kg)	$\dot{Q}_{bomba}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{turbina\ 1}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{turbina\ 2}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{líquido}$ m (kJ/kg)	η (%)
3702	8,955	531,9	832,3	1355	36,61

Fonte : EES (2022).

A Tabela 5.9 mostra os valores de pressão (P), entalpia (h), entropia (s), volume específico (v) e temperatura (T) para cada ponto do sistema representado na Figura 5.3, considerando as eficiências isentrópicas da turbina e da bomba. A Tabela 5.10 mostra os resultados do balanço de energia (PLT). $\dot{W}_{líquido}$ representa a potência total do ciclo. Ou seja, a potência das turbinas menos a potência das bombas, e η representa o rendimento energético do ciclo considerando as perdas isentrópicas do sistema. Para o estado no ponto 2, a temperatura de saturação de vapor superaquecido é de aproximadamente 165°C (referente a $P_2=700$ kPa) (MORAN *et al.*, 2014). Portanto, foi estimado uma temperatura superior a este valor, de 220°C, para efeito de cálculo.

Tabela 5.9. Propriedades termodinâmicas para cada ponto do ciclo Rankine regenerativo

Fluxo	P (kPa)*	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	v (m ³ /kg)	T (°C)
1	8000	3310,0	6,608	-	465
2	700	2778,0	6,976	-	220
3	8	2242,0	-	-	-
4	8	173,9	0,5925	0,0010	-
5	700	174,6	0,5925		-
6	700	697,4	1,993	0,0011	-
7	8000	706,3	-		-

Fonte : EES (2022)

*(TRAN e VAKKILAINNEN, 2008 ; MORAN *et al.*, 2014).

Tabela 5.10. Resultados para o balanço de energia dos equipamentos do ciclo Rankine regenerativo

$\dot{Q}_{caldeira}$ m (kJ/kg)	$\dot{Q}_{bomba}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{turbina}$ m (kJ/kg)	$\dot{W}_{líquido}$ m (kJ/kg)	y	η (%)
2605	9,606	960,4	950,8	0,2008	36,51

Fonte : EES (2022).

Sabendo que os gases de exaustão advindos dos quatro motores da usina ofertam 31,696 kg/h de biogás pós-combustão, o ciclo Rankine ideal consegue produzir $\dot{W}_{líquido} = 78,18$ kWh/dia, enquanto os ciclos Rankine com reaquecimento e regeneração produzem 95,44 e 66, 97 kWh/dia, respectivamente. Como o foco do trabalho diz respeito somente a produção de energia elétrica, o ciclo Rankine regenerativo apresentou resultados inferiores aos demais (com relação a potência líquida). Porém, para energia térmica este ciclo possui melhor conservação, tendo em vista que as entalpias nos pontos 6 e 7 são maiores que as entalpias nos pontos 6 e 5 (para o arranjo do reaquecimento) e 4 e 3 (para o arranjo básico) dos outros ciclos.

A Tabela 5.11 mostra uma estimativa para a quantidade de energia elétrica produzida para os três ciclos Rankine apresentados neste trabalho. Foi considerado, para efeito de cálculo, que os motores trabalham 8 horas diárias, durante os 365 dias do ano. Para o ciclo Rankine com reaquecimento a potência das duas turbinas foram somadas. A última coluna da direita da Tabela 5.11 representa a soma da energia elétrica produzida pela usina mais a integração dos respectivos ciclos. Sabe-se que o potencial de produção de energia elétrica pela

usina do ASMJP representa 30.000 MWh anuais (ASJA, 2019), e vida útil com oferta de biogás até o ano de 2042 (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Tabela 5.11. Estimativa de produção de energia elétrica para cada ciclo estudado

Ciclo	$\dot{W}_T$ (kWh/ano)	$\dot{W}_{T(USINA)} + \dot{W}_T$ (MWh/ano)	$\dot{W}_{T(USINA)} + \dot{W}_T$ (MWh/ vida útil)
Usina real (sem a integração de um Ciclo Rankine)	-	30.000	600.000
Ciclo Rankine básico	28.537	30.029	600.571
Ciclo Rankine com reaquecimento	34.836	30.035	600.697
Ciclo Rankine regenerativo	25.444	30.026	600.449

Fonte: EES (2022).

Os resultados mostrados na Tabela 5.11 representam valores em que todo o combustível necessário para a produção advém do biogás do aterro, uma fonte renovável de energia. De acordo com os valores obtidos pela simulação realizada no EES, o ciclo Rankine com reaquecimento foi o que obteve a maior produção de energia elétrica dentre todos os analisados. Além de possuir melhor rendimento energético. Portanto, seria o mais recomendado para a integração na usina de biogás do ASMJP.

Existem outras experiências positivas da utilização de biogás de aterro para esquemas energéticos. SARAVIA *et al.* (2012) realizaram uma avaliação técnica e econômica de usinas de ciclo combinado movidas à biogás de aterro sanitário em Monterrey, no México. A proposta, além de aumentar a eficiência energética, traz benefícios ambientais por meio da redução de emissões dos gases do efeito estufa (GEE), com ênfase na reciclagem de produtos reutilizáveis (vidros, metais, papel e plástico). O ciclo combinado proposto é caracterizado pela integração de MCI com ORC. O método com melhor retorno financeiro, econômico e ambiental foi integrar apenas um módulo ORC com 1,5 MW_e de capacidade de produção a 16 módulos MCI. Dessa maneira, a capacidade de geração de eletricidade de 16,94 MW_e passaria para 18,44 MW_e (aumento de 8,9%), gerando 11,24 GWh/ano de eletricidade. O retorno financeiro seria recuperado em menos de oito anos (quando os preços de eletricidade forem superiores a 0,09 US\$/kWh), e após isto haveria obtenção de lucro, possibilitando a venda da energia gerada e armazenada. Além disso, a nova planta evitaria a emissão de 4.159 MT de

CO₂ por ano. CHACARTEGUI *et al.* (2015) avaliaram o potencial de geração de biogás em um aterro localizado em Sevilha, Espanha. Segundo os autores, um motor Jenbacher JMS 420 foi identificado por apresentar melhor integração com a disponibilidade do biogás do estudo. Além disso, também foi avaliado o uso do calor resultante fornecido pelo processo de pós-combustão do motor para acelerar a evaporação do lixiviado, reduzindo os riscos do excedente de chorume. O estudo mostra que a capacidade de biogás capturado é de aproximadamente 65.000 toneladas em 30 anos.

A contribuição deste trabalho em comparação com o estudo de NASCIMENTO *et al.* (2019), é que foi analisado a possibilidade de acoplar um ciclo Rankine para reaproveitar os gases de exaustão do biogás pós combustão. Este trabalho considerou quatro motores modelo Jenbacher JMS 420 (situação real da usina), enquanto o trabalho de NASCIMENTO *et al.* (2019) foi realizado antes da implantação da usina de biogás, e considerou um motor modelo Jenbacher JMS 620 (situação hipotética).

Para estimar os resultados aqui obtidos, foram utilizados valores de pressão e temperatura de Moran *et al.* (2014). Em situações reais, esses valores são substituídos pelos que constam nos manuais dos fabricantes de cada equipamento. A modelagem das equações consta no Apêndice II deste trabalho.

Finalmente, observa-se que ainda existe bastante espaço para trabalhos com esta proposta na literatura científica atual. A utilização do biogás de aterro para fins energéticos e mitigações ambientais mostra-se uma excelente oportunidade para suprir as demandas globais de eletricidade, e diversificar o portfólio da matriz energética global. A integração de um ciclo Rankine às usinas de MCI é uma estratégia para aproveitar os recursos naturais disponíveis, como também amenizar os impactos ambientais derivados das emissões GEE.

No Brasil, já existem outras usinas que utilizam o biogás de aterro para fins energéticos. No município de Sabará, Minas Gerais, existe uma usina com capacidade para produzir 46.000 MWh de energia elétrica por ano, e evitar a emissão na atmosfera de cerca de 380.000 toneladas de CO₂ (ASJA, 2017). Em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, está localizada a maior e mais produtiva planta da empresa no Brasil, com oito motores e produção total de 96.500 MWh por ano de eletricidade (ASJA, 2019).

Como sugestão para estudos futuros, espera-se que a mesma análise de sensibilidade aplicada neste trabalho possa ser expandida para usinas de aterros sanitários que trabalham com mais de quatro motores no aproveitamento energético do biogás. Pois, a quantidade de oferta dos gases de exaustão provavelmente será maior, aumentando consequentemente o

potencial de energia elétrica do sistema. Também pode ser feita uma análise econômica, seguida de uma análise ambiental, para as propostas de ciclos de Rankine integrados à usina de biogás do ASMJP, para verificação da viabilidade e relação custo-benefício.

5.4. CONCLUSÃO

Este trabalho mostra a importância da utilização de fontes renováveis de energia e sua integração energética como uma solução viável para garantir benefícios ambientais, energéticos e econômicos. O biogás resultante de processos bioquímicos em aterros sanitários pode ser aproveitado em processos de motores a combustão interna, como é o caso da usina de biogás no Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa.

Este estudo realizou uma simulação e análise termodinâmica da integração de um ciclo Rankine à usina de biogás do respectivo aterro, reaproveitando os gases de exaustão (biogás pós-combustão), em uma caldeira de recuperação que utiliza água como fluido de trabalho. Todo o vapor gerado é encaminhado para uma turbina para produção de energia elétrica.

A análise termodinâmica de sensibilidade foi feita para três arranjos termodinâmicos diferentes, para fins comparativos. O primeiro foi um ciclo Rankine básico. O segundo representou um ciclo Rankine com reaquecimento. O terceiro um ciclo Rankine regenerativo. Os valores calculados para cada ciclo apresentam rendimentos de aproximadamente: 35,50%, 36,61% e 36,51% respectivamente. No que diz respeito ao ciclo com maior produção de energia elétrica, o ciclo Rankine com reaquecimento demonstrou os melhores resultados. Quando o adicional de energia elétrica resultante da integração do ciclo Rankine com reaquecimento é somado com o potencial da usina de biogás do ASMJP, o valor passaria de 30.000,000 MWh/ano para cerca de 30.034,836 MWh/ano. O ciclo Rankine com reaquecimento sozinho pode produzir cerca de 696,714 MWh de energia elétrica ao longo de toda a vida útil, correspondente ao ano de encerramento das atividades do ASMJP, em 2042. O aproveitamento desses gases de exaustão aumenta a eficiência energética do processo geral, e permite um incremento na exportação de eletricidade. Essa eletricidade adicional pode contribuir para um aumento dos benefícios financeiros, e possui potencial para contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Este estudo pode ser readaptado para outras realidades presentes, comprovando que o uso mais sustentável dos recursos naturais pode ser uma solução extremamente interessante para aumentar a produção de eletricidade e minimizar os danos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASJA, 2017. “Asja continua a crescer no Brasil: Inaugurada nova planta de biogás”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/asja-continua-crescer-no-brasil-inaugurada-nova-planta-de-biogas/>. Acesso: 06 mai. 2022.
- ASJA, 2019. “A planta de biogás de Jaboaão, Brazil, entra em operação”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/a-planta-de-biogas-de-jaboatao-brazil-entra-em-operacao/>. Acesso: Acesso: 06 mai. 2022.
- ASJA, 2019. “João Pessoa: uma nova planta de biogás da asja no Brasil”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/joao-pessoa-uma-nova-planta-de-biogas-da-asja-no-brasil/>. Acesso: 19 abr. 2022.
- BISPO JUNIOR, D. A. B., ABRAHÃO, R., & CARVALHO, M., 2021. “O uso de biogás de matéria orgânica para fins energéticos e mitigação ambiental: uma revisão sistemática.” **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, 2(3), 93-93.
- CHACARTEGUI, R., CARVALHO, M., ABRAHÃO, R., BECERRA, J., 2015. “Analysis of a CHP plant in a municipal solid waste landfill in the South of Spain”. **Applied Thermal Engineering**, 91, 706-717.
- CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R., & STEGMANN, R., 2020. Landfilling of waste: Biogas. CRC Press.
- COLONNA, P., CASATI, E., TRAPP, C., MATHIJSEN, T., LARIOLA, J., TURUNEN-SAARETI, T., & UUSITALO, A., 2015. “Organic Rankine cycle power systems: from the concept to current technology, applications, and an outlook to the future”. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 137(10).
- DANTAS, G. A., LEGY, L. F., & MAZZONE, A., 2013. “Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 21, 356-364.
- DRESCHER, U., & BRUGGEMANN D., 2007. “Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants”. **Applied thermal engineering**, 27(1), 223-228.
- EMLUR, 2021. “Seplan e Emlur acompanham estudos para aumentar vida útil do aterro sanitário”. Disponível em: <https://www.joaopessoa.pb.gov.br/noticias/secretarias-e-orgaos/seplan-e-emlur-acompanham-estudos-para-aumentar-vida-util-do-aterro-sanitario/>. Acesso 22 de julho de 2021.

- ENGINEERING EQUATION SOLVER, 2022. Disponível em: <https://fchartsoftware.com/ees/>. Acesso: 31 mar. 2022.
- GHAFFARPOUR, Z., MAHMOUDI, M., MOSAFFA, A. H., & FARSHI, L. G., 2018. “Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle, solid oxide fuel cell and Rankine cycle”. **Energy conversion and management**, 161, 1-12.
- GHODBANE, M., & HUSSEIN, A. K., 2021. Performance analysis of a solar-driven ejector air conditioning system under El-Oued climatic conditions, Algeria. **Journal of Thermal Engineering**, 7(1), 172-189.
- JENBACHER GAS ENGINES, 2012. “Technical Description Genset-Container. JMS 420 GS-L.L”. Disponível em: <https://vdocuments.mx/j420-gs-ll-container.html>. Acesso: 09 mai. 2022.
- LEGISLAÇÃO MUNICIPAL DE JOÃO PESSOA/PB, 1991. “Lei Nº 6811, de 04 de novembro de 1991”. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/pb/j/joao-pessoa/lei-ordinaria/1991/681/6811/lei-ordinaria-n-6811-1991-altera-a-natureza-juridica-da-empresa-municipal-de-limpeza-urbana-emlur-e-determina-outras-providencias-correlatas-e-complementares>. Acesso: 19 out. 2021.
- LI, G., (2016a). “Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part I: Energy and exergy performance evaluation”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 53, 477-499.
- LI, G., (2016b). “Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part II: Economic assessment aspect”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 64, 490-505.
- LUCAS, J. F. R., *et al.*, 2010. “Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu – PR”. XIII Congresso de Engenharia Química. 2010. Disponível em: <https://xdocs.com.br/doc/cobeq-biogas-final-corrigido-vqoewex572o6>. Acesso: 26 maio 2021.
- MAGO, P. J., *et al.*, 2008. “An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids”. **Applied thermal engineering**, 28(8-9), 998-1007.
- MORAN M. J., SHAPIRO H. N., BOETTNER D. D., BAILEY M. B., 2014. “Princípios de Termodinâmica para Engenharia”, LTC Editora: 7ª edição, Rio de Janeiro.

- NASCIMENTO, D. P., MENEZES, V. L., CARVALHO, M., & CHACARTEGUI, R., 2019. "Energy analysis of products and processes in a sanitary landfill". **IET Renewable Power Generation**, 13(7), 1063-1075.
- PALACIO, J. C. E., SANTOS, J. J. C. S., RENÓ, M. L. G., JÚNIOR, J. C. F., CARVALHO, M., REYES, A. M. M., & OROZCO, D. J. R., 2019. "Municipal solid waste management and energy recovery". **Energy Conversion-Current Technologies and Future Trends**.
- PERALTA-YAHYA, P. P., ZHANG, F., DEL CARDAYRE, S. B., & KEASLING, J. D., 2012. "Microbial engineering for the production of advanced biofuels". **Nature**, 488(7411), 320-328.
- QUOILIN, S., *et al.*, 2013. "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems". **Renewable and sustainable energy reviews**, 22, 168-186.
- SARAVIA, J. R., GALAZ, J. R. V., VILLENA, A. C., & ORTIZ, J. N., 2012. "Technical and economical evaluation of landfill-biogas fired combined cycle plants". **Distributed Generation & Alternative Energy Journal**, 27(3), 7-25.
- SILVA, G. A., MORAIS, J. A., & ROCHA, E. R., 2016. "Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos". **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 21, 11-16.
- SOMAYAJI, C., MAGO, P. J., & CHAMRA, L. M., 2006. "Second law analysis and optimization of organic Rankine cycle". In **ASME power conference** (Vol. 42053, pp. 591-596).
- VIJAVARAGHAVAN, S., & GOSWAMI, D. Y., 2005. "Organic Working Fluids for a Combined Power and Cooling Cycle." **ASME. J. Energy Resour. Technol.** 127(2): 125–130.
- TCHANCE, B. F., *et al.*, 2011. "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(8), 3963-3979.
- TRAN, H., & VAKKILAINEN, E. K., 2008. "The kraft chemical recovery process". **Tappi Kraft Pulping Short Course**, 1-8.
- WALKER, L., CHARLES, W., & CORD-RUWISCH, R., 2009. "Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes". **Bioresource technology**, 100(16), 3799-380.

CAPÍTULO VI

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho contribuiu para a realização de estudos teóricos e práticos, de caráter ambiental e termodinâmico. Dessa forma, caracteriza-se pela utilização da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, para quantificar a pegada de carbono associada aos equipamentos e formas de transportes destes, para uma usina de biogás. Também foi utilizado o software *Engineering Equation Solver* (EES) para o cálculo de equações termodinâmicas dos ciclos Rankines propostos.

A primeira parte da dissertação mostra uma revisão sistemática, de caráter qualitativo, sobre as diversas formas de utilização do biogás em escala global. Vários estudos foram identificados na pesquisa, após vários critérios serem adotados. O objetivo foi identificar como o portfólio de matriz energética pode ser diversificado por fontes alternativas e renováveis de energia, e como é importante o tratamento e uso adequado dos recursos naturais. Ao final da pesquisa, 17 artigos foram identificados, preenchendo todos os requisitos exigidos. Foi concluído que o biogás pode ser aproveitado em diversas propostas termodinâmicas e que os resíduos sólidos urbanos gerados devem ser tratados de maneira adequada (desde a coleta, até a destinação final). Sendo assim, propiciando melhores resultados quanto aos ganhos energéticos, ambientais e econômicos.

A segunda parte da dissertação ficou responsável por um estudo de caso na usina de biogás do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa, Paraíba. Foi realizado um inventário de ciclo de vida dos equipamentos que fazem parte da usina. Esta, caracterizada pela utilização de quatro motores à combustão interna. A usina utiliza o biogás resultante do aterro com finalidade energética. Os inventários foram contruídos por visitas técnicas à usina, e consulta de manuais dos fabricantes, identificando o material e massa (kg) de cada equipamento, e as distâncias percorridas dos mesmos (km). Para quantificar as emissões de gases do efeito estufa foi utilizada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, buscando valores para os equipamentos da usina, como também para as suas formas de transportes. O

software *SimaPro* foi aplicado para o cálculo das emissões resultantes, quantificando as respectivas pegadas de carbono. Os resultados finais servem como *benchmarking* na geração de eletricidade com biogás de aterro sanitário, contribuindo para a literatura científica. Como benefício ambiental, quando a reciclagem foi considerada, as emissões globais diminuíram 25%, garantindo a mitigação de impactos ambientais relevantes.

A terceira parte da dissertação mostra uma análise termodinâmica para a integração de um ciclo Rankine à usina de biogás do aterro em estudo. A proposta buscou extrair o máximo potencial energético possível da usina, aproveitando os gases de exaustão do primeiro processo, caracterizado pela combustão do biogás nos quatro motores da usina. Todo o vapor gerado foi encaminhado para uma caldeira de recuperação, que por sua vez, alimenta uma turbina que gera energia elétrica. Uma análise de sensibilidade foi feita para comparar as formas de utilização do ciclo Rankine, mostrando qual processo é o mais vantajoso em termos de rendimento energético e produção de energia elétrica. As equações termodinâmicas foram calculadas com o software EES, mostrando os rendimentos energéticos de cada ciclo. Os valores finais mostraram que dentre os ciclos analisados, aquele que apresentou melhores resultados foi o ciclo Rankine com reaquecimento. Através da sua implementação a usina de biogás do ASMJP, a produção total passaria 30.000,000 MWh/ano para cerca de 30.034,836 MWh/ano. O ciclo Rankine com reaquecimento sozinho pode produzir cerca de 696,714 MWh de energia elétrica ao longo de toda a vida útil, correspondente ao ano de encerramento das atividades do ASMJP, em 2042. Dessa forma, foi observado um aumento na produção de energia elétrica, e diminuição na emissão direta dos gases nocivos ao meio ambiente e consequentemente à saúde humana.

Os resultados obtidos nesta dissertação contribuem para o enriquecimento da literatura científica do tema, através de valores teóricos e práticos garantidos sobre os benefícios da utilização dos recursos naturais de forma mais consciente e sustentável. Espera-se que este trabalho possa somar-se com futuras pesquisas, mostrando a importância das fontes alternativas e renováveis de energia, com o intuito de garantir melhor utilização dos recursos naturais do planeta.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TODA DISSERTAÇÃO

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983. NBR 8419: apresentação de projetos de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1983.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014. Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, Rio de Janeiro.
- ABRELPE- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, 2020. “Panorama de resíduos sólidos no Brasil, 2020”. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso: 18 junho 2021.
- AHMED, S. I., *et al.*, 2015. “Optimal landfill gas utilization for renewable energy production”. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34(1), 289-296.
- ALFAIA, R. G. D. S. M., COSTA, A. M., & CAMPOS, J. C., 2017. “Municipal solid waste in Brazil: A review”. **Waste Management & Research**, 35(12), 1195-1209.
- ALIBABA, 2021. “Filtro de ar do motor de alta qualidade”. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/machinery-engine-parts-high-quality-air-filter-1227732-642705-for-jenbacher-j412-j416-j420-gas-engine-1600209233717.html>. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2015. “RAMP 8. RESOLUÇÃO ANP No 8, DE 30.1.2015 - DOU 2.2.2015”. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>. Acesso: 06 out. 2019.
- APERAM, 2021. Disponível em: https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/Aperam_Inox_Tubos_Brasil-Cat%C3%A1logo_de_Produtos_v2.pdf. Acesso: 30 de novembro de 2021.

- ASJA, 2017. “Asja continua a crescer no Brasil: Inaugurada nova planta de biogás”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/asja-continua-crescer-no-brasil-inaugurada-nova-planta-de-biogas/>. Acesso: 06 mai. 2022.
- ASJA, 2019. “A planta de biogás de Jabotão, Brazil, entra em operação”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/a-planta-de-biogas-de-jaboatao-brazil-entra-em-operacao/>. Acesso: 06 mai. 2022.
- ASJA, 2019. “João Pessoa: uma nova planta de biogás da asja no Brasil”. Disponível em: <https://www.asja.energy/pt-br/noticias/joao-pessoa-uma-nova-planta-de-biogas-da-asja-no-brasil/>. Acesso: 19 abr. 2022.
- BALCAZAR, J. G. C., DIAS, R. A., & BALESTIERI, J. A. P., 2013. “Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities”. **Energy**, 55, 728-741.
- BAUMANN, D.P., 2012. "GE Jenbacher. Power Generation with Biogas and Alternative Gases Using Alternative Engines. XX Edition", **the Green Expo**. 25-27.
- BENETTO, E., *et al.*, 2009. “Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment”. **Science of the total environment**, 407(5), 1506-1516.
- BHARATHIRAJA, B., *et al.*, 2018. Biogas production—A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. **Renewable and sustainable Energy reviews**, 90, 570-582.
- BHASKAR, T. & STEELE, P. H., 2015. “Thermo-chemical conversion of biomass”. **Bioresource Technology** 178: 1.
- BISPO JUNIOR, D. A. B., ABRAHÃO, R., & CARVALHO, M., 2021. “O uso de biogás de matéria orgânica para fins energéticos e mitigação ambiental: uma revisão sistemática.” **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, 2(3), 93-93.
- BLEY JR., C., 2015. “Biogás: a energia invisível”. *2a ed.*, São Paulo: CIBiogas, 2015. 230 p. Disponível em: <https://cibiogas.org/>. Acesso em: 06 out. 2019.
- BRACIER, 2013. “A GE espera gerar 300 MW com a venda de motores a gás até 2016”. Disponível em: <http://www.bracier.org.br/noticias/brasil/4273-ge-preve-geracao-de-300mw-com-venda-de-motores-a-gas-ate-2016.html>. Acesso: 18 de fevereiro de 2022.
- BRASIL, 2010. “Lei Federal nº 12.305 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e faz outras providências”. Diário Oficial da União.
- BOSKOVIC, G. B., *et al.*, 2016. “Co-generation potentials of municipal solid waste landfills in Serbia”. **Thermal Science**, 20(4), 1271-1281.

- BRIGAGÃO, G. V., *et al.*, 2021. “A zero-emission sustainable landfill-gas-to-wire oxyfuel process: Bioenergy with carbon capture and sequestration”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 138, 110686.
- CARNEIRO, D. R. C., 2009. “Viabilidade técnica e económica de uma unidade centralizada de codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos”. (2009). 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Portugal. 2009. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/66701>. Acesso: 27 maio 2021.
- CASA DAS VÁLVULAS, 2021. Disponível em: <https://casadasvalvulasmg.com.br/informacoes-tecnicas/valvulas-bypass/>. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2013. Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>. Acesso em out. 2021.
- CIBIOGAS, 2020. “Biogás no Brasil, história e perspectiva de futuro”. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/>. Acesso: 14 out. 2021.
- CHACARTEGUI, R., CARVALHO, M., ABRAHÃO, R., BECERRA, J., 2015. "Analysis of a solid plant in an urban waste landfill in southern Spain". **Applied Thermal Engineering**. v. 91, pgs. 706-717.
- CHAI, X., TONJES, D. J., & MAHAJAN, D., 2016. “Methane emissions as energy reservoir: context, scope, causes and mitigation strategies”. **Progress in Energy and Combustion Science**, 56, 33-70.
- CHEN, X., GENG, Y., & FUJITA, T., 2010. “An overview of municipal solid waste management in China”. **Waste management**, 30(4), 716-724.
- CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R., & STEGMANN, R., 2020. “Landfilling of waste: Biogas”. *CRC Press*.
- COLONNA, P., CASATI, E., TRAPP, C., MATHIJSEN, T., LARIOLA, J., TURUNEN-SAARETI, T., & UUSITALO, A., 2015. “Organic Rankine cycle power systems: from the concept to current technology, applications, and an outlook to the future”. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137(10).
- COSTA, A. M., ALFAIA, R. G. D. S. M., & CAMPOS, J. C., 2019. “Landfill leachate treatment in Brazil—An overview”. *Journal of environmental management*, 232, 110-116.

- COSTI, P., *et al.*, 2004. “An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management”. *Waste management*, 24(3), 277-295.
- COVIC, G. A., & BOYS, J. T., 2013. “Modern trends in inductive power transfer for transportation applications”. **IEEE Journal of Emerging and Selected topics in power electronics**, v. 1, n. 1, p. 28-41, 2013.
- DANG, Y., *et al.*, 2016. “Impact of fulvic acids on bio-methanogenic treatment of municipal solid waste incineration leachate”. **Water Research**, 106, 71-78.
- DA SILVEIRA, F. L., 2009. Motores térmicos escolhidos internamente pela Otto e Diesel. Instituto de Física da UFRGS. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/arquivos/maqterm.pdf>. Acesso: 13 de outubro de 2021.
- DANTAS, G. A., LEGY, L. F., & MAZZONE, A., 2013. “Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 21, 356-364.
- DE BERTOLDI, M., VALLINI, G., PERA, A., 1983. “The biology of composting: a review”. **Waste Management and Resource**, v. 1, nº 2, p. 157-176, 1983.
- DEUS, R. M.; BATTISTELLE, A. G.; SILVA, G. H. R., 2015. “Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências”. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.20, n.4, p.685-698, 2015.
- DONOVAN, S. M., BATESON, T., GRONOW, J. R., & VOULVOULIS, N., 2010. Modelling the behaviour of mechanical biological treatment outputs in landfills using the GasSim model. **Science of the total environment**, 408(8), 1979-1984.
- DRESCHER, U., & BRUGGEMANN D., 2007. “Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants”. **Applied thermal engineering**, 27(1), 223-228.
- ECOINVENT, 2019. “A base de dados ecoinvent 3.6”. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/>. Acesso: 25 de abril de 2022.
- EC-JRC - JOINT RESEARCH CENTRE OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2010. Analysis of existing Environmental Impact Assessment Methodologies for use in Life Cycle Assessment - background document. ILCD Handbook – International Reference Life Cycle Data System, European Union.
- EMLUR, 2021. “Seplan e Emlur acompanham estudos para aumentar a vida útil do aterro”. Disponível em: <https://www.joaopessoa.pb.gov.br/noticias/secretarias-e>

- orgaos/seplan-e-emlur-acompanham-estudos-para-aumentar-vida-util-do-aterro-sanitario/. Acesso: 22 de julho de 2021.
- EMUN, F., *et al.*, 2010. “Integrated gasification combined cycle (IGCC) process simulation and optimization”. **Computers & chemical engineering**, 34(3), 331-338.
- ENGINEERING EQUATION SOLVER, 2022. Disponível em: <https://fchartsoftware.com/ees/>. Acesso: 31 mar. 2022.
- GALLEGO, A., KUBO, H., GUTIERREZ-GOMEZ, A. C., BERECHÉ, R. P., NETO, A. P. & ROCHA, A. D., 2019. “Thermodynamic analysis of behaviour in a combined cycles operating with biogas and municipal solid waste”. **International Journal of Thermodynamics**, 22(2), 74-82.
- GHAFFARPOUR, Z., MAHMOUDI, M., MOSAFFA, A. H., & FARSHI, L. G., 2018. “Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle, solid oxide fuel cell and Rankine cycle”. **Energy conversion and management**, 161, 1-12.
- GHODBANE, M., & HUSSEIN, A. K., 2021. Performance analysis of a solar-driven ejector air conditioning system under El-Oued climatic conditions, Algeria. **Journal of Thermal Engineering**, 7(1), 172-189.
- GOEDKOOPE, M. *et al.*, 2008. “A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level” ReCiPe, v. 1, p. 1-126, 2009.
- GOMES, L. P., *et al.*, 2015. “Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem”. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 20, nº.3, Rio de Janeiro.
- HIDRAMACO, 2010. “Soluções de Qualidade em Ferro Fundido”. Disponível em: https://www.hidramaco.com.br/Catalogo_Hidramaco.pdf. Acesso: 20 de outubro de 2021.
- IEA- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2019. “Relatório de status de energia global de CO₂”. “As últimas tendências em energia e emissões em 2018”. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>. Acesso: 18 junho 2021.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2021. “Climate change 2021: the foundation of physical science. Contribution of Working Group I to

- the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”. AR6 report. Cambridge (United Kingdom): Cambridge University Press, 2021
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2022. “Derived methods derived from the Kyoto protocol and good practice guidelines”. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>. Access: April 25, 2022.
- ISLU – ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE DA LIMPEZA URBANA, 2018. Disponível em: <<https://selur.org.br/wp-content/uploads/2018/12/ISLU-2018.pdf>>. Acesso em 22 de dez. de 2020.
- JENBACHER GAS ENGINES, 2012. “Technical Description Genset-Container. JMS 420 GS-L.L”. Disponível em: <https://vdocuments.mx/j420-gs-ll-container.html>. Acesso: 09 mai. 2022.
- JENBACHER GAS ENGINES, 2022. "Technical specification. JMS 420 GS-B.L". Available at: <https://pdf4pro.com/view/technical-specification-cogeneration-com-ua-529c7.html>. and https://www.clarke-energy.com/wp-content/uploads/ETS_E_T4_update13_rz.pdf. Access: October 20, 2021.
- JOLLIET, O., *et al*, 2003. “IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology”. **The international journal of life cycle assessment**, 8(6), 324-330.
- KIEFFER, M., BROWN, T., & BROWN, R. C., 2016. “Flex fuel polygeneration: Integrating renewable natural gas into Fischer–Tropsch synthesis”. **Applied Energy**, 170, 208-218.
- KONDUSAMY, D., & KALAMDHAD, A. S., 2014. “Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production–A review”. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2(3), 1821-1830.
- KOTAS, T. J., 1985. “Teaching The Exergy Method To Engineers”. In **Teaching Thermodynamics** (pp. 373-385). Springer, Boston, MA.
- KUMAR, A., & SHARMA, M. P., 2014. “GHG emission and carbon sequestration potential from MSW of Indian metro cities”. **Urban climate**, 8, 30-41.
- LEGISLAÇÃO MUNICIPAL DE JOÃO PESSOA/PB, 1991. “Lei N° 6811, de 04 de novembro de 1991”. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/pb/j/joao-pessoa/lei-ordinaria/1991/681/6811/lei-ordinaria-n-6811-1991-altera-a-natureza-juridica-da-empresa-municipal-de-limpeza-urbana-emlur-e-determina-outras-providencias-correlatas-e-complementares>. Acesso: 19 out. 2021.

- LI, G., (2016a). “Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part I: Energy and exergy performance evaluation”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 53, 477-499.
- LI, G., (2016b). “Organic Rankine cycle performance evaluation and thermoeconomic assessment with various applications part II: Economic assessment aspect”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 64, 490-505.
- LEITE, V. D., et al., 2014. “Bioestabilização anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos: aspectos quantitativos”. **Tecnológica**, v. 18, n. 2, p. 90-96, 2014.
- LUCAS, J. F. R., MARAN, M. A., FRARE, L. M., 2010. “Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu – PR”. XIII Congresso de Engenharia Química. 2010. Disponível em: <https://xdocs.com.br/doc/cobeq-biogas-final-corregidovqoewex572o6>. Acesso: 26 de maio. 2021.
- MAGO, P. J., et al., 2008. “An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids”. **Applied thermal engineering**, 28(8-9), 998-1007.
- MARCHEZETTI, A. L., et al., 2011. “Application of the AHP method for the ranking of alternatives for the treatment of household solid waste”. **Built Environment**, 11(2), 173-187.
- MARTINS, W. A., 2017. “Avaliação do ciclo de vida do programa de coleta seletiva no município de João Pessoa-PB, Brasil”. Dissertação (Dissertação em engenharia civil e ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.
- MARVITUBOS, 2017. “Tabela de Medição de Tarugos de Ferro Fundido”. Disponível em: https://www.marvitubos.com.br/imagem_texto/_20170808_165252_tabela-ferro-fundido.pdf. Acesso: 20 de outubro de 2021.
- MILANI, M., MONTORSI, L., & STEFANI, M., 2014. An integrated approach to energy recovery from biomass and waste: Anaerobic digestion–gasification–water treatment. **Waste management & research**, 32(7), 614-625.
- MELO, F. M., SILVESTRE, A., & CARVALHO, M., 2019. “Carbon footprints associated with electricity generation from biomass syngas and diesel”. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, 18(7).
- MERSONI, C., & REICHERT, G. A., 2017. “Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS”. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 22, 863-875.

- MONTAÑO, M., *et al.*, 2012. “Integração de critérios técnicos, ambientais e sociais em estudos de alternativas locais para implantação de aterro sanitário”. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, p. 61-70, 2012.
- MORAES, L. C. R., *et al.*, 2015. “Processo Pirólise Para Decomposição Do Lixo Urbano”. **Revista Pesquisa e Ação**. 2015, vol. 1, n. 1.
- MORAN M. J., SHAPIRO H. N., BOETTNER D. D., BAILEY M. B., 2014. Princípios de Termodinâmica para Engenharia, LTC Editora: 7ª edição, Rio de Janeiro.
- MORIN, P., MARCOS, B., MORESOLI, C., & LAFLAMME, C. B., 2010. “Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada”. **Applied energy**, 87(1), 275-283.
- MOTTA, W. H., 2013. Análise do ciclo de vida e logística reversa. X SEGeT.
- MOURAD, A. L., GARCIA, E. E., VILHENA, A., 2022. “Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações”. Campinas: Cetea/Cempre. 2002. 92 p.
- NASCIMENTO, D. P., MENEZES, V. L., CARVALHO, M., & CHACARTEGUI, R., 2019. “Energy analysis of products and processes in a sanitary landfill”. **IET Renewable Power Generation**, 13(7), 1063-1075.
- NASCIMENTO, V. F., *et al.*, 2015. “Desenvolvimento e desafios na gestão de resíduos sólidos urbanos brasileiros”. **Interdisciplinary Journal of Applied Science**, 10(4), 889-902.
- NETL, 2013. “Analysis of natural gas-to liquid transportation fuels via Fischer– Tropsh”. Washington, DC: U.S. DOE; 2013.
- NIDONI, P. G., 2017. “Incineration Process for Solid Waste Management and Effective Utilization of By Products”, **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 4, n. 12, pp. 378-382.
- NISKANEN, A., *et al.*, 2013. Enhancing landfill gas recovery. **Journal of Cleaner Production**, 55, 67-71.
- NOVELLI, V., *et al.*, 2019. “Biomass Exploitation for Energy Supply and Quality Compost Production. An Exemplary Case or Circular Economy in the Northeast of Italy”. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, 18(10).
- OLIVEIRA F. S. J., JUCÁ F. T. J., 2004. “Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos”. **Eng. Sanitária Ambiental**. 9:211-7.

- ONU BRASIL, 2018. “A humanidade produz mais de 2 bilhões de toneladas de lixo por ano, Dia Mundial da ONU”. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/humanidade-produz-mais-de-2-bilhoes-de-tonladas-de-lixo-porano-diz-onu-em-dia-mundial/>. Acesso: 27 de mai. 2019.
- ONU BRASIL, 2022. “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável”. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso: 22 de abr. de 2022.
- ORNELAS-FERREIRA, B., *et al.*, 2020. “Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro-Brazil”. **Renewable Energy**, 146, 1976-1983.
- PALACIO, J. C. E., SANTOS, J. J. C. S., RENÓ, M. L. G., JÚNIOR, J. C. F., CARVALHO, M., REYES, A. M. M., & OROZCO, D. J. R., 2019. “Municipal solid waste management and energy recovery”. *Energy Conversion-Current Technologies and Future Trends*.
- PASSUELLO, A. C. B., *et al.*, 2014. “Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida dos Impactos Ambientais de Materiais de Construção em Análise: Estudo de Caso Alternativo da Pegada de Carbono do clínquer”. **Ambiente construído**, 14(4), 7-20.
- PERALTA-YAHYA, P. P., ZHANG, F., DEL CARDAYRE, S. B., & KEASLING, J. D., 2012. “Microbial engineering for the production of advanced biofuels”. **Nature**, 488(7411), 320-328.
- PEREIRA, A. S., *et al.*, 2018. “Metodologia da pesquisa científica”. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf. Acesso: 18 junho 2021.
- PETRESCU R. V., *et al.*, 2018. “The dynamics of the otto engine”. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, 11(1), 273-287.
- PIÑAS, J. A. V., *et al.*, 2016. “Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb)”. **Revista Brasileira de Estudos de População**, 33, 175-188.
- PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ESTADO DA PARAÍBA, 2009. Disponível em: <https://paraiba.pb.gov.br/diretas/secretaria-de-infraestrutura-dos-recursos-hidricos-e-do-meio-ambiente/arquivos/pers-pb-plano-estadual-residuos-solidos-pb-2014.pdf>. Acesso 04 out. 2021.

- QUOILIN, S., *et al.*, 2013. “Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems”. **Renewable and sustainable energy reviews**, 22, 168-186.
- RASI, S., *et al.*, 2007. “Trace compounds of biogas from different biogas production plants”. **Energy**, 32(8), 1375-1380.
- RIBEIRO, H., BESEN, G. R., 2006. “Panorama da coleta seletiva no Brasil: Desafios e perspectivas a partir de três estudos de caso”. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**.
- RUBIO-ROMERO, J. C., ARJONA-JIMÉNEZ, R., & LÓPEZ-ARQUILLOS, A., 2013. “Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste landfills”. **Journal of Cleaner Production**, 55, 84-91.
- SABBAS, A., *et al.*, 2003. “Management of solid waste incineration residues”. **Waste Manage**, v. 23, pp. 61–88.
- SAKAR, S., *et al.*, 2009. “Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment—a literature review”. **Waste management & research**, v. 27, n. 1, p. 3-18, 2009.
- SALOMON, K. R., 2007. “Avaliação Técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade.” Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1721>. Acesso: 27 maio 2021.
- SARAVIA, J. R., *et al.*, 2012. Technical and economical evaluation of landfill-biogas fired combined cycle plants. **Distributed Generation & Alternative Energy Journal**, 27(3), 7-25.
- SILVA, G. A., MORAIS, J. A., & ROCHA, E. R., 2016. “Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos”. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 21, 11-16.
- SNATURAL AMBIENTE, 2017. “Misturadores Estáticos”. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Misturador-Estatico.pdf>. Acesso: 30 de novembro de 2021.
- SOFTWARE SIMAPRO, 2021. Disponível em: www.simapro.nl. Acesso: 25 de abril de 2022.

- SOMAYAJI, C., MAGO, P. J., & CHAMRA, L. M., 2006. “Second law analysis and optimization of organic Rankine cycle”. In **ASME power conference** (Vol. 42053, pp. 591-596).
- STOCKMANN, A. J., CAETANO, M. O., GOMES, L. P., 2016. “Análise de ciclo de vida da destinação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos: codigestão anaeróbia, digestão anaeróbica e aterros sanitários”. In: **7º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre, RS. Anais. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/51>. Acesso: 27 maio 2021.
- SOUSA, S. R., 2008. “Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida”. Dissertação (Mestrado), Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008, 87 p.
- TARAZONA, C. F., 2010. “Estimativa da Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos”. Dissertação (Dissertação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- TALYAN, V., DAHIYA, R. P., & SREEKRISHNAN, T. R., 2008. “State of municipal solid waste management in Delhi, the capital of India”. **Waste management**, 28(7), 1276-1287.
- TCHANCE, B. F., *et al.*, 2011. “Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles—A review of various applications”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(8), 3963-3979.
- THANOPOULOS, S., *et al.*, 2020. Analysis of alternative MSW treatment technologies with the aim of energy recovery in the municipality of Vari-Voula-Vouliagmeni. **Waste and Biomass Valorization**, 11(4), 1585-1601.
- TRAN, H., & VAKKILAINEN, E. K., 2008. “The kraft chemical recovery process”. Tappi Kraft Pulping Short Course, 1-8.
- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2016. “Energy Project Development Handbook”. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-11/documents/pdh_full.pdf. Acesso em: 12 out. 2021.
- VAN ELK, A. G. H. P., 2007. “Redução de Emissões na Disposição Final”. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado aos resíduos sólidos. Disponível em:

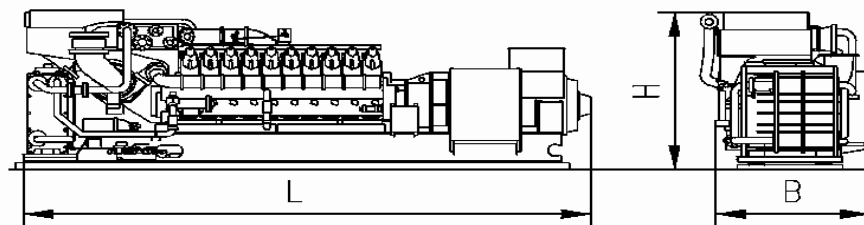
https://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/03-aterro_md1_1.pdf. Acesso: 15 de abril de 2022.

- VÉLEZ, F., *et al.*, 2012. "A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation". **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16(6), 4175-4189.
- VIGON, B. W., *et al.*, 1993. "Life Cycle Assessment: Inventory Principles and Guidelines", EPA/600/R-92/245, Cincinnati, US Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- VIJAVARAGHAVAN, S., & GOSWAMI, D. Y., 2005. "Organic Working Fluids for a Combined Power and Cooling Cycle." **ASME. J. Energy Resour. Technol.** 127(2): 125–130.
- WAITE, R., 1995. "Household waste recycling". London: Earthscan Publications.
- WALKER, L., CHARLES, W., & CORD-RUWISCH, R., 2009. Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes. **Bioresource technology**, 100(16), 3799-380.
- WEILAND, P., 2010. "Biogas production: current state and perspectives". **Applied microbiology and biotechnology**, 85(4), 849-860.
- WU, C., 2004. "Thermodynamic cycles: auxiliary computer design and optimization". New I.I.: New York: M. Dekke.
- ZHOU, H., *et al.*, 2014. "Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics". **Journal of the Air & Waste Management Association**, 64(5), 597-616.

APÊNDICE I

Manual do motor Jenbacher JMS 420 GS-B.L

Grupo Gerador



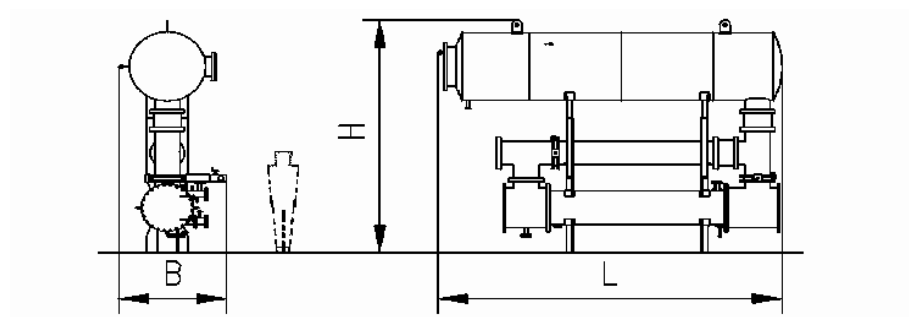
Dimensões e pesos principais (valor aproximado)

Comprimento L	mm	7.100
Largura B	mm	1.900
Altura H	mm	2.200
Peso vazio	kg	14.700
Peso cheio	kg	15.400

Conexões (no grupo gerador)

Entrada e saída de água da jaqueta	DN/PN	100/10
Saída de gases de escape	DN/PN	300/10
Gás combustível (no trem de gás)	DN/PN	100-150/16
Conexão de água do intercooler:		
Circuito de baixa temperatura	DN/PN	65/10

Módulo de Recuperação de Calor



Dimensões e pesos principais (valor aproximado)

Largura B	mm	1.800
Altura H	mm	4.158
Comprimento L	mm	5.600

Conexões (no módulo de recuperação de calor)

Entrada e saída de água quente	DN/PN	100/10
Saída de gases de escape	DN/PN	300/10
Drenagem de condensado	DN/PN	50/10
Linha de drenagem	½"	½"

APÊNDICE II

Modelagem no EES

Ciclo Rankine básico:

```

P_caldeira = 8000;
P_condensador = 8;
{ Caldeira (saída)}
P_1 = P_caldeira;
T_1 = 738;
h_1 = Enthalpy(Water;T=T_1;P=P_1)
s_1 = Entropy(Water;T=T_1;P=P_1)
{ Turbina (saída)}
P_2 = P_condensador;
s_2s = s_1;
s_l2s = Entropy(Water;x=0;P=P_2)
s_v2s = Entropy(Water;x=1;P=P_2)
s_lv2s = s_v2s-s_l2s;
x_2s = (s_2s-s_l2s)/s_lv2s;
nt = 0,9;
h_l2s = Enthalpy(Water;x=0;P=P_2)
h_v2s = Enthalpy(Water;x=1;P=P_2)
h_lv2s = h_v2s-h_l2s;
h_2s = h_l2s+(x_2s*h_lv2s);
h_2 = h_1-nt*(h_1-h_2s);
{ Condensador (saída)}
P_3 = P_condensador;
x_3 = 0;
h_3 = Enthalpy(Water;x=0;P=P_3)
v_3 = 1/Density(Water;x=0;P=P_3)
s_3 = Entropy(Water;x=0;P=P_3)
{ Bomba (saída)}
P_4 = P_caldeira;
nb = 0,9;
w_bomba = v_3*(P_4-P_3)/nb;
h_4 = w_bomba+h_3;

```

```

{Calores e Trabalhos}
q_caldeira = h_1 - h_4;
w_turbina = h_1 - h_2;
w_líquido = w_turbina - w_bomba;
{Rendimento}
N = w_líquido/q_caldeira;

```

Ciclo Rankine com reaquecimento:

```

P_caldeira = 8000;
P_2 = 700;
P_condensador = 8;
{ Primeira saída da caldeira}
P_1 = P_caldeira;
T_1 = 738;
h_1 = Enthalpy(Water;T=T_1;P=P_1);
s_1 = Entropy(Water;T=T_1;P=P_1);
{ Turbina 1(saída)}
s_2s = s_1;
s_l2s = Entropy(Water;x=0;P=P_2);
s_v2s = Entropy(Water;x=1;P=P_2);
s_lv2s = s_v2s-s_l2s;
x_2s = (s_2s-s_l2s)/s_lv2s;
nt = 0,9;
h_l2s = Enthalpy(Water;x=0;P=P_2);
h_v2s = Enthalpy(Water;x=1;P=P_2);
h_lv2s = h_v2s-h_l2s;
h_2s = h_l2s+(x_2s*h_lv2s);
h_2 = h_1-nt*(h_1-h_2s);
{ Segunda saída da caldeira}
P_3=P_2;
T_3 = 713;
h_3=Enthalpy(Water;T=T_3;P=P_3);
s_3=Entropy(Water;T=T_3;P=P_3);
{ Turbina 2(saída)}
P_4 = 8;
s_4s = s_3;
s_l4s = Entropy(Water;x=0;P=P_4);
s_v4s = Entropy(Water;x=1;P=P_4);
s_lv4s = s_v4s-s_l4s;
x_4s = (s_4s-s_l4s)/s_lv4s;

```

```

h_l4s = Enthalpy(Water;x=0;P=P_4);
h_v4s = Enthalpy(Water;x=1;P=P_4);
h_lv4s = h_v4s-h_l4s;
h_4s = h_l4s+(x_4s*h_lv4s);
h_4 = h_3-nt*(h_3-h_4s);
{ Condensador (saída)}
P_5 = 8;
x_5 = 0;
h_5 = Enthalpy(Water;x=x_5;P=P_5)
v_5 = 1/Density(Water;x=x_5;P=P_5)
s_5 = Entropy(Water;x=x_5;P=P_5)
{ Bomba (saída)}
P_6 = P_caldeira;
nb = 0,9;
w_bomba = v_5*(P_6-P_5)/nb;
h_6 = w_bomba+h_5;
{Calores e Trabalhos}
q_caldeira = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2);
w_turbina_1= h_1 - h_2;
w_turbina_2= h_3 - h_4
w_líquido = w_turbina_1 + w_turbina_2 - w_bomba;
{Rendimento}
N = w_líquido/q_caldeira;

```

Ciclo Rankine regenerativo

```

P_caldeira = 8000;
P_6 = 700;
{ Caldeira (saída)}
P_1 = P_caldeira;
T_1= 738;
h_1 = Enthalpy(Water;T=T_1;P=P_1)
s_1 = Entropy(Water;T=T_1;P=P_1)
{ Turbina 1(saída)}
s_2s = s_1;
s_l2s = Entropy(Water;x=0;P=P_2);
s_v2s = Entropy(Water;x=1;P=P_2);
s_lv2s = s_v2s-s_l2s;
x_2s = (s_2s-s_l2s)/s_lv2s;

```

```

nt = 0,9;
h_l2s = Enthalpy(Water;x=0;P=P_2);
h_v2s = Enthalpy(Water;x=1;P=P_2);
h_lv2s = h_v2s-h_l2s;
h_2s = h_l2s+(x_2s*h_lv2s);
h_2 = h_1-nt*(h_1-h_2s);
{ Turbina 2(saída)}
T_2 = 493;
P_2 = 700;
s_2 = Entropy(Water;T=T_2;P=P_2)
P_3 = 8;
s_3s = s_2;
s_l3s = Enthalpy(Water;x=0;P=P_3);
s_v3s = Enthalpy(Water;x=1;P=P_3);
s_lv3s = s_v3s-s_l3s;
x_3s = (s_3s-s_l3s)/s_lv3s;
h_l3s = Enthalpy(Water;x=0;P=P_3);
h_v3s = Enthalpy(Water;x=1;P=P_3);
h_lv3s = h_v3s-h_l3s;
h_3s = h_l3s+(x_3s*h_lv3s);
h_3 = h_2-nt*(h_2-h_3s);
{ Condensador (saída)}
P_4 = 8;
x_4 = 0;
h_4 = Enthalpy(Water;x=x_4;P=P_4);
v_4 = 1/Density(Water;x=x_4;P=P_4);
s_4 = Entropy(Water;x=x_4;P=P_4);
{ Bomba 1 (saída)}
P_5 = P_6;
s_5 = s_4;
h_5 = h_4 + v_4*(P_5-P_4)/(nt);
{ Bomba 2(saída)}
x_6 = 0;
h_6 = Enthalpy(Water;x=x_6;P=P_6);
v_6 = 1/Density(Water;x=x_6;P=P_6);
s_6 = Entropy(Water;x=x_6;P=P_6);
P_7 = 8000;
h_7 = h_6 + v_6*(P_7-P_6)/(nt);
{ Calores e Trabalhos}
y = (h_6-h_5)/(h_2-h_5);
q_caldeira = (h_1 - h_7);
w_turbina = (h_1-h_2)+(1-y)*(h_2-h_3);
w_bomba = (h_7-h_6)+(1-y)*(h_5-h_4);
w_líquido = w_turbina-w_bomba;
{Rendimento}
N = w_líquido/q_caldeira;

```