



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica

Mestrado – Doutorado

**ANÁLISE EXERGONOMICA E EXERGOAMBIENTAL DE
UM SISTEMA DE TRIGERAÇÃO USANDO GÁS NATURAL E
EXTENSÃO PARA O USO DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO**

Por

André Filipe Mendes Alves

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para a obtenção
do grau de Doutor*

ANDRÉ FILIPE MENDES ALVES

**ANÁLISE EXERGONOMICA E EXERGOAMBIENTAL DE
UM SISTEMA DE TRIGERAÇÃO USANDO GÁS NATURAL E
EXTENSÃO PARA O USO DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO**

Tese de Doutorado apresentada ao
programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba em cumprimento às
exigências para a obtenção do Grau de
Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A474a Alves, André Filipe Mendes.

ANÁLISE EXERGONOMICA E EXERGOAMBIENTAL DE UM
SISTEMA DE TRIGERAÇÃO USANDO GÁS NATURAL E EXTENSÃO PARA
O USO

DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO / André Filipe Mendes
Alves. - João Pessoa, 2020.

161 f.

Orientação: Carlos Antônio Cabral dos
Santos. Tese (Doutorado) - UFPB/Tecnologia.

1. Biogás.Gás
Natural.Exergonomia.Exergoambiental. I. Santos,
Carlos Antônio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

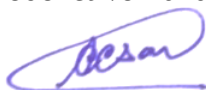
**ANÁLISE EXERGONOMICA E EXERGOAMBIENTAL DE
UM SISTEMA DE TRIGERAÇÃO USANDO GÁS NATURAL E
EXTENSÃO PARA O USO DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO**

Por

André Filipe Mendes Alves

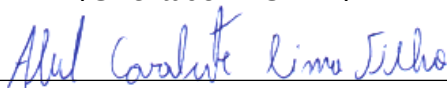
Tese de Doutorado apresentado em

Período letivo 2020.1



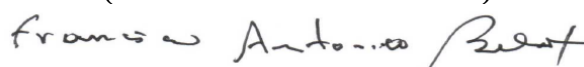
Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

(Orientador – UFPB)



Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

(Examinador Interno – UFPB)



Prof. Dr. Francisco Antônio Belo

(Examinador Interno – UFPB)



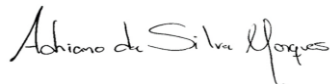
Prof. Dr. Álvaro Antônio Villa Ochoa

(Examinador Externo – IFPE)



Prof. Dr. Laurivan da Silva Diniz

(Examinador Externo – IFPB)



Prof. Dr. Adriano da Silva Marques

(Examinador Externo – UFRPE)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, com muito amor, aos meus pais, Deusimar Alves Sarmento e Rejane Vale Mendes Sarmento, e a meus irmãos, Sílvia Mendes Alves e Rodrigo Mendes Alves, que sempre estão ao meu lado me dando forças, alegrias e amor incondicional. Também dedico a minha esposa, Thaís Ionara dos Santos Rodrigues, ao meu cunhado, o Eng. Alysson Luiz Gouveia e a minha amável sobrinha, Laura Alves Gouveia, pelo companheirismo, compreensão e amor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Deusimar e Rejane, e aos meus irmãos Sílvia e Rodrigo pelas preciosas orientações.

À minha esposa, Thais, pelo amor e carinho e ao meu cunhado, Alysson, pelos conselhos técnicos e força..

Ao professor Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos, por orientar e compartilhar seu extraordinário conhecimento, a todo o momento, tornando possível a realização desse trabalho.

Ao Eng. Abdon pela enorme e crucial ajuda no transporte dos tanques de gás natural e de biogás, usando para isso o seu carro particular.

Ao sr. Osvaldo por prestar consultoria técnica, de forma gratuita, relacionada à construção do banco de cargas elétricas.

A empresa FOXX HAZTEC pela compreensão e por permitir as visitas técnicas ao aterro sanitário de João Pessoa e a coleta do biogás.

Ao Eng. Johnson, do aterro sanitário de João Pessoa, por toda ajuda e por ter desburocratizado todas as atividades deste estudo no aterro, graças a sua sensibilidade de entender as dificuldades financeiras e técnicas enfrentadas durante a realização de um estudo experimental em uma universidade pública no Brasil.

Ao Eng. Carlos, da empresa FOXX HAZTEC, por ter permitido e até auxiliado na coleta do biogás.

Aos amigos do Laboratório de Cogeração, que me ajudaram e guiaram nas atividades técnicas desempenhadas. Em especial, o aluno de graduação em Engenharia Mecânica, Cláudio, que sempre se fez presente.

Ao Laboratório de Cogeração por ter me oferecido condições para desenvolvimento deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo fornecimento da bolsa de pós-graduação, possibilitando uma dedicação exclusiva.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelos serviços prestados e oportunidade de desenvolver este trabalho.

ANÁLISE EXERGEOCONOMICA E EXERGOAMBIENAL DE UM SISTEMA DE TRIGERAÇÃO USANDO GÁS NATURAL E EXTENSÃO PARA O USO DO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

RESUMO

Este trabalho teve por objetivos a produção das análises energética, exergoeconômica e exergoambiental de um sistema de trigeração usando gás natural. Também foram objetivos deste trabalho a realização de testes experimentais, nesse mesmo sistema de trigeração, usando biogás oriundo do aterro sanitário de João Pessoa. O gás natural, cuja queima é vista como limpa, e o biogás oriundo de aterros sanitários, surgem como possíveis fontes de energia para o Brasil, ao considerar a geração de energia elétrica por meio de grupos geradores, devido ao potencial energético e por atenderem aos apelos ambientais. Além da produção de energia elétrica, os grupos geradores liberam grandes quantidades de calor através dos gases de escape do motor de combustão interna, as quais, por meio de um sistema de trigeração, podem ser recuperadas para gerar frio e calor. As análises referentes aos resultados experimentais do sistema de trigeração usando gás natural mostraram que: o rendimento térmico do motor de combustão interna atinge 36,3%; quanto maior a relação ar-combustível fornecida ao motor, maior será o rendimento térmico e menor serão os níveis de emissões; os custos exergéticos encontrados da eletricidade gerada foi de 39,937 R\$/h, do frio foi de 7,075 R\$/h e do calor foi de 1,89 R\$/h; a taxa de impacto ambiental calculada do gás natural foi de 2,52 Pts/h, da geração de energia elétrica 2,49 Pts/h, do frio 0,16 Pts/h e do calor 0,001 Pts/h. Os testes experimentais usando biogás do aterro sanitário de João Pessoa – PB no sistema de trigeração revelaram que: o sistema requer instalações de um sistema eletrônico capaz de controlar a vazão de biogás ao motor e de um sistema de controle da rotação do motor. As estimativas, obtidas através das simulações usando o método *LandGem* e dos resultados experimentais, mostraram que a produção máxima de eletricidade, frio e calor pelo acontecerá no ano de 2029.

Palavras-chave: Biogás. Gás Natural. Exergoeconomia. Exergoambiental. Trigeração.

EXERGoeCONOMIC AND EXERGoeENVIRONMENTAL ANALYSIS OF A TRIGERATION SYSTEM USING NATURAL GAS AND EXTENSION FOR THE USE OF LANDFILL BIOGAS

ABSTRACT

The objective of this work was to carry out energy, exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of a trigeneration system using natural gas. Also, the work aims to perform experimental tests using biogas from the landfill in João Pessoa - PB in the same trigeneration system. Natural gas, whose flaring is seen as clean, and biogas from landfills, appear as possible sources of energy for Brazil, when considering the generation of electric energy through generator sets, due to the energy potential and for meeting the environmental appeals. In addition to the production of electrical energy, the generator sets release large amounts of heat through the exhaust gases of the internal combustion engine, which, through a trigeneration system, can be recovered to generate cold and heat. The analyzes referring to the experimental results of the trigeneration system using natural gas showed that: the thermal efficiency of the internal combustion engine reaches 36.3%; the higher the air-fuel ratio supplied to the engine, the higher the thermal efficiency and the lower the emission levels; the exergetic costs found for the electricity generated was 39.937 R \$ / h, for cold it was 7.075 R \$ / h and for heat it was 1.89 R \$ / h; the calculated environmental impact rate of natural gas was 2.52 Pts / h, electricity generation 2.49 Pts / h, cold 0.16 Pts / h and heat 0.001 Pts / h. Experimental tests using biogas from the sanitary landfill in João Pessoa - PB in the trigeneration system revealed that: the system requires installations of an electronic system capable of controlling the flow of biogas to the engine and a system for controlling engine speed. The estimates, obtained through simulations using the LandGem method and the experimental results, showed that the maximum production of electricity, cold and heat will happen in the year 2029.

Keywords:Biogas.Natural Gas. Exergoeconomic. Exergoenvironmental. Trigeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Transformação do movimento alternado do pistão em movimento rotativo.	33
Figura 2. 2 - Ilustração dos motores aspirados (A) e turboalimentados (B).	34
Figura 3. 1 – Fluxograma usado para caracterização e classificação dos resíduos sólidos.	42
Figura 3. 2 - Geração de resíduos sólidos per capita no mundo.	44
Figura 3. 3 – Regiões do Brasil com seus respectivos índices de cobertura de coleta. ..	45
Figura 3. 4 – Disposição de resíduos sólidos em uma célula de um aterro sanitário.	48
Figura 3. 5 – Sequência de processos na decomposição anaeróbica.	50
Figura 3. 6 – Interface de apresentação do LandGem 3.02.	53
Figura 4. 1 – Vista aérea das células do aterro sanitário da região metropolitana de João Pessoa – PB.	55
Figura 4. 2 – Formas das células invertida e convencional.	56
Figura 4. 3 – Área de pesagem dos caminhões.	57
Figura 4. 4 – Coleta do biogás do aterro estudado.	58
Figura 4. 5 – Sistemas de coleta, (A), e compressão, (B), do biogás.	59
Figura 4. 6 – Sistemas de limpeza e compressão, e queimador.	60
Figura 4. 7 – Grupos geradores cabinados.	60
Figura 5. 1 – Ilustração de uma turbina a gás.	65
Figura 5. 2 – Exemplo de valores dos ecoindicadores.	69
Figura 6. 1 – Grupo gerador da Leon Heimer S/A.	73
Figura 6. 2 – Quadro de transferência de cargas.	74
Figura 6. 3 – Estrutura de acionamento das cargas.	74
Figura 6. 4 – Painel do grupo gerador Leon Heimer.	75
Figura 6. 5 – Refrigerador por absorção conectado ao escapamento do grupo gerador.	76
Figura 6. 6 – Princípio de funcionamento do refrigerador por absorção.	76

Figura 6. 7 – Usina de biodiesel.	78
Figura 6. 8 – Trocador de calor da usina de biodiesel instalado no escapamento do grupo gerador Leon Heimer.	79
Figura 6. 9 – Instalação completa do grupo gerador Leon Heimer, refrigerador por absorção e o trocador de calor da usina de biodiesel.	80
Figura 6. 10 – Os tanques de armazenamento de gás natural, os reguladores de fluxo e pressão e a válvula controladora da vazão de gás natural.	81
Figura 6. 11 – Válvula de bloqueio.....	81
Figura 6. 12 – Sistema de captação e armazenamento para biogás.	82
Figura 6. 13 – O tubo de Venturi usado neste trabalho.....	83
Figura 6. 14 – Banco de cargas.....	86
Figura 6. 15 – Quadro de comando do banco de cargas.	87
Figura 6. 16 – Esquema elétrico da ligação das resistências elétricas.	88
Figura 6. 17 – O analisador de gases.	89
Figura 6. 18 – Termopares.	90
Figura 7. 1 - Esquema do sistema de trigerção.	93
Figura 7. 2 - Volumes de controles usados no desenvolvimento das equações exergoeconômicas.....	96
Figura 8. 1 – Dados de entrada referente ao ano de abertura e fechamento do aterro sanitário de João Pessoa – PB.....	108
Figura 8. 2 – Entrada de dados relativos a geração do metano no método LandGem.	108
Figura 8. 3 – Entrada de dados relacionados aos gases de interesse deste trabalho.	109
Figura 8. 4 – Dados correspondentes a quantidade de resíduo sólidos recebida pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB ao longo dos anos.....	109
Figura 9. 1 – Sistema de captação e armazenamento de biogás instalado no aterro sanitário.	114
Figura 9. 2 – Chama do biogás do aterro sanitário de João Pessoa.	114
Figura 9. 3 – O sistema de captação e armazenamento de biogás sendo transportado.	115
Figura 9. 4 – Válvula controladora manual e sistema de fornecimento com biogás. ...	116
Figura 9. 5 – Novo misturador biogás e ar e o corpo borboleta.	117
Figura 9. 6 – Estimativa da produção de biogás e metano do aterro sanitário de João Pessoa-PB usando o método LandGem 3.02.....	134
Figura 9. 7 – Estimativa da geração de metano considerando as eficiências de coleta de 50 e 90%.....	135

Figura 9. 8 – Estimativa da produção de energia elétrica.	136
Figura 9. 9 – Capacidade de produção de frio considerando uma eficiência de coleta de biogás de 50 e 90%.	137
Figura 9. 10 – Capacidade de produção de calor considerando uma eficiência de coleta de biogás de 50 e 90%.	138
Figura 9. 11 – Distâncias entre a URE do aterro sanitário, aeroporto e o distrito industrial.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Composição do gás natural.	38
Tabela 3. 1 - Composição do biogás.	50
Tabela 4. 1 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do aterro da região metropolitana de João Pessoa.	56
Tabela 5. 1 – Exemplo de equações obtidas ao se utilizar o princípio P.	67
Tabela 6. 1 – Especificações técnicas do grupo gerador Leon Heimer.	73
Tabela 6. 2 – Principais características do refrigerador por absorção.	77
Tabela 6. 3 – Valores de coeficientes de descarga.	85
Tabela 7. 1 - Dados de entrada no cálculo dos custos exergéticos.	100
Tabela 7. 2 - Dados de entrada na ACV.	103
Tabela 7. 3 - Valores de impactos ambientais.	103
Tabela 9. 1 – Os dados experimentais.	112
Tabela 9. 2 – Parâmetros de desempenho do grupo gerador Leon Heimer usando gás natural como combustível.	119
Tabela 9. 3 – Parâmetros de funcionamento do sistema de trigeração.	119
Tabela 9. 4 – Parâmetros do sistema de trigeração.	126
Tabela 9. 5 – Custos específicos e exergéticos ao longo da unidade de trigeração.	127
Tabela 9. 6 – Os parâmetros exergoeconômicos do sistema de trigeração.	128
Tabela 9. 7 – Os custos associados aos produtos do sistema de trigeração.	130
Tabela 9. 8 – Os valores dos produtos utilizando meios convencionais.	131
Tabela 9. 9 – Os indicadores ambiental específico e as taxas de impacto ambiental. ..	131
Tabela 9. 10 – Os parâmetros exergoambientais do sistema de trigeração.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
Especiais	
ACV	Análise do ciclo de vida
$B_{D,k}$	Destruição de exergia no componente k
B_j	Taxa de impacto ambiental do componente j
b_j	Ecoindicador 99 específico do componente j
C_e	Taxa de custo associado a entrada
C_s	Taxa de custo associado a saída
C_w	Taxa de custo associado a geração de potência
C_q	Taxa de custo associado a transferência de calor
c_s	Custo médio por unidade de exergia na saída
c_e	Custo médio por unidade de exergia na entrada
c_w	Custo médio por unidade de exergia associado a geração de
potência	
c_q	Custo médio por unidade de exergia associado a transferência de
calor	
c_p	Custo específico do produto
c_f	Custo específico do combustível
C_p	Custo do produto
C_f	Custo do combustível
Calor	Quantidade de calor produzido
Cdm	Consumo mássico de combustível
CHCP	<i>Combined Heat, Cooling, and Power</i>
D_1	Diâmetro da seção transversal no ponto 1
D_2	Diâmetro da seção transversal no ponto 2
E_e	Exergia total na entrada
E_s	Exergia total na saída

E_q	Energia em forma de calor
Elet	Quantidade de energia elétrica gerada
Frio	Quantidade de frio gerado
$f_{b,k}$	Fator exergoambiental GO – Goiás
h	Diferença de altura do fluido manométrico no tubo em U
HC	Hidrocarbonetos
i	Incremento de tempo (anual)
ICE	Ignição por Centelha
j	Incremento de tempo (anual)
k	Taxa de geração de metano por ano
L_0	Capacidade potencial de geração de metano
$\dot{m}_e$	Vazão mássica na entrada
$\dot{m}_s$	Vazão mássica na saída
M_i	Quantidade, em massa, de resíduos depositados no ano i
n	Resultado da diferença entre o ano do cálculo e o ano em que o aterro começou a operar
ONU	Organizações das Nações Unidas
PB	Paraíba
PCI _d	Poder calorífico inferior do combustível
PCI _{metano}	Poder calorífico inferior do metano
PE	Potência elétrica gerada
pH	Potencial hidrogeniônico
PR	Paraná
Q	Vazão de combustível
Q_{bio}	Quantidade de metano gerado no aterro
Q_{ch4}	Geração de metano no ano
r_k	Diferença relativa de custo
$r_{b,k}$	Diferença relativa do ecoindicador
SC	Santa Catarina
sfco	Consumo específico de combustível
t_{ij}	Idade da seção j da massa M_i depositada no ano i
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
URE	Unidade de recuperação energética
Y_k	Impacto ambiental do componente k

Y^{CO}	Impacto ambiental na construção do componente k
Y_{OM}^k	Impacto ambiental na operação e manutenção do componente k
Y^{DI}_k	Impacto ambiental no descarte do componente k
Zn^k	Zinco
Z_k	Custos com aquisição, operação, manutenção do componente k
η_o	Rendimento térmico do grupo gerador
η_{coleta}	Eficiência da coleta do biogás no aterro sanitário
η_{grupo}	Rendimento térmico do grupo gerador
η_{recup}	Eficiência de recuperação de calor do trocador de calor da usina de biodiesel
η_{refrig}	Eficiência de recuperação de calor do refrigerador por absorção
ρ_d	Massa específica do combustível
ρ_m	Massa específica do fluido manométrico λ – Fator lambda

LISTA DE SÍMBOLOS

As	Arsênio
Ag	Prata
Ba	Bário
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
CH ₄	Metano
Co	Cobalto
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
Hg	Mercúrio
H ₂ O	Água
H ₂ S	Gás sulfídrico
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
Pb	Chumbo
Se	Selênio
Sr	Estrôncio
V	Vanádio

Letras Gregas

ε	Eficiência exergetica
ρ	Massa específica
Σ	Somatório

Sobrescritos

.	Taxa ou vazão mássica
CO	Construção
OM	Operação e manutenção
DI	Descarte

Subscrito

D	Destruição de exergia
k	Componente k
j	Componente j
e	Entrada
s	Saída
w	Geração de potência
q	Transferência de calor
p	Produto
f	Combustível
n	Ponto n no sistema de trigerção
0	Estado de referência
1	Localização do ponto 1 no sistema de trigerção
2	Localização do ponto 2 no sistema de trigerção

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	22
INTRODUÇÃO.....	22
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	22
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	25
1.3 OBJETIVO GERAL.....	26
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	26
1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	31
CAPÍTULO II	33
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA E O GÁS NATURAL	33
2.1 INTRODUÇÃO.....	33
2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLO OTTO	33
2.2.1 Indicadores de desempenho dos motores do ciclo Otto.....	35
2.2.1.1 Rendimento térmico.....	35
2.2.1.2 Consumo específico de combustível.....	35
2.2.1.3 Relação ar-combustível e fator lambda (λ)	36
2.2.1.4 Níveis de emissões gasosas	36
2.2.1.5 Eficiência volumétrica	37
2.2.1.6 Pressão média efetiva.....	37
2.3 O GÁS NATURAL	38
2.3.1 Combustão estequiométrica do gás natural.....	39
2.3.2 O uso do gás natural em motores de combustão interna.....	39
CAPÍTULO III.....	41
RESÍDUOS SÓLIDOS E BIOGÁS	41
3.1 INTRODUÇÃO.....	41
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS	41
3.3 GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	44
3.3.2 Descarte dos resíduos sólidos.....	46

3.3.2.1 Destinação dos resíduos sólidos não perigosos	47
3.3.2.2 Aterros sanitários	48
3.4 O BIOGÁS	49
3.4.1 Combustão estequiométrica do biogás	51
3.5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	52
3.5.1 Método LandGem 3.02	52
CAPÍTULO IV	54
ATERRO SANITÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE JOÃO PESSOA	54
4.1 INTRODUÇÃO.....	54
4.2 O ATERRO SANITÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE JOÃO PESSOA	54
4.2.1 As células do aterro sanitário	55
4.2.2 Os resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário	56
4.2.3 Produção, coleta e aproveitamento do biogás do aterro	58
CAPÍTULO V	62
AVALIAÇÃO EXERGONOMICA E EXERGOAMBIENTAL	62
5.1 INTRODUÇÃO.....	62
5.2 AVALIAÇÃO EXERGONOMICA	62
5.2.1 Método SPECO	64
5.2.1.1 O princípio F.....	65
5.2.1.2 O princípio P.....	66
5.3 AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL	67
5.3.1 A avaliação do Ciclo de Vida.....	68
5.3.1.1 Ecoindicador 99.....	68
5.3.2 Balanço exergoambiental.....	69
CAPÍTULO VI.....	72
METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	72
6.1 INTRODUÇÃO.....	72
6.2 A METODOLOGIA EXPERIMENTAL	72
6.2.1 O grupo gerador a gás	72
6.2.2 O Refrigerador por absorção	75
6.2.3 A usina de biodiesel.....	77
6.2.4 O sistema de fornecimento do gás natural	80
6.2.5 O sistema de coleta e armazenamento de biogás.....	81
6.2.6 O sistema de fornecimento de biogás	83

6.2.7 O sistema de medição da vazão de combustível	83
6.2.8 Banco de cargas.....	85
6.2.9 A medição dos níveis das emissões gasosas	88
6.2.10 A medição de temperatura ao longo do sistema de trigeriação	89
6.2.11 A realização dos testes experimentais.....	90
CAPÍTULO VII	92
MODELAGEM TERMOECONÔMICA E AMBIENTAL	92
7.1 INTRODUÇÃO.....	92
7.2 A ANÁLISE ENERGÉTICA.....	92
7.3 A ANÁLISE EXERGONECONÔMICA	95
7.4 A ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL.....	102
CAPÍTULO VIII.....	107
METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, FRIO E CALOR PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA	107
8.1 INTRODUÇÃO.....	107
8.2 A DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA-PB	107
8.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CALOR E FRIO PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA – PB	110
CAPÍTULO IX.....	112
RESULTADOS E ANÁLISES.....	112
9.1 INTRODUÇÃO.....	112
9.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	112
9.2.1 Testes experimentais usando o biogás do aterro sanitário de João Pessoa no sistema de trigeriação	113
9.2.1.1 Coleta e armazenamento do biogás	113
9.2.1.2 Os testes experimentais do sistema de trigeriação usando biogás	115
9.3 ANÁLISE ENERGÉTICA	118
9.4 ANÁLISE EXERGONECONÔMICA.....	125
9.5 ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL	131
9.6 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CALOR E FRIO PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA – PB	134
9.6.1 Possível destinação da geração de eletricidade, de frio e de calor a partir de um sistema de trigeriação instalado no aterro sanitário de João Pessoa – PB.....	138
CAPITULO X	141

CONCLUSÃO	141
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	145
REFERÊNCIAS.....	146
APÊNDICE I – OS CÁLCULOS RELACIONADOS AO PROJETO DO BANCO DE CARGAS DESENVOLVIDO NO LABORATÓRIO DE COGERAÇÃO.....	158
APÊNDICE II – OS CÁLCULOS RELACIONADOS ÀS QUANTIDADES DE CALOR RECUPERADAS PELO REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO E PELO TROCADOR DE CALOR DA USINA DE BIODIESEL.....	160
ANEXO I – VALORES CORRESPONDENTES AS ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, FRIO E CALOR PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA.....	162

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Frente aos desafios da expansão da geração de energia elétrica e da segurança energética, países emergentes, como o Brasil, buscam suprir o aumento da demanda da energia elétrica sem elevar o risco de déficit de energia. Estima-se que no Brasil, entre os anos de 2018 e 2022, o crescimento médio anual do consumo de energia elétrica será de 3,9%. Por outro lado, é constatado que os índices de precipitações se mostram deficitários nas principais bacias dos rios que são responsáveis por gerarem as maiores quantidades de energia elétrica no Brasil.

Tal cenário obriga o Brasil a buscar outras fontes de energia e meios de geração – convencionalmente, os mais usados são as termelétricas a óleo pesado ou óleo diesel – os quais possuem um custo de produção elevado e são consideradas fontes poluidoras do meio ambiente. Esse cenário é comprovado pela aplicação da bandeira tarifária vermelha (maior custo de energia elétrica) na conta de energia dos usuários durante o período de funcionamento das térmicas. Dessa forma evidencia-se a necessidade do Brasil em diversificar seus recursos energéticos em função da irregularidade das hidrelétricas e em desenvolver tecnologias que conciliem menores custos de produção e riscos ambientais.

Nessa perspectiva, o gás natural é um dos combustíveis disponíveis e que possui as características que proporcionam ganhos econômicos e ambientais frente ao uso do diesel em sistemas de geração de energia elétrica (BONDARIK, 2018) . Usualmente, os sistema de geração que utilizam diesel ou gás natural são compostos por um motor de combustão interna e um gerador elétrico (SILVESTRE, 2015). A essa combinação dá-se o nome de grupo gerador.

Tão imprescindível quanto a superação dos desafios supracitados, as soluções dos problemas de gestão ambiental requerem medidas que fortaleçam ainda mais a

relação entre economia, meio ambiente e diversificação das fontes de energia. Visando revigorar esse laço e se sobressair tecnologicamente, diferentes países procuram voltar suas atenções ao desenvolvimento administrativo dos seus aterros sanitários e, conseqüentemente, ao adequado manejo dos resíduos sólidos urbanos. Aterros Sanitários são locais físicos usados para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos (LOPEZ, 2017). De uma maneira geral, os resíduos sólidos urbanos são caracterizados por abranger os resíduos domiciliares (provenientes de residências urbanas), resíduos industriais e os resíduos da limpeza urbana (gerados da varrição de vias públicas e serviços afins).

A importância dada, neste trabalho, aos aterros sanitários, está vinculada ao fato de que os aterros sanitários produzem gases com potencial energético/econômico e causadores do efeito estufa, como o biogás, que tem como principal componente o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (SILVA, 2017).

A produção de biogás em aterros sanitários tem origem na decomposição anaeróbica da matéria orgânica (também conhecida como digestão anaeróbica), que, normalmente, provém de resíduos sólidos urbanos e de efluentes industriais. Resumidamente, a digestão anaeróbica da matéria orgânica é composta por três etapas básicas: hidrólise, fermentação e metanogênese (SILVA, 2015). A sequência dessas etapas é responsável por transformar compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono.

O biogás gerado nos aterros sanitários não pode ser descartado diretamente na atmosfera devido ao seu elevado teor de metano e seu alto potencial danoso como gás causador do efeito estufa (MAGALHÃES, 2018). Logo, são indispensáveis as medidas que diminuam os impactos ocasionado por esse componente.

A forma mais simplória de se evitar os problemas ambientais relacionados ao metano é queimá-lo, de forma direta, no próprio Aterro Sanitário. No entanto, ao usar esse método, os Aterros Sanitários se abdicam de aproveitar o potencial energético do biogás. Ademais o biogás é considerado um combustível de queima limpa, o que lhe confere a propensão de ser uma fonte de energia alternativa aos combustíveis fósseis, e ser de baixo custo.

A principal aplicação do biogás, no tocante ao seu viés energético, é como combustível em um grupo gerador a gás, assim como o gás natural. O motor de combustão interna, usado na geração de energia a gás combustível, é do ciclo de ignição por centelha, pois propicia as melhores condições de fornecimento ao motor de combustão, além de permitir a geração de eletricidade usando apenas o gás (ALVES,

2016).

Em suma, há poucos empreendimentos desse ramo nos estados brasileiros que utilizam biogás como fonte de combustível. No estado da Paraíba, por exemplo, há apenas um projeto, em João Pessoa, relacionado ao aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários, apesar de haver estudos concluídos sobre o potencial de geração de biogás oriundo de aterros sanitários em outras localidades do estado (GUEDES, 2017).

Comumente, o estudo da capacidade de geração de biogás proveniente de aterros sanitários é realizado usando softwares gratuitos e de fácil aplicação, os quais requerem, na maioria dos casos, a entrada de dados a respeito da quantidade de resíduos sólidos urbano produzida por ano e a vida útil do aterro sanitário. A produção de eletricidade dependerá, além da quantidade de biogás produzido, da eficiência da coleta, da composição do biogás e da eficiência do grupo gerador.

De posse da capacidade de geração de energia elétrica do biogás, tem-se a dimensão dos grupos geradores, dos tanques de armazenamento, dos compressores, dos dutos, do espaço físico e de outros equipamentos básicos.

Além desses equipamentos, um sistema de produção de energia elétrica através do biogás exige um sistema de limpeza capaz de retirar impurezas, tais como o gás sulfídrico, H_2S , e o vapor d'água presente no biogás. O principal motivo para o tratamento do biogás está relacionado com a capacidade corrosiva desses componentes, o que pode levar a completa degradação dos equipamentos citados.

Todos esses aspectos podem ser mensurados e avaliados durante testes em uma escala de protótipos utilizando o próprio biogás ou, inclusive, outro tipo de gás combustível, como o gás natural.

Ao ser encaminhado aos grupos geradores, o biogás ou gás natural produz, além de energia elétrica, grandes quantidades de energia térmica que estão presentes nos gases de escape do motor, as quais podem ser reaproveitadas por meio de um processo de cogeração/trigeração.

O conceito de cogeração/trigeração é baseado no sentido de se maximizar o rendimento global de sistemas, reduzindo o consumo de combustíveis e aumentando a produção de energia útil. A Trigeração é denominada por CHCP (*Combined Heat, Cooling, and Power*) e é um processo que produz eletricidade, calor e frio (BICHO, 2018). Normalmente, no processo de trigeração, a produção da energia elétrica se dá graças ao grupo gerador e parte do calor expelido nos gases de escape é usado na produção de frio via refrigeradores por absorção (LOVATI, 2015). O restante do calor é aproveitado

por outro processo, como na geração de vapor.

Dessa forma, o processo de trigeração pode ser uma alternativa técnica viável e economicamente atrativa de se aproveitar o potencial energético dos combustíveis como gás natural e biogás gerado em aterros sanitários, realçando assim, a geração de energia por fontes renováveis e a redução das emissões de poluentes na atmosfera (MARQUES et al., 2020) (SOUZA et al., 2020).

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A substituição do uso de combustíveis fósseis por combustíveis alternativos menos poluentes em sistemas térmicos, como grupos geradores, traz obstáculos técnicos relacionados a engenharia que estão ligados diretamente ao desenvolvimento e promoção de processos sustentáveis.

A procura por soluções provocam o intelecto de cientistas e de pesquisadores de centros de pesquisa, como o Laboratório de Cogeração, que buscam promover a sustentabilidade às sociedades atuais e futuras. O êxito em se obter novas tecnologias, relacionadas a essa temática, geralmente tem natureza convergente com aspectos econômicos, como a geração de emprego, de renda e de melhorias na relação com o meio ambiente.

As descobertas de meios de produção sustentáveis passa, naturalmente, por gradativos estudos de sistemas que envolvem análises que são fundamentais a metodologia do desenvolvimento, como a exergoeconômica, a exergoambiental e a de desempenho, e que serão abordadas neste trabalho.

O Laboratório de Cogeração, do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, tem produzido, ao longo dos anos, pesquisas cuja finalidade é a construção e o aperfeiçoamento de sistemas sustentáveis, assim como são os propósitos deste trabalho. A seguir são descritos alguns dos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Cogeração relacionados à elaboração deste trabalho.

Rocha (2010) analisou o desempenho e os aspectos construtivos de um refrigerador por absorção de duplo efeito em série que usa o par água brometo de lítio e que reaproveita o calor existente nos gases de escape de um motor de combustão interna. Todo o refrigerador por absorção foi desenvolvido no próprio Laboratório de Cogeração e sua idealização não requereu o uso direto de combustível.

Cordeiro (2012) analisou de forma teórica-experimental um protótipo de um

refrigerador por absorção de simples efeito com o par água brometo de lítio como fluido de trabalho. Nesse trabalho o refrigerador foi desenvolvido buscando o uso de gás natural como fonte de energia. Melhorias visando o rendimento térmico do equipamento foram analisadas e propostas.

Neto (2019) comparou metodologias exergoeconômicas aplicado na análise de um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito. Ambos os métodos usados na análise mostraram que o gerador de vapor necessita de otimização.

Portanto, a maior motivação deste trabalho é contribuir, de forma técnica, no desenvolvimento de tecnologias relacionadas à sistemas sustentáveis de geração de energia elétrica, como grupos geradores a biogás de aterro sanitário, propondo adequações técnicas que busquem a otimização e criação desses sistemas e os tornem disponíveis, economicamente e ambientalmente viáveis as cidades do Brasil e em especial as do estado da Paraíba que possuem poucos projetos nessa área.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é a realização da análise exergoeconômica e exergoambiental de um sistema de trigerção usando gás Natural e a extensão para o uso de Biogás, proveniente do aterro sanitário de João Pessoa – PB.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer um levantamento teórico a respeito dos princípios básicos dos motores de combustão interna, do gás natural, dos resíduos sólidos, do biogás e das análises exergoeconômica e exergoambiental;
- Realizar a coleta, armazenamento e transporte do biogás do aterro sanitário para a Universidade Federal da Paraíba (UFPB);
- Realizar testes experimentais utilizando o biogás coletado em um sistema de trigerção do Laboratório de Cogeração buscando identificar as modificações necessárias no sistema para o seu pleno funcionamento usando apenas o biogás;
- Realizar experimentos no mesmo sistema de trigerção usando gás natural como fonte de combustível;
- Desenvolver as análises energética, exergoeconômica e exergoambiental a partir dos resultados obtidos durante os testes experimentais;

- Determinar, usando método *LandGem*, a quantidade de biogás e metano gerados pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB, a partir de dados sobre a deposição dos resíduos sólidos urbanos e
- Determinar, através dos dados experimentais com gás natural, as quantidades de eletricidade, frio e calor que podem ser geradas pelo aterro sanitário de João Pessoa-PB.

1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura realizada neste trabalho buscou levantar alguns dos trabalhos desenvolvidos ao longo dos cinco últimos anos que envolvem os objetivos descritos anteriormente.

Alves (2015) procedeu uma análise exergética em um grupo gerador convertido a gás natural cujo objetivo foi avaliar o desempenho do motor ao se instalar um trocador de calor entre o coletor de escape e o turbocompressor do motor. Os resultados mostraram que a temperatura máxima dos gases de exaustão, de 580 °C, foi alcançada quando o motor desenvolvia a potência máxima, quando o fator λ era 0,91. O máximo rendimento térmico, de 39,1 %, também foi calculado para a potência máxima. O calor retirado dos gases de escape pelo trocador de calor, quando o motor operava à potência máxima, foi igual a 22,3 kW.

Cavalcante (2015) realizou testes experimentais de um sistema de trigerção usando gás natural como combustível e analisou o desempenho do sistema e a qualidade da energia elétrica produzida. Nos resultados desse trabalho esse autor identificou que o rendimento do sistema de trigerção poderia ser aumentado caso a recuperação de calor após o refrigerador por absorção fosse ampliada.

Ochoa et al. (2015) realizaram o estudo que teve por objetivo reduzir o consumo de energia elétrica de um edifício comercial ao se fazer uso de um grupo gerador a gás natural no horário de ponta. Os autores concluíram que durante esse período, o uso do sistema proposto a gás natural fornece ganhos econômicos ao ponto comercial iguais a 20% ao permitir a redução do consumo de energia elétrica oriunda concessionária local.

Xavier (2016) analisou a produção térmica e elétrica de um sistema de cogeração que utiliza um motor de combustão interna a gás considerando três fontes diferentes de combustíveis (gás natural e gás de síntese proveniente da biomassa). Os resultados desse trabalho mostraram que o gás natural proporciona o melhor rendimento térmico do

sistema de cogeração. Em contrapartida, o sistema de cogeração consegue recuperar mais calor proveniente dos gases de escape quando o motor de combustão interna funciona com biogás e gás de síntese. No aspecto econômico e ambiental o biogás é o combustível mais desejável devido ao seu custo de produção ser menor do que o custo de aquisição dos outros combustíveis.

Casarin (2016) estudou a viabilidade econômica, através da análise energética, de um sistema de geração de energia elétrica que usa biogás proveniente de uma planta de geração de biogás instalação em um criadouro de suínos. Com os resultados desse estudo o autor concluiu que o planta de produção de biogás instalada só é viável para uma produção de energia elétrica a partir de 8000 kWh/mês, o que necessita a presença de 2000 suínos em terminação ou 420 matrizes.

Plocoste et al. (2016) usou o método *LandGem* para prever a produção de biogás oriundo de um aterro sanitário de uma ilha no Caribe. Esse estudo também teve por objetivo a comparação dos resultados obtidos pelo métodos *LandGem* com os resultados medidos no aterro sanitário de La Gabarre. Os resultados mostram que a produção de biogás se estende até o ano de 2135, 123 anos após o fechamento do aterro sanitário, em 2012. A máxima produção de biogás estimada foi de 13 milhões de m³ no ano de 2013, um ano após o término das atividades no aterro. A comparação dos resultados mostrou que o *LandGem* estimou uma capacidade de geração 1,94 vezes maior do que o resultado medido no aterro sanitário. Os autores explicaram que essa diferença se deve ao fato de que a determinação da taxa de produção de metano usada no *LandGem* não foi a determinada para o aterro estudado.

Piñas et al. (2016) estimou a produção de biogás e a capacidade de geração de energia elétrica pelo aterro sanitário da cidade de Três Corações, com 80 mil habitantes em Minas Gerais, usando o método *LandGem*. A projeção para produção de biogás durante os 20 anos de vida útil foi de aproximadamente 26 milhões de m³, o que correspondeu a uma capacidade de geração de eletricidade de 128,68 GWh e uma média de 242 kW.

Ochoa et al. (2016) usaram as análises financeira e exergoeconômica para avaliar a viabilidade econômica da produção de energia elétrica, água gelada e água quente por meio de um sistema de cogeração composto por uma turbina a gás natural e um refrigerador por absorção. Os resultados mostraram que, pelo ponto de vista termoeconômico, o sistema é viável devido, principalmente, ao período de retorno de investimento ser de seis anos e pela avaliação positiva do valor presente líquido. No âmbito exergético, as conclusões foram que a água gelada, produzida pelo refrigerador

por absorção, tinha um custo de 0,0109 R\$/kWh e a eletricidade 0,4122 R\$/kWh.

Amini (2017) simulou, também usando o *LandGem*, a produção de biogás do aterro sanitário das cidades rurais das províncias de Chaharmahal, Bakhtiari e Yazd, do Irã. Esse trabalho levou em conta a produção de biogás apenas durante a vida útil do aterro sanitário (2016-2036). De acordo com os resultados, será produzido, em média, 4,6 milhões de m³ de biogás por ano e a máxima produção de biogás se dará um ano após o encerramento das atividades do aterro sanitário.

Bligari (2017) fez uso do *LandGem* para estimar a produção de metano do aterro sanitário das províncias de Sistan e Baluchistan, no Irã. Os resultados apresentaram uma capacidade de produção correspondente a 147 m³ de metano por cada tonelada de resíduo sólido depositado no aterro sanitário das províncias. Também foi evidenciado que, considerando os 20 anos de vida útil para o aterro, a geração média de metano encontrada foi de 3596 m³/h.

Lamidi (2017) analisou a produção de frio e calor a partir da recuperação de energia contida nos gases de escape de um grupo gerador de 72 kWe que faz parte de um sistema de trigeração usando biogás. Esse estudo mostrou que o sistema de trigeração tem capacidade de fornecer frio a 922 armazéns que servem para acomodar produtos agrícolas. Enquanto que a produção de calor é capaz de fornecer energia para secagem de produtos agrícolas em 56 armazéns.

Marques (2018) simulou o funcionamento do mesmo sistema de trigeração usado por Cavalcante (2015) buscando propor melhorias nos equipamentos que compõe o sistema analisado, a partir de análises exergoeconômica e exergoambiental. Através dos resultados e das análises esse autor sugeriu modificações no gerador de vapor, no trocador de calor do absorvedor, condensador e o recuperador de calor do circuito de água da usina de biodiesel.

Rodrigue (2018) projetou a produção de metano, utilizando o método *LandGem*, e a capacidade de geração de energia elétrica da cidade Abidjan, na Costa do Marfim. Esse autor estimou uma produção média de metano equivalente a 79 milhões de m³ por ano, considerando os três anos após o fechamento do aterro sanitário. A capacidade de geração de energia elétrica calculada foi de 23 MWh de energia elétrica usando o biogás do aterro sanitário estudado em grupos geradores a gás.

Llrena (2018) analisou os aspectos energéticos, exergéticos e econômicos de um sistema de cogeração constituído por quatro turbinas a gás e uma caldeira de recuperação de calor, instalada em uma usina de açúcar em São Paulo, cujo objetivo é produzir energia

elétrica e vapor d'água. Os resultados do trabalho apontam que a capacidade de produção de energia elétrica pelo sistema de cogeração da usina chega a 148 MW e de vapor d'água a 147 MW. O rendimento térmico do sistema de cogeração é igual a 67% e o custo para a produção de eletricidade é de 0,105 U\$/kWh e do vapor d'água 0,068 U\$/kWh.

Alcântara (2019) realizou uma análise energética e financeira de um sistema de trigerção que utiliza gás natural como fonte de combustível. O sistema estudado é composto por um motor de combustão interna do ciclo Otto, de um refrigerador por absorção e um recuperador de calor compacto de fabricação nacional. Utilizou-se, também, de uma modelagem termodinâmica do sistema usando o *Engineering Equations Solver* (EES). Esse autor concluiu que a eficiência do sistema de trigerção é superior ao rendimento dos sistemas isoladas, ao apresentar um ganho de rendimento térmico equivalente a 37%.

Dalpaz (2019) procedeu uma análise energética de um grupo gerador que utiliza biogás como fonte de combustível. Buscou-se analisar o efeito da variação da composição do biogás, em termos percentuais de metano, no desempenho do grupo gerador estudado. Os resultados mostraram que para um biogás com 68,54 % de metano, o consumo específico do grupo gerador foi de 2,04 kWh/m³. Quando aumentou-se a concentração de metano no biogás para 83,46% o consumo específico passou a ser de 3,21 kWh/m³. E por último, quando o biogás com 92,33% de metano foi testado no grupo gerador, o resultado calculado do consumo específico saltou para 3,57 kWh/m³.

Rocha (2019) realizou um trabalho que teve por objetivo a aplicação da análise exergoambiental em termelétricas supercríticas e ultrassupercríticas em busca de quantificar a redução dos impactos ambientais quando se usa esses sistemas térmicos. Ao todo foram avaliadas três termelétricas. Os resultados desse estudo apontam que para todas as termelétricas estudadas a caldeira é o componente onde há mais irreversibilidades do sistema. As eficiências exergéticas encontradas foram 35,82%, 37,85% e 41,54% para as termelétricas subcrítica, supercrítica e ultrassupercrítica, respectivamente. Por sua vez, a eletricidade gerada teve um impacto ambiental específico calculado em 41,40 mPts/kWh, para a subcrítica, em 38,90 mPts/kWh, para a supercrítica e em 36,04 mPts/kWh para a ultrassupercrítica.

Andrade (2020) estudou a viabilidade do uso de biocombustíveis (biodiesel B100) como fonte alternativa para aplicação ao sistema de compensação de energia. Durante seus estudos, esse autor construiu um sistema de geração de energia elétrica, cujo principal componente é um grupo gerador de 360 kVA de potência. Nesse trabalho foi

definida uma taxa de energética, em kWh/L, que representa a razão entre a quantidade de energia elétrica gerada pelo consumo volumétrico do biocombustível. A menor taxa energética encontrada em seus resultados e análises foi de 3,89 kWh/L para a potência elétrica de 200 kW.

Cavalcanti et al. (2020) efetuaram uma análise exergoeconômica e exergoambiental de um sistema combinado formado por duas turbinas a gás natural e uma turbina a vapor. A potência gerada pelo sistema combinado é de 397,4 MW com um impacto ambiental específico igual a 13,53 mPt/MJ. Os resultados referentes a avaliação exergoeconômica e exergoambiental também permitiram que os autores identificassem o trocador de calor do gás natural e a bomba d'água do gerador de vapor como os componentes que precisam ter seus rendimentos aumentados para que o desempenho ambiental e econômico do sistema melhore. Uma das recomendações expostas na conclusão do trabalho é que o gás natural usado como fonte de energia no sistema seja substituído por biogás, cujo impacto ambiental é menor.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é composta por oito capítulos onde são abordados os tópicos referentes ao levantamento teórico, materiais e métodos, resultados e conclusões.

No capítulo I são apresentados os argumentos e os conteúdos que estão relacionados com o escopo e justificativa dos assuntos estudados na tese. Encontra-se nesse capítulo a introdução, o objetivos geral e os específicos, motivação do trabalho e o estado da arte.

No 2º capítulo são expostos os conhecimentos básicos teóricos necessários ao entendimento de motores do ciclo Otto. Também são definidos os parâmetros de desempenho mais usados em uma análise desempenho. Por fim são levantados os principais fundamentos referentes ao gás natural usado em grupo geradores.

Os temas que são relativos aos resíduos sólidos e biogás estão no capítulo III. Nesse capítulo estão apresentada s as definições, as classificações, a forma de descarte dos resíduos sólidos, os conceitos a respeito do biogás oriundo de aterros sanitários e o método de estimativa da produção de biogás por um aterro sanitário.

No capítulo IV são discutidos os aspectos relacionados ao aterro sanitário de João Pessoa – PB, que é um dos focos de estudo deste trabalho. Ao longo desse capítulo são descritas as atividades realizadas pelas empresas que administram e fiscalizam o

aterro sanitário, o seu projeto de concepção e de funcionamento.

As noções básicas a respeito das avaliações exergoeconômicas e exergoambientais estão presentes no capítulo V desta tese. Nele são discutidos as principais equações e aspectos que envolvem essas análises.

O capítulo destinado a descrição de materiais e métodos usados durante os testes experimentais é o capítulo VI. Os materiais descritos nesse capítulo estão associados a um sistema de trigeração a gás combustível, composto por um grupo gerador a gás, um refrigerador por absorção e um trocador de calor de uma usina de biodiesel. Enquanto aos métodos apresentados nesse capítulo, estão relacionados com o detalhamento das atividades desenvolvidas nos ensaios experimentais do sistema de trigeração.

No capítulo VII são abordadas as metodologias utilizadas no desenvolvimento das análises energética, exergoeconômica e exergoambiental aplicadas ao sistema de trigeração investigado.

São descritas, capítulo VIII, a metodologia usada na estimativa da produção de energia elétrica, de frio e de calor pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB, ao considerar o uso do biogás no sistema de trigeração examinado.

Os resultados e análises referentes aos resultados experimentais do sistema de trigeração usando gás natural e biogás do aterro sanitário de João Pessoa estão no capítulo IX. Assim como os resultados e análises relacionados a estimativa de produção de energia elétrica, de frio e de calor pelo aterro sanitário de João Pessoa.

No último capítulo, o X, são apresentadas às conclusões que foram obtidas na realização desta tese.

CAPÍTULO II

MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA E O GÁS NATURAL

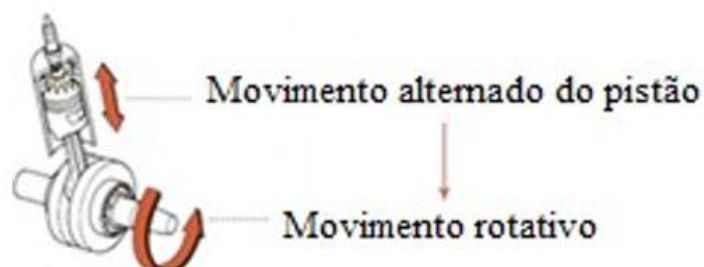
2.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são apresentados os conhecimentos básicos teóricos necessários ao entendimento dos motores de combustão interna do ciclo Otto e de seus parâmetros de desempenho. Destaca-se também neste capítulo as definições fundamentais e características a respeito do gás natural.

2.2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLO OTTO

Os motores de combustão interna do ciclo Otto são máquinas térmicas que produzem energia mecânica de eixo a partir da energia química contida no combustível (WYLEN, 2003). A forma mais habitual de se fazer essa conversão de energia é por meio da configuração dos motores alternativos cuja principal característica é o movimento alternado de um pistão no interior de um cilindro, o qual é transformado em um movimento rotativo por um sistema biela-manivela, ver Fig. 2.1.

Figura 2. 1 - Transformação do movimento alternado do pistão em movimento rotativo.



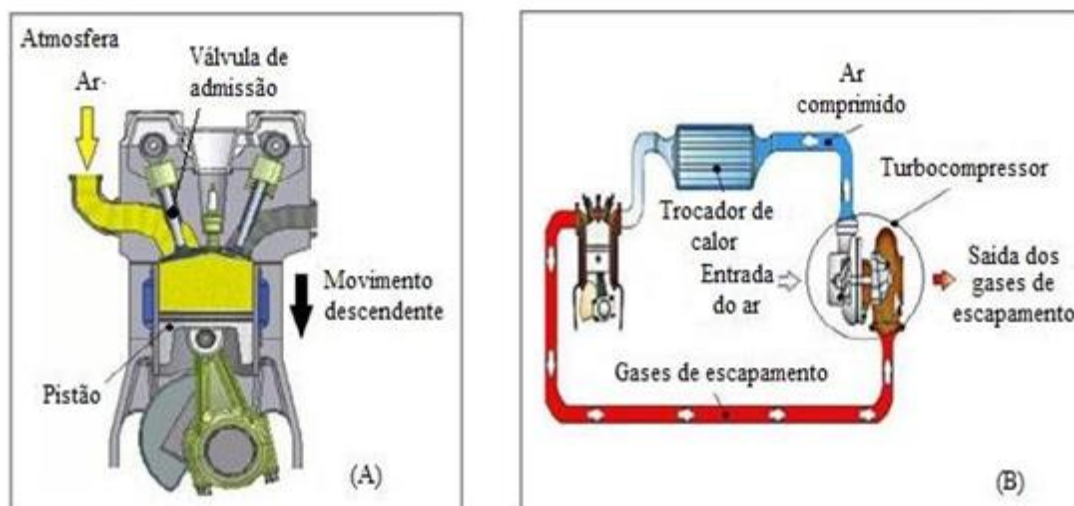
Fonte: Página do blog Fábio Magnani¹.

¹ Disponível em: http://blog.fabiomagnani.com/?page_id=3149.

Também chamados de motores de ignição por centelha (ICE) ou motores à gasolina ou motores a gás, tem o seu funcionamento baseado em um ciclo formado pela sequência de quatro processos básicos: admissão, compressão, expansão/combustão e exaustão. A grande maioria dos motores Otto realiza esses processos em um ciclo de quatro tempos, ou seja, o pistão percorre quatro cursos dentro do cilindro, realizando, em cada tempo, um processo.

O processo de admissão nesses motores pode ocorrer de duas formas. O ar pode ser naturalmente aspirado pelo motor (motores aspirados) ou pode ser insuflado por um turbocompressor (motores turboalimentados), ver Fig. 2.2 (A) e (B). No motor aspirado, o ar é admitido devido à pressão atmosférica e ao movimento descendente do pistão, ver Fig. 2.2 (A). Já no motor turboalimentado, o ar é comprimido por meio de um turbocompressor e encaminhado para dentro do cilindro do motor, ver Fig. 2.2 (B). O turbocompressor usa parte da energia contida nos gases de escape para comprimir e fornecer uma maior quantidade de ar ao motor, ver Fig. 2.2 (B). Antes de ser introduzido no motor, o ar é resfriado em um trocador de calor com intuito de diminuir sua temperatura, pois ao passar pelo turbocompressor, tem sua temperatura elevada, ver Fig. 2.2 (B).

Figura 2. 2 - Ilustração dos motores aspirados (A) e turboalimentados (B).



Fonte: Compilação do autor².

² Montagem a partir de imagens coletadas no site: <http://pt.slideshare.net/Fakiry/motor-de-exploso>

2.2.1 Indicadores de desempenho dos motores do ciclo Otto

De um modo geral, o desempenho dos motores ICE pode ser caracterizado por diversos parâmetros de desempenho. Neste trabalho é dado ênfase aos principais parâmetros de desempenho: rendimento térmico, consumo específico de combustível, relação ar-combustível e fator lambda, emissões gasosas, eficiência volumétrica e a pressão média efetiva (PME).

2.2.1.1 Rendimento térmico

O rendimento térmico dos motores do ciclo Otto é definido pela razão entre a energia produzida e a energia gasta, ou seja, é a relação entre a energia de eixo do motor e a energia liberada durante a combustão (WYLEN, 2003).

Caso o motor do ciclo Otto faça parte de um grupo gerador, considera-se, no cálculo do rendimento térmico, a potência elétrica produzida pelo gerador elétrico como energia produzida. O rendimento térmico do grupo gerador do ciclo Otto é calculado pela Eq. (2.1).

$$\eta_o = \frac{PE}{PCI d * Vol * \rho d} \quad (2.1)$$

Onde η_o é o rendimento térmico do grupo gerador, PE é a potência elétrica gerada, $PCI d$ é o poder calorífico inferior do combustível, Vol é o volume do combustível consumido por unidade de tempo e ρd é a massa específica do combustível.

2.2.1.2 Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível ($bsfc$) de um motor do ciclo Otto é expresso pela razão entre a vazão mássica de combustível (m_{comb}), independente se o combustível é gasoso ou não, e a energia de eixo ou potência elétrica produzida (PE), ver Eq. (2.2).

$$bsfc = \frac{PE}{m_{comb}} \quad (2.2)$$

Esse parâmetro é inversamente proporcional ao rendimento térmico do motor (BRUNETTI, 2012).

2.2.1.3 Relação ar-combustível e fator lambda (λ)

Determinada pela razão entre a massa de combustível e a de ar que estão sendo consumida pelo motor, a relação ar-combustível é um parâmetro essencial do ponto de vista das emissões gasosas e do rendimento térmico do motor (GANESHAN, 2007). A mistura que contém quantidades de ar e combustível suficientes à combustão completa é chamada de mistura estequiométrica ou correta. Mistura com mais combustível do que a correta é denominada de mistura rica, e com menos, de mistura pobre.

O Fator lambda é a razão entre a relação ar-combustível real e a estequiométrica, podendo assumir os seguintes valores (ALVES, 2016):

- $\lambda = 1$, no caso da relação ar-combustível ser estequiométrica;
- $\lambda > 1$, a relação ar-combustível tem excesso de ar, caracterizando uma mistura pobre e
- $\lambda < 1$, a relação ar-combustível tem combustível em demasia, ou seja, uma mistura rica.

O uso de misturas ricas resultará em maiores consumos específicos e menores rendimentos térmicos, por outro lado, a temperatura da combustão é mais baixa, o que evita desgastes excessivos dos órgãos do motor (FILHO, 1991). Do contrário, quando são utilizadas misturas pobres, o rendimento térmico do motor é maior, assim como a temperatura da combustão, provocando superaquecimento a partes do motor (HEYWOOD, 1988). Naturalmente, condições intermediárias de funcionamento são atingidas durante a operação à mistura estequiométrica.

2.2.1.4 Níveis de emissões gasosas

Sabe-se que os motores de combustão interna emitem poluentes na atmosfera devido ao processo de combustão dos combustíveis fósseis, e conforme senso global busca-se reduzir os efeitos negativos associados, diminuindo o uso de combustíveis mais poluentes, como os combustíveis fósseis.

Basicamente, os combustíveis fósseis são formados por hidrocarbonetos que, em um processo de combustão ideal estequiométrica, produzirá apenas CO₂ e H₂O. Dentre os quais, apenas o CO₂ tem efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, nos motores ocorrem processos não ideais, tais como a combustão incompleta, reações entre componentes a alta temperatura e pressão, combustão do óleo lubrificante e combustão de componentes diferentes dos hidrocarbonetos. Logo, nos processos reais de combustão serão incluídos outros tipos de poluentes, e os mais comuns e analisados são: hidrocarbonetos não queimados (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e o dióxido de carbono (CO₂). A concentração de cada poluente vai depender da carga imposta ao motor e da relação ar-combustível que está sendo usada.

2.2.1.5 Eficiência volumétrica

A eficiência volumétrica de um motor natural aspirado relaciona o volume interno dos seus cilindros e sua rotação com o volume de ar/combustível que está sendo consumido pelo motor. Dessa forma, a Eq. (2.3) define a eficiência volumétrica (VolEff) como a razão entre o volume de ar e combustível consumido pelo motor (VarComb) e o volume que o motor é capaz de de succionar.

$$VolEff = \frac{VarComb}{VolMot * \frac{RM}{60} * CicRot} \quad (2.3)$$

O volume succionado pelo motor depende de sua rotação (RM), em RPM, do volume interno dos cilindros ou cilindrada (VolMot), em m³, e da relação entre a quantidade de ciclos por rotação do motor (CicRot).

2.2.1.6 Pressão média efetiva

A capacidade de produzir trabalho por um motor pode ser medida através da pressão média efetiva (PME). A pressão média efetiva é definida pela relação entre a potência desenvolvida pelo motor, a cilindrada e rotação do motor, ver Eq. (2.4).

$$PME = \frac{PE}{VolMot * RM} \quad (2.4)$$

A pressão média efetiva é usada para comparar motores independente dos seus tamanhos.

Sabe-se que os motores de combustão interna necessitam de algum tipo de combustível para o seu pleno funcionamento. Os combustíveis mais usados nos motores do ciclo Otto são a gasolina, o álcool e o gás natural. Neste trabalho apenas os conceitos e características referente ao gás natural são abordadas.

2.3 O GÁS NATURAL

O gás natural é um combustível fóssil, porém possui uma razão hidrogênio/carbono maior do que outros combustíveis derivados do petróleo, o que torna a sua combustão mais limpa do que as fontes de energia convencionais, como gasolina e diesel.

Basicamente, o gás natural é composto por metano, propano, butano e outros gases, ver Tab. 2.1.

Tabela 2. 1 - Composição do gás natural.

Composição média do gás natural da PBGás	%Vol
Metano	90,09
Etano	6,84
Dióxido de Carbono	1,56
Nitrogênio	1,35
Propano	0,16

Fonte: Compilação do autor³

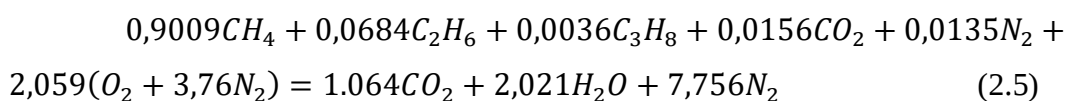
A porcentagem de cada componente, na composição do gás natural, dependerá do processo de produção usado. Em João Pessoa – PB , o fornecimento do gás natural é responsabilidade da Companhia Paraibana de Gás, a PBGas, e a composição do gás natural distribuído está descrita na Tab. 2.1.

³ Tabela retirada do site da PBGas, disponível em: http://www.pbgas.com.br/?page_id=195.

Uma das principais características do gás natural é ter a massa específica menor do que a do ar, o que lhe confere a capacidade de se dissipar, evitando acidentes em caso de vazamento.

2.3.1 Combustão estequiométrica do gás natural

A Eq. (2.5) representa o balanço químico estequiométrico da combustão do gás natural considerando a composição do gás natural fornecido pela PBGas.



De acordo com a equação estequiométrica da combustão do GNV da PBGas, a relação ar-combustível, em base volumétrica, é 9,802, e em base mássica, 15,86.

2.3.2 O uso do gás natural em motores de combustão interna

A aplicação do gás natural em motores de combustão interna se dá, mais comumente, em motores do ciclo Otto ao invés dos motores do ciclo Diesel. Isso decorre do fato de que nos motores do ciclo Otto as condições de fornecimento do gás natural ao motor não requer modificações em sua estrutura original. Além da maior facilidade no fornecimento do gás natural, os motores do ciclo Otto têm a ocorrência do centelhamento como característica do início do seu processo de combustão (uso da vela) o que permite o uso apenas de gás natural durante a operação do motor. Já na operação dos motores diesel, de ignição por compressão, a combustão se inicia pelo contato do óleo diesel com o ar quente presente dentro dos cilindros. Tal processo de combustão impossibilita o uso gás natural como único combustível durante a operação dos motores do ciclo Diesel.

O uso do gás natural em motores de combustão interna é destacado graças a sua ampla faixa de inflamabilidade – o que permite usar misturas pobres e ricas em motores, sem prejudicar a combustão e estabilidade de funcionamento do motor, e seu alto número de octano, – o que possibilita seu uso em motores com taxa de compressão 17:1 sem há ocorrência de *knock*⁴.

⁴ *Knock* é uma combustão indesejável (nos motores do ciclo Otto) que ocorre devido a combinação de três fatores: altas temperaturas, altas pressão e baixa octanagem do combustível (Heywood, 1998).

Além do ganho ecológico – a combustão do gás natural gera menos poluentes do que a de outros combustíveis fósseis – o uso do gás natural em motores proporciona uma economia com o custo de combustível.

A principal desvantagem relacionada ao uso do gás natural em motores de combustão interna está na disponibilidade desse combustível no Brasil. Apenas em algumas cidades do país, mais comum na região litorânea, se tem a oferta desse produto.

CAPÍTULO III

RESÍDUOS SÓLIDOS E BIOGÁS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, inicialmente, são apresentados todos os fundamentos conceituais acerca da origem, classificação e destinação final dos resíduos sólidos urbanos. Por fim, são introduzidas noções relacionadas à geração e as características do biogás, bem como é exposto um método que é usado na estimativa de produção de biogás em aterros sanitários.

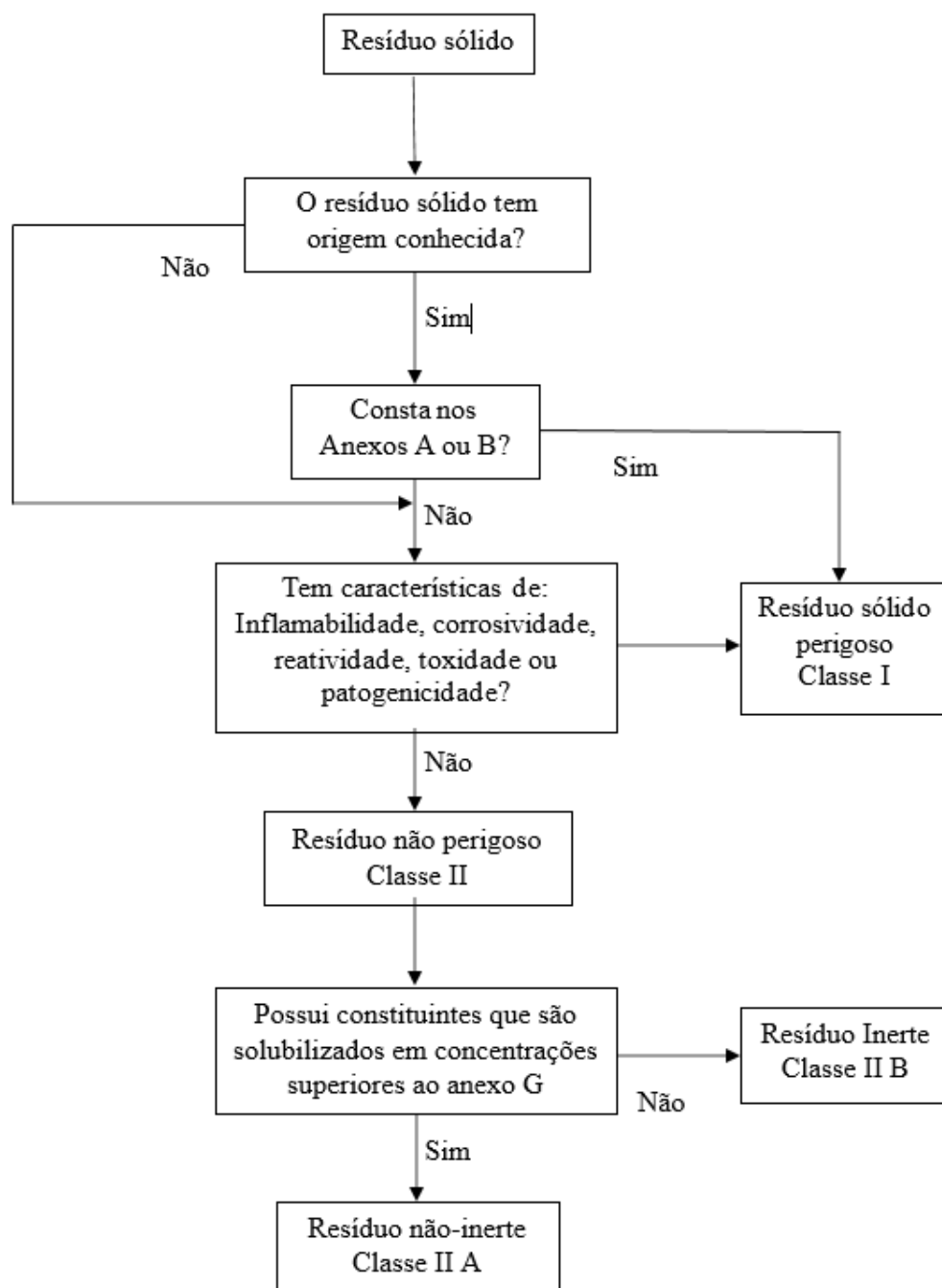
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a ABNT NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 1) os resíduos sólidos são definidos como:

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

Ainda em conformidade com essa Norma, os resíduos sólidos urbanos são classificados quanto à saúde pública e ao meio ambiente. A Fig. 3.1 ilustra o fluxograma usado para identificar os diferentes tipos de resíduos sólidos.

Figura 3. 1 – Fluxograma usado para caracterização e classificação dos resíduos sólidos.



Fonte: Compilação do autor⁵.

A classificação dos resíduos sólidos depende do conhecimento do processo

⁵ Montagem concebida pelo autor a partir da Norma ABNT NBR 10004.

gerador e dos insumos usados. Isso se deve à necessidade de se comparar com resíduos e substâncias cujo impacto à saúde humana e ao meio ambiente é conhecido (ABNT NBR 10004, 2004).

Segundo a Norma ABNT NBR 10004 (2004), esses resíduos, da classe I, são considerados perigosos devido as suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas apresentarem risco à saúde pública e ao meio ambiente ou por serem de cunho inflamável, corrosivo, reativo, tóxico ou patogênico.

São exemplos de resíduos sólidos perigosos: metais pesados, tais como o arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), selênio (Se), prata (Ag), zinco (Zn), vanádio (V), estrôncio (Sr), cobalto (Co), molibdênio (Mo), manganês (Mn) e cobre (Cu) (LICHTIG, 2004) e (OLIVER, 2008); alguns líquidos, como o álcool etílico, xileno, óleo, solventes orgânicos não-halogenados, soluções de substâncias carcinogênicas, mutagênicas, teratogênicas ou que apresente toxicidade conhecida, pesticidas e resíduos radioativos líquidos (ANTONIASSI, 2017) e (FONSECA, 2009); resíduos hospitalares em geral, tais quais, vacina vencida, sangue e hemoderivados, tecidos, materiais oriundos de cirurgias, agulhas, medicamento vencido, contaminado e interditado (KOOP, 2013).

Os resíduos não perigosos são divididos em classe II A (não inerte) e II B (inerte), ver Fig. 3.1. Essa divisão é feita de acordo com limites máximo de solubilização em água. Os resíduos não inertes, da classe II A, podem ter prioridades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (ABNT NBR 10004, 2004). São resíduos peculiares a essa classificação: restos de madeiras, podas de árvores, papel, papelão, restos de alimentos, produtos alimentícios com data de validade excedida, esterco, farelos de origem vegetal, entre outros.

Os resíduos inertes, da classe II B, são todos os resíduos não perigosos que não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT NBR 10004, 2004). Nessa classe, encontram-se: rochas, tijolos, vidros, alguns plásticos, borrachas, sucata de ferro, de aço, resíduos da construção civil, areia, isopor, dentre outros (CREUTZBERG, 2016).

Independente da classificação do resíduo sólido, sabe-se que a sua geração é, atualmente, um motivo de ponderação por parte de sociedades que buscam o desenvolvimento sustentável econômico visto a relação direta entre os níveis de emissões de poluentes e o gerenciamento do descarte desses resíduos.

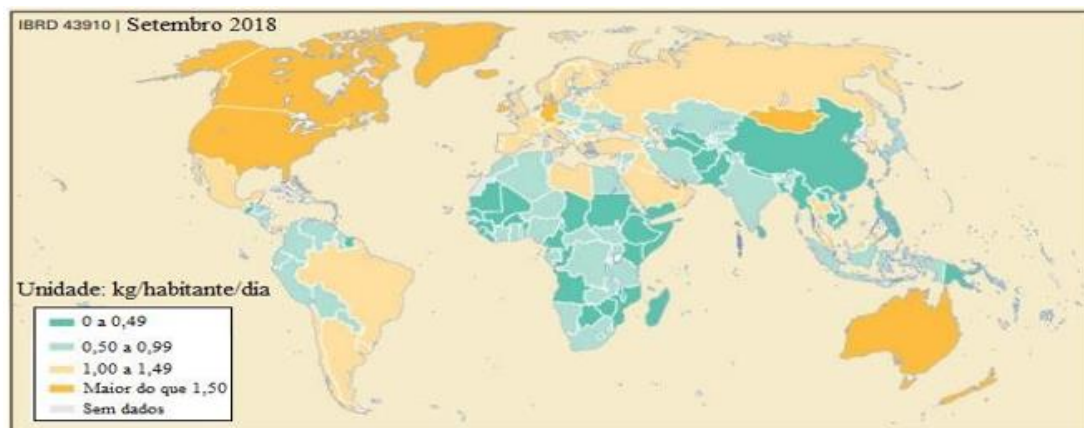
3.3 GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

3.3.1 Geração dos resíduos sólidos

Em todos os continentes, constata-se que a geração de resíduos sólidos urbanos oriunda da atividade humana vem crescendo em volume com o passar dos anos. Isso se deve, em grande parte, as novas formas de produção em grande escala para acompanhar os novos padrões e a facilidade de consumo das sociedades.

Para se ter uma ideia, um estudo realizado pelo World Bank Group (2018) estima que no mundo, a produção de resíduos sólidos atualmente é de 2,01 bilhões de toneladas por ano, dos quais, ao menos 33% não são gerenciados de forma segura tendo em vista o meio ambiente. Até 2050, esse mesmo trabalho diz que a quantidade de resíduos sólidos gerados pode chegar a 3,40 bilhões de toneladas por ano. Ainda segundo esse estudo, a média de geração de resíduos sólidos per capita no mundo é de 0,74 kg de resíduos sólido por dia. Esse índice de geração per capita pode variar entre 0,11 e 4,54 kg por dia, a depender, basicamente, dos níveis de renda e de urbanização da localidade, ver Fig. 3.2.

Figura 3. 2 - Geração de resíduos sólidos per capita no mundo.



Fonte: World Bank Group (2018).

Percebe-se, através da Fig. 3.2, que as maiores gerações de resíduos sólidos no mundo estão concentradas nos países mais ricos, como, por exemplo, Estados Unidos, Canada e Alemanha, que estão entre as maiores economias do mundo. Os países ricos geram cerca de 683 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, o que equivale a

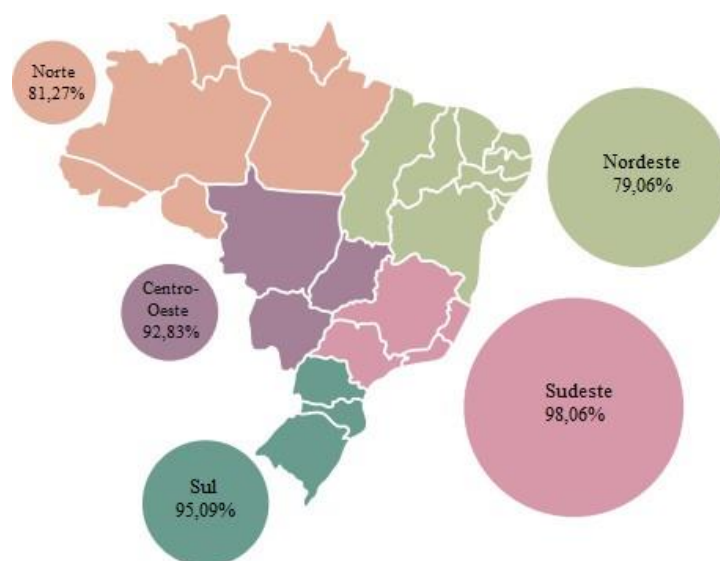
34% da geração do planeta, apesar de retratarem, tão somente, 16% da população mundial (WORLD BANK GROUP, 2018).

Apesar de retratarem um cenário com menor geração de resíduos sólidos, os países emergentes, assim como o Brasil, Índia e África do Sul, têm altos índices de descarte dos resíduos sólidos em áreas abertas, sem nenhum tratamento. Na África do sul, cerca de 90% dos resíduos vão para essas áreas (PALACIO, 2019).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais no Brasil (ABRELPE) são gerados 78,4 milhões de toneladas por ano de resíduos sólidos urbanos demonstrando um crescimento de 1% entre 2016 e 2017, enquanto a população cresceu 0,75%. Dos resíduos sólidos urbanos coletados (91,24% do total gerado), 40,9% são depositados em locais inadequados, correspondendo a 29 milhões de toneladas de resíduos por ano.

A Fig. 3.3 traz um mapa que relaciona as diferentes regiões do Brasil com seu respectivo índice de cobertura de coleta.

Figura 3. 3 – Regiões do Brasil com seus respectivos índices de cobertura de coleta.



Fonte: ABRELPE (2017).

Nota-se, no mapa da Fig. 3.3, que a região Nordeste tem o menor índice de recolhimento dos resíduos sólidos gerados, apenas 79,06%. Ressalta-se, também, que em 2017, essa região gerou 55.492 toneladas/dia de resíduo sólidos urbanos, com uma geração per capita de 0,969 kg/habitante/dia, ao passo que no Brasil era registrado uma média de

1,035 kg/habitante/dia (ABRELPE, 2017).

3.3.2 Descarte dos resíduos sólidos

O manejo dos resíduos sólidos tem um papel importante na saúde humana e ambiental, destaca a Organização das Nações Unidas (ONU). Em 2012, a ONU contabilizou que 23% das mortes no mundo – representando 12,6 milhões de pessoas – estão correlacionadas com causas ambientais (ONU, 2017). Nos Estados Unidos, o Serviço Público de Saúde identificou 22 tipos de doenças humanas relativas ao despejo inadequado de resíduos sólidos urbanos (ALAM, 2013). Ranzi (2014) levantou dados a respeito das doenças geradas em pessoas que moram perto de plantas de tratamento de resíduos sólidos. Esse estudo apontou o aparecimento de casos de câncer, 26 casos de alterações na gravidez (incluindo recém-nascido com baixo peso e deformações congênitas), 102 casos de doenças respiratórias e milhares de pessoas com mal-estar devido ao odor.

Vê-se, portanto, que esses números só fortalecem a evidente convergência natural entre a melhoria na qualidade de vida com a adequação ambiental da deposição dos resíduos sólidos no ambiente.

Ademais, a destinação dos resíduos sólidos é um meio de geração de renda e emprego. No Brasil, há 337 mil postos formais de trabalho no ramo da limpeza urbana, esse mercado movimenta recursos da ordem de R\$ 28,5 bilhões (ABRELPE, 2017). Nascimento (2017) analisou a reciclagem do lixo urbano como fonte de renda e constatou que, no município de Goiânia-GO, há 225 trabalhadores em 14 cooperativas de reciclagem cuja média salarial mensal é de 1,3 salários mínimos por trabalhador.

Embora se conheça todos benefícios do gerenciamento apropriado dos resíduos sólidos, boa parte não possui destino satisfatório (HENDGES, 2016). No Brasil, a destinação final ou o gerenciamento dos resíduos sólidos é previsto em lei (Lei 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos) a qual dispõe sobre princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes (SANTOS, 2017). Essa lei institui a chamada responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, que abrange os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e os titulares de serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos quanto a responsabilidade da gestão desses resíduos, e tem por objetivo:

“I – compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os

processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental; II – reduzir a geração de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas; III – reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais; IV – incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade; V – estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis; VI – propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade; VII – incentivar as boas práticas de responsabilidades socioambiental.”

Um dos instrumentos usados para atender o princípio da responsabilidade compartilhada é o plano de gerenciamento de resíduos sólidos. Resumidamente, esse plano é um documento cuja função é definir procedimentos, orientações e ações relacionadas ao manejo dos resíduos sólidos a fim de que se atenda as legislações quanto a geração, segregação, acondicionamento, coleta, transporte e destinação final dos resíduos sólidos (LUIZ, 2013).

Para cada classe de resíduos, definidas na seção 3.2, há procedimentos convenientes previstos em lei para o seu correto descarte. Neste trabalho ressalta-se os procedimentos e normas que tratam o descarte dos resíduos sólidos não perigosos.

3.3.2.1 Destinação dos resíduos sólidos não perigosos

Já os procedimentos e obrigações do descarte dos resíduos sólidos não perigosos é visto na Norma ABNT NBR 11174 (1990). Os resíduos não perigosos são aqueles definidos na seção 3.2 como classe II-A e II-B. Segundo a Norma NBR 11174, o local de armazenamento deve ser aquele que diminua, ao máximo, os riscos de contaminação ambiental, para isso, devem ser considerados os seguintes fatores:

- Uso do solo;
- Topografia;
- Geologia;
- Recursos hídricos;
- Acesso;
- Área disponível e
- Meteorologia.

Todo local de armazenamento deve prever um sistema de controle da poluição do solo e das águas.

Os principais locais usados para destinar os resíduos sólidos são: aterros sanitários, aterros controlados, incineradores e lixões. Destaca-se os aterro sanitários visto que é um dos assuntos abordados neste trabalho.

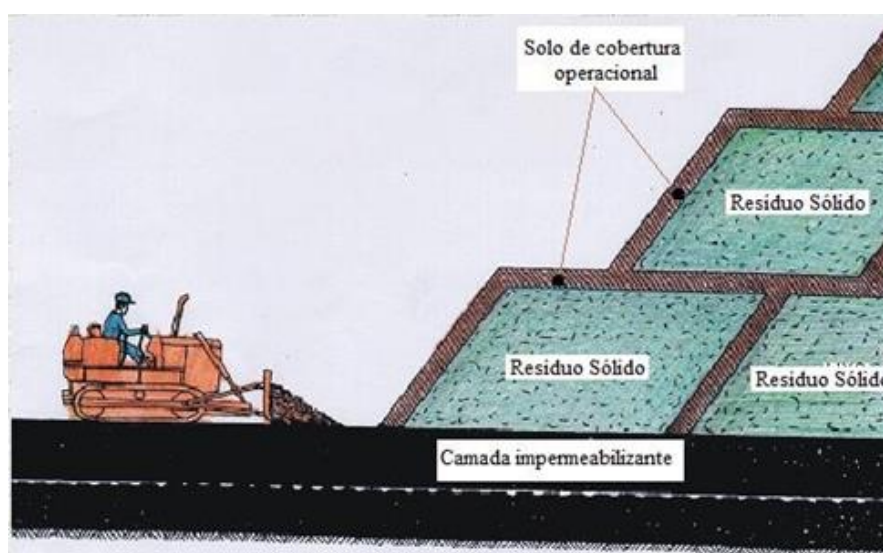
3.3.2.2 Aterros sanitários

Aterro sanitário é um local físico que foi previamente planejado com a função de ser o destino final dos resíduos sólidos, com intuito de não causar danos ao meio ambiente e aos seres humanos (LOPEZ, 2017).

De um modo geral, aterros sanitários são constituídos por células que possuem a finalidade de armazenar os resíduos sólidos gerados pela atividade humana de um determinado território. Essas células podem ser sobrepostas ou construídas separadas umas das outras, com impermeabilização em suas bases.

Pode ser observado na Fig. 3.4 a forma mais comum de disposição dos resíduos sólidos em uma célula de um aterro sanitário.

Figura 3. 4 – Disposição de resíduos sólidos em uma célula de um aterro sanitário.



Fonte: Página da UNESP⁶.

⁶ Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res13b.html>.

No Brasil, um projeto de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos deve ser empreendido seguindo orientações da Norma ABNT NBR 8419 (1992), onde são definidas as condições mínimas de projeto.

Essa Norma enumera as condições específicas que um projeto de aterro sanitário deve ter. Dentre outras informações, a Norma exige: um memorial descritivo contendo informações a respeito dos resíduos a serem dispostos no aterro, do local, do clima, do uso da água e do solo próximos ao local; descrição e especificações dos elementos do projeto; descrição do sistema de drenagem superficial; caracterização do sistema de drenagem e remoção de percolato (chorume); definição do sistema de tratamento do percolato; descrição da impermeabilização superior e inferior do aterro; sistema de drenagem do gás; preparo do local de disposição; modo de transporte e disposição dos resíduos sólidos; indicação do empréstimo de material para cobertura; controle tecnológico; plano de encerramento do aterro e cuidados posteriores; plano de uso futuro do local do aterro; memorial técnico; definição do prazo de operação do aterro (todo aterro tem uma vida útil limitada) e outras informações.

3.4 O BIOGÁS

O biogás é uma mistura de gases gerado pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente em resíduos sólidos. Os gases encontrados no biogás são o metano, o dióxido de carbono, o hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, aminas voláteis e monóxido de carbono.

O metano é considerado o principal componente do biogás, pois, além de ser encontrado em maior quantidade do que os demais gases, é causador do efeito estufa e combustível, o que possibilita o aproveitamento energético do biogás. Na sequência de maior quantidade presente, tem-se o dióxido de carbono, que assim como o metano, também é gás causador do efeito estufa, porém com um impacto 30,5 vezes menor.

Na Tab.3.1 apresenta-se, de forma aproximada, os percentuais de cada gás normalmente encontrados no biogás.

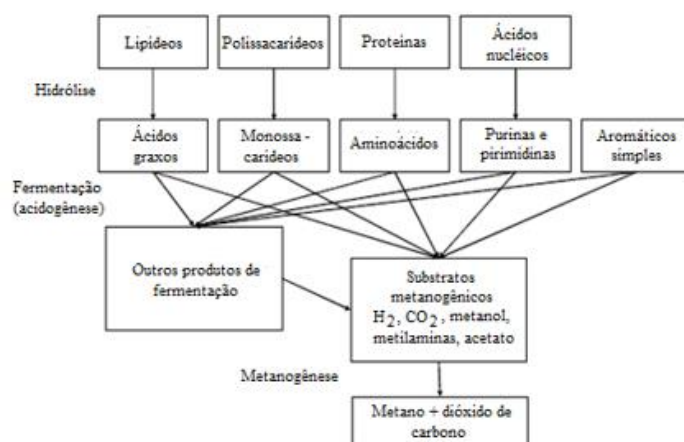
Tabela 3. 1 - Composição do biogás.

Componentes	Quantidade	Considerações
Metano (CH ₄)	~50%	Gás combustível, sendo um dos gases causadores do efeito estufa com potencial de aquecimento global 30,5 vezes superior ao do CO ₂ .
Dióxido de carbono (CO ₂)	~45%	Gás causador do efeito estufa.
Outros gases – Hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, amônia, ácido sulfídrico, aminas voláteis e monóxido de carbono.	~5%	Entre esses gases, destaca-se o ácido sulfídrico, que além de mau odor, pode levar a ocorrência de chuva ácida.

Fonte: SILVA, 2017

O biogás é gerado graças a três processos básicos: hidrólise, fermentação/acidogênese e metanogênese. Na Fig. 3.5 expõe-se a sequência desses processos básicos na decomposição anaeróbica.

Figura 3. 5 – Sequência de processos na decomposição anaeróbica.



Fonte: (SILVA, 2015).

Neste trabalho, busca-se descrever, apenas, os fundamentos básicos de cada etapa que envolve a decomposição anaeróbica da matéria orgânica.

Percebe-se, na Fig. 3.5, que a hidrólise é o primeiro estágio da decomposição anaeróbica a qual consiste em uma reação química de quebra de ligações entre moléculas (lipídeos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos) através da adição de água. Em seguida, ocorre a acidogênese, que se resume na produção de ácidos a partir da fermentação de açúcares através de microrganismos. Por fim, se dá a metanogênese, etapa realizada por um grupo de microrganismos chamados metanógenos que convertem boa parte dos substratos gerados no processo anterior em metano e dióxido de carbono.

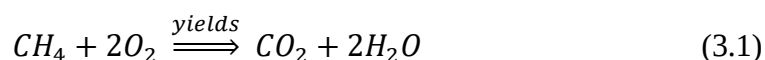
Como citado anteriormente, o metano é a parte combustível predominante no biogás, o que lhe confere a capacidade de gerar calor e, conseqüentemente, energia. No mundo, há diferentes formas de se aproveitar esse potencial energético do metano presente no biogás.

Silvestre (2015), analisou o biogás gerado do aterro sanitário da cidade de Brusque – SC e testou a capacidade de geração do biogás usando motores de combustão interna e geradores elétricos. O mesmo concluiu que os dois drenos de biogás estudados tinham capacidade de fornecer gás para gerar 560 kWe.

Chang (2015) conduziu testes em um grupo gerador de 30 kWe utilizando biogás oriundo de uma fazenda de criação de porcos em Taiwan. Observou-se, nos resultados do trabalho que a máxima potência alcançada foi de 26,8 kWe e com rendimento térmico de 28,7%.

3.4.1 Combustão estequiométrica do biogás

A combustão estequiométrica do biogás ocorre quando há a completa queima do metano, que é o único componente combustível do biogás. A reação da combustão do biogás com o ar pode ser vista na Eq. 3.1.



A reação acima mostra que para ocorrer a combustão estequiométrica de um mol de biogás (entre os componentes do biogás apenas o metano é combustível) são

necessários dois mols de ar (oxigênio). Como produto, a reação da combustão estequiométrica do biogás produz dois mols de água e um de dióxido de carbono, ver Eq. 3.1.

Considerando que apenas 21% do volume do ar é composto por oxigênio e que 50% do volume do biogás é de metano, tem-se que a relação ar/biogás estequiométrica é 4,762, em base volumétrica.

3.5 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A estimativa da geração de biogás oriundo da decomposição anaeróbica da matéria orgânica pode ser feita usando equações algébricas ou bioquímicas o que, muitas vezes, requer cálculos computacionais através de softwares (ACHINAS, 2016).

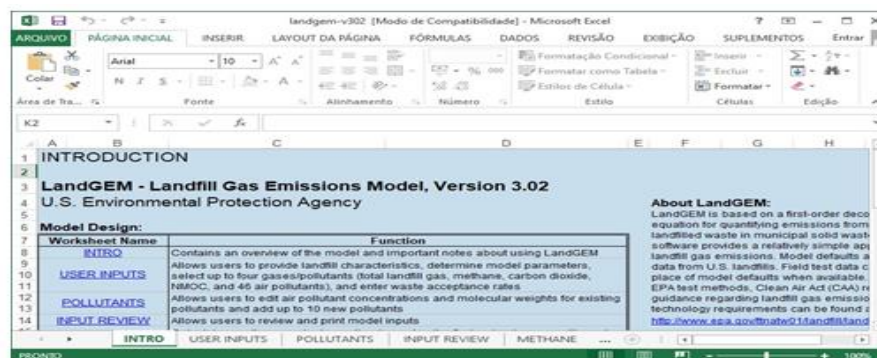
De maneira simples, há modelos matemáticos que buscam prever a capacidade de produção de biogás a partir de dados como o tipo de resíduos considerados, a quantidade e o período de disposição. Entretanto, existem modelos mais complexos que requerem informações específicas do resíduo e do aterro, por exemplo, temperatura, pH, umidade, balanço entre carbono e nitrogênio do resíduo, quantidade de sólidos voláteis presente na matéria e a degradabilidade do extrato.

3.5.1 Método LandGem 3.02

Neste trabalho, elucida-se os aspectos e as funcionalidade básicas do método chamado LandGem 3.02. O LandGem (Landfill Gas Emission Model) é um programa gratuito desenvolvido pela Agência de Proteção ambiental dos Estados Unidos para estimar os gases poluentes provenientes dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

O LandGem 3.02 é uma ferramenta desenvolvida no ambiente Microsoft Excel cuja finalidade é determinar a quantidade e os percentuais dos componentes presentes no biogás gerado em um aterro sanitário considerado. A interface de abertura do LandGem 3.02 pode ser vista na Fig. 3.6.

Figura 3. 6 – Interface de apresentação do LandGem 3.02.



Fonte: Autor.

Esse programa estima a produção de biogás baseada em uma equação de decomposição de primeira ordem. A título de exemplo, a quantidade de metano gerado por ano é determinada pela Eq. (3.2).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad (3.2)$$

Onde Q_{CH_4} é geração de metano no ano do cálculo, i é o incremento de tempo (anual), n é o resultado da diferença entre o ano do cálculo e o ano em que o aterro começou a operar, j é um incremento de tempo (anual), k é a taxa de geração de metano por ano, L_0 é a capacidade potencial de geração de metano, M_i é a quantidade, em massa, de resíduos depositados no ano i e t_{ij} é a idade da seção j da massa M_i depositada no ano i (anos em decimal, por exemplo, 2,2 anos).

O LandGem oferece uma abordagem simples, com parâmetros padrões pré-definidos (k , L_0 , *Nonmethane Organic Compound Concentration* e *Methane Content*) para determinação dos níveis de emissões de um aterro sanitário, para isso, basta fornecer informações quanto a data de início e fim da operação do aterro sanitário e a quantidade de resíduos sólidos urbanos que são depositados por ano no aterro sanitário. No entanto, para se obter uma modelagem com dados mais próximos da realidade, recomenda-se, ao invés de valores padrões, usar valores que foram medidos no aterro sanitário a ser estudado.

CAPÍTULO IV

ATERRO SANITÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE JOÃO PESSOA

4.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo serão discutidos os aspectos e as particularidades do aterro sanitário da região metropolitana de João Pessoa – PB. Inicialmente serão descritas as operações realizadas no aterro sanitário visando a gestão dos resíduos sólidos urbanos e o seu tratamento. Encerra-se, este capítulo, com uma breve explanação a respeito dos tipos de resíduo sólidos destinado a este aterro sanitário e dos aparatos utilizados na captação, tratamento e uso do biogás.

4.2 O ATERRO SANITÁRIO DA REGIÃO METROPOLITANA DE JOÃO PESSOA

A região metropolitana de João Pessoa tem, aproximadamente, uma população de 1.126.000 habitantes, de acordo com o último levantamento, em 2016, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os resíduos sólidos urbanos gerados nessa região tem um destino comum: o aterro sanitário localizado no Engenho de Mussuré, distrito industrial de João Pessoa.

Esse aterro sanitário é gerido por uma empresa privada denominada FOXX HAZTEC, a qual atua em todas as regiões do Brasil e se faz presente nas áreas de tratamento e destinação de resíduos, engenharia ambiental, energia e engenharia florestal. No Nordeste, se encontra nos estados da Paraíba e de Pernambuco.

A Empresa Municipal de Limpeza Urbana (EMLUR), empresa pública, tem a função de fiscalizar as operações executadas no aterro e de realizar a limpeza urbana da cidade de João Pessoa.

O aterro possui um plano de gestão integrada de resíduos sólidos. Dividido em dois volumes, o plano dispõe sobre os serviços de limpeza urbana e da gestão dos resíduos sólidos, e apresenta um prognóstico (VIEIRA, 2015).

4.2.1 As células do aterro sanitário

O aterro em questão foi concebido para operacionalizar 20 células, com altura máxima de 30 metros, que são usadas para destinação final dos resíduos sólidos urbanos gerados pelas cidades, durante 25 anos. A geometria das células pode ser vista na Fig. 4.1.

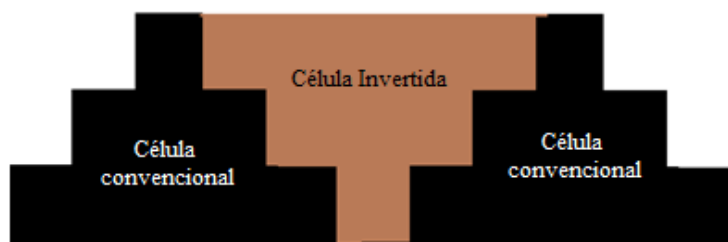
Figura 4. 1 – Vista aérea das células do aterro sanitário da região metropolitana de João Pessoa – PB.



Fonte: SUDEMA (2016).

Além das 20 células convencionais, o projeto do aterro prevê a construção de mais 5 células invertidas, as quais são construídas entre duas células convencionais, totalizando 25 células em toda sua área. Na Fig. 4.2 elucida-se as formas das células invertida e convencional.

Figura 4. 2 – Formas das células invertida e convencional.



Fonte: Autor.

4.2.2 Os resíduos sólidos urbanos do aterro sanitário

Os resíduos sólidos urbanos encontrados no aterro sanitário tem uma composição gravimétrica conforme a Tab. 4.1.

Tabela 4. 1 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do aterro da região metropolitana de João Pessoa.

Tipo	Quantidade
Matéria orgânica	32 %
Papel/papelão	8 %
Plástico	10 %
Metal	1 %
Vidro	2 %
Outros	47 %

Fonte: MARTINS (2017).

Atualmente, o aterro recebe cerca de 1700 toneladas de resíduos por dia e se preenche a 16ª célula. As 1700 toneladas de resíduos são destinadas para as áreas de reciclagem, de resíduo verde, de incineração e das células.

Alguns bairros de João Pessoa possuem a coleta seletiva e seus resíduos são direcionados, primeiramente, para a reciclagem e o resíduo que não for reaproveitável é destinado às células.

No ano de 2018, 18897 toneladas de biomassa chegaram no aterro e são direcionadas para uma área de triagem, onde se selecionam os restos de madeiras e podas de árvores adequados para serem comercializados como combustível para caldeiras de indústrias da região, o resíduo de verde remanescente é destinado a uma área ao ar livre no próprio aterro sanitário. Os resíduos provenientes de hospitais são encaminhados para a unidade de incineração. O restante dos resíduos é descartado diretamente nas células.

A gestão dos resíduos tem por base uma logística de caminhões. Na entrada do aterro sanitário, os caminhões carregados com os resíduos sólidos são pesados e direcionados para alguma área apropriada do aterro. Após a despejo total da carga de resíduos, os caminhões são pesados na saída do aterro, e por diferença de peso de entrada e saída do caminhão, é quantificado a massa de resíduo sólido que entrou no aterro.

O aterro possui duas balanças, cada uma com capacidade de 80 toneladas, para medir o peso dos caminhões, e um sistema informatizado para registro de peso dos caminhões. A área de pesagem dos caminhões está ilustrada na Fig. 4.3.

Figura 4. 3 – Área de pesagem dos caminhões.



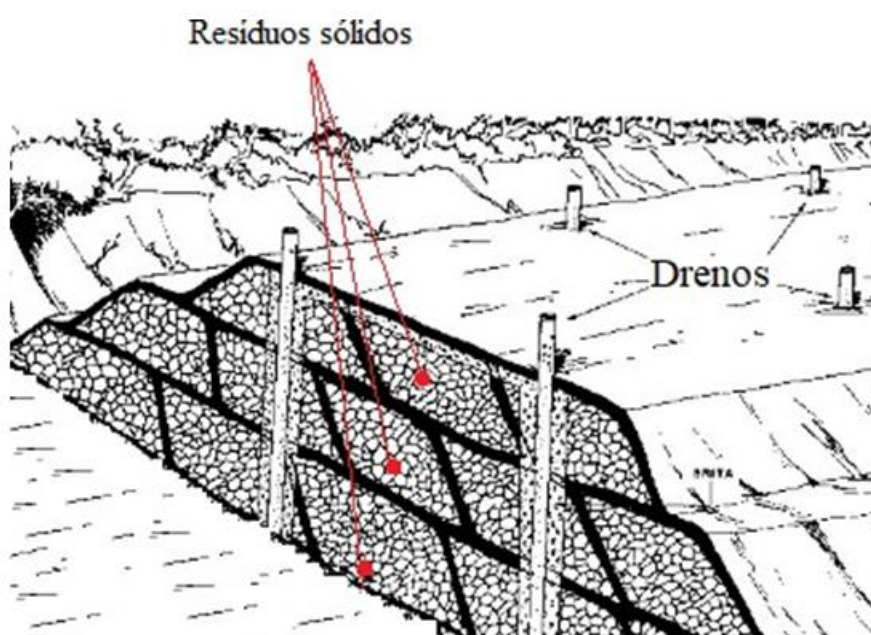
Fonte: Autor.

Os caminhões são de empresas privadas e de prefeituras que destinam seus resíduos sólidos para o aterro.

4.2.3 Produção, coleta e aproveitamento do biogás do aterro

Como foi descrito na seção 3.4, o biogás é gerado devido a decomposição anaeróbica da matéria orgânica. No aterro sanitário de João Pessoa, o biogás é produzido no interior das células, e a sua coleta se dá através de tubulações, chamadas de drenos, que foram inseridas durante a construção de cada célula, como é ilustrado na Fig. 4.4.

Figura 4. 4 – Coleta do biogás do aterro estudado.



Fonte: Adaptação do autor⁷.

Como se observa na Fig. 4.4, as tubulações são introduzidas até a raiz da célula. No final das tubulações há filtros de pedras que impedem os resíduos sólidos de obstruírem a passagem do biogás pela tubulação.

Após ser drenado para fora da célula, o biogás é encaminhado a uma estação de coleta e compressão, ver Fig. 4.5.

⁷ Montagem produzida a partir da imagem disponível em: <http://www.hfc.com.br/aterro2.htm>.

Figura 4. 5 – Sistemas de coleta, (A), e compressão, (B), do biogás.



Fontes: Compilação do autor⁸.

Atualmente, o biogás que é coletado das células do aterro está sendo queimado diretamente em queimadores, em consonância com as legislações de não agressão ao meio ambiente. Dessa forma, o aterro não está aproveitando o potencial energético e econômico do biogás.

No entanto, a empresa que administra os resíduos sólidos do aterro, a FOXX HAZTEC, está instalando uma unidade de recuperação energética (URE) que utilizará o biogás gerado no aterro para geração de energia elétrica usando grupos geradores do ciclo Otto, que é considerada a tecnologia mais econômica de conversão do biogás em energia elétrica. Entretanto, não há nenhum sistema de cogeração com vistas na recuperação de parte da energia que é descartada pelo gás de escape dos grupos geradores, o que aumentaria o rendimento térmico do sistema e dava origem a outros produtos, como calor e frio.

A URE conta com um sistema de limpeza do biogás para retirar a umidade e outras impurezas, como o ácido sulfídrico (H_2S). Esse sistema de limpeza é a primeira etapa da URE pois tem a função de proteger os outros equipamentos da corrosão gerada pelas impurezas contidas no biogás. Logo após o sistema de limpeza, tem-se o sistema de compressão cuja função é fornecer a quantidade de biogás necessária aos grupos geradores ou ao queimador. A Fig. 4.6 e 4.7 mostram os sistemas que compõem a URE que está sendo instalada no aterro.

⁸ Montagem a partir de imagens coletadas nos sites www.portalresiduossolidos.com.br e www.encenergy.com.

Figura 4. 6 – Sistemas de limpeza e compressão, e queimador.



Fonte: Autor.

Figura 4. 7 – Grupos geradores cabinados.



Fonte: Autor.

A URE possui três grupos geradores importados da Áustria, da marca GE Jenbacher. A geração de eletricidade média da unidade é de 1,4 MWh por grupo gerador,

totalizando 4,2 MWh. As principais características dos motores desses grupos geradores são:

- Rendimento térmico elevado (40,8%)
- Possui 20 cilindros
- Cilindrada igual a 48,67 litros
- Taxa de compressão 12,5
- Turboalimentado
- Rotação fixa de 1500 RPM
- Energia disponível para cogeração corresponde a 42,3%

CAPÍTULO V

AVALIAÇÃO EXERGoeCONômICA E EXERGoeAMBIENTAL

5.1 INTRODUÇÃO

O capítulo V deste trabalho define os princípios básicos relacionados às análises exergoeconômicas e exergoambiental. No campo da exergoeconomia, evidencia-se os conceitos pertinentes ao método SPECO e as principais equações usadas na análise exergoeconômica. Quanto a análise exergoambiental é destacado a avaliação do ciclo de vida, o ecoindicador 99 e as principais equações usadas na análise exergoambiental.

5.2 AVALIAÇÃO EXERGoeCONômICA

De um modo geral, a análise exergoeconômica é um importante ramo da engenharia que combina a análise exérgica com princípios econômicos para obter informações que indicarão qual será a melhor forma de construir e operar um sistema de conversão de energia. Tais informações não podem ser levantadas apenas com uma análise energética (1º lei da termodinâmica). Esse método consiste na realização de um balanço exérgico onde é atribuído custos aos fluxos exérgicos de entrada e saída, a potência gerada e associados à transferência de calor presentes nos componentes de um sistema. Dessa forma, consegue-se computar as taxas de custos vinculadas a cada um dos componentes.

As taxas de custos são calculadas usando as Eqs. 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 (MEYER, 2009) (LAZZARETTO, 2006).

$$C_e = c_e * E_e = c_e * \dot{m}_e * e_e \quad (5.1)$$

$$C_s = c_s * E_s = c_s * \dot{m}_e * e_e \quad (5.2)$$

$$C_p = c_w * W \quad (5.3)$$

$$C_q = c_q * E_q \quad (5.4)$$

Onde os termos C_e , C_s , C_w , C_q são, respectivamente, as taxas de custos associados a entrada, a saída, a potência gerada e a transferência de calor. Os elementos c_e , c_s , c_w e c_q são os custos médios por unidade de exergia, $\dot{m}_e$ e $\dot{m}_s$ são as vazões mássicas de entrada e de saída e e_e e e_s são as exergias específicas de entrada e de saída. E_e e E_s são as exergias totais que entram e que saem dos componentes. Os termos W e E_q são a potência gerada e a energia em forma de calor transferida.

Com todas as equações de entrada e de saída definidas para o componente em estudo é necessário realizar um balanço exergoeconômico com vistas em se obter os custos exergéticos que estão associados ao produto gerado. Assim, usa-se as Eq. 5.5 que representa o balanço exergoeconômico em um dado componente.

$$\sum s (\dot{C}_s)_k + C_w = \sum e (\dot{C}_e)_k + C_q + Z_k \quad (5.5)$$

O subscrito k na Eq. 5.5 identifica de qual componente a exergia está sendo computada. O termo Z_k representa os custos com a aquisição, operação e manutenção dos componentes do sistema.

Percebe-se, na Eq. 5.5, que para um sistema de geração de energia – por exemplo um grupo gerador – o balanço indica que os custos dos produtos do sistema C_w (energia elétrica gerada) e C_s (exergia dos gases de escape) são iguais aos custos dos insumos C_e (exergia do combustível), C_q (exergia destruída no sistema) e Z_k (aquisição, operação e manutenção do grupo gerador).

Outros parâmetros da análise exergoeconômica de um sistema são a eficiência exergética (ε) e a diferença relativa do custo (r_k) que compara o custo do produto (c_p) com o custo do combustível (c_f), (MEYER, 2009).

$$\varepsilon = \frac{E_p}{E_F} \quad (5.6)$$

$$r_k = \frac{c_p - c_f}{c_f} \quad (5.7)$$

A eficiência exergética é usada para examinar o desempenho dos equipamentos quanto à exergia, onde, na Eq.5.6, os termos E_p e E_F representam a exergia do produto e a exergia do insumo, respectivamente. O último parâmetro, r_k , indica qual componente tem maior potencial de otimização de custo com menor esforço. Otimizando-se os componentes, realiza-se uma otimização geral do sistema o que significa na redução dos custos exergoeconômicos dos produtos.

5.2.1 Método SPECO

Segundo Lazzaretto (2006), SPECO (Specific Exergy Costing) é uma metodologia geral e sistêmica usada para definir custos exergéticos e calcular eficiências exergéticas de sistemas térmicos. Esse método consiste na realização, em sequência, dos seguintes passos:

- Identificação dos fluxos exergéticos: Inicialmente é preciso definir como será realizada a análise dos fluxos exergéticos nos componentes, se serão analisados usando a exergia total ou se distinguirá as formas de exergia que existem no componente (térmica, mecânica, elétrica etc). Ao considerar as diferentes formas de exergia, aumenta-se a precisão dos resultados da análise. No entanto, há um aumento significativo no esforço computacional ao escolher o método separado. Após decidido, identifica-se e calcula-se todos os fluxos exergéticos associados a fluxos mássicos e energéticos de entrada e saída nos componentes.
- Definição do combustível e do produto: Nesse passo, são definidas as exergias do produto e do combustível. Considera-se produto como resultado desejado produzido pelo componente e o combustível como fonte dispendida usada na geração desse resultado (LAZZARETO, 2006). Ou seja, produto é todos os valores de exergia na saída dos componentes e todo aumento de exergia entre a entrada e a saída de acordo com a finalidade do componente. Logo, combustível são todos os valores de exergia na entrada dos componentes, toda redução de exergia entre entrada e saída dos componentes e todo aumento de exergia que não esteja de acordo com a finalidade do componente.
- Equações de custo: O último passo consiste na definição das equações de custos relacionadas às taxas de exergia de entrada e saída, à potência gerada e à

transferência de calor que foram escritas na seção anterior como C_e , C_s , C_w , C_q , respectivamente. Com esses custos definidos, faz-se, então, o balanço exergoeconômico exposto na Eq. (5.5).

De um modo geral, se há N fluxos exergéticos saindo de um componente, haverá N variáveis desconhecidas e apenas uma equação, a do balanço exergoeconômico. Para obter as $N-1$ equações auxiliares necessárias, usa-se os princípios F e P, definidos a seguir.

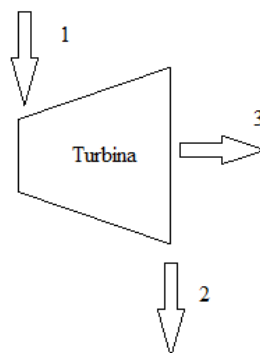
5.2.1.1 O princípio F

O princípio F (*fuel*) do método SPECO considera que o custo específico médio (custo por unidade de exergia) associado a remoção de exergia em um componente é igual ao custo específico médio do fluxo exergético que é fornecido na entrada do componente (LAZZARETO, 2013).

Ao usar essa afirmativa, é obtido uma equação auxiliar para cada remoção de exergia. Logo, o número de equações auxiliares geradas com a aplicação do princípio F é sempre igual ao número de fluxos exergéticos na saída que estão associados ao combustível de um componente (LAZZARETO, 2013).

Por exemplo, Cavalcanti (2016), aplicou o princípio F em uma turbina a gás como a ilustrada na Fig. 5.1.

Figura 5. 1 – Ilustração de uma turbina a gás.



Fonte: Autor.

Realizando o balanço de custo dos fluxos envolvidos na turbina e desconsiderando os custos com a aquisição do componente (Z), tem-se as Eqs. 5.8 e

5.9.

$$C_1 = C_2 + C_3 \quad (5.8)$$

$$E_1 * c_1 = E_2 * c_2 + E_3 * c_3 \quad (5.9)$$

Ao usar o princípio F, $c_1 = c_2 = c$, e assim, chega-se a Eq. 5.10.

$$c = \left(\frac{E_3}{E_1 - E_2} \right) * c_3 \quad (5.10)$$

A equação acima indica que o custo específico do produto (potência gerada) c_3 é relacionado com o custo do combustível, c , e carrega as irreversibilidades da turbina. Portanto, conclui-se que ao usar a regra F aplica-se a ideia de que o combustível paga a conta do produto e que o produto carrega as irreversibilidades do componente.

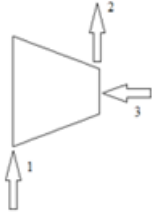
O princípio F pode ser aplicado em qualquer componente do sistema térmico, observando-se o propósito do componente.

5.2.1.2 O princípio P

O princípio P (*product*) se refere ao fornecimento de exergia a um fluxo exergético dentro de um componente. O princípio P diz que cada unidade de exergia é fornecida a um fluxo associado ao produto com o mesmo custo médio, denotado por c_p . (LAZZARETO, 2006). Como cada fluxo ao qual exergia é fornecida está associado a um fluxo de saída, o número de equações auxiliares levantadas ao usar o princípio P é sempre igual $N_s - 1$, onde N_s é o número de fluxos na saída que são definidos como produto pelo método SPECO. Assim, os princípios F e P fornecem as equações auxiliares necessárias ao desenvolvimento de uma análise exergoeconômica.

Cavalcanti (2016) apresentou uma tabela formada por um conjunto de equações associadas a diversos componentes ao se utilizar do princípio P. A Tab. 5.1 mostra as equações desenvolvidas para os componentes: compressor, bomba e ventilador.

Tabela 5. 1 – Exemplo de equações obtidas ao se utilizar o princípio P.

Equipamento	Descrição	Produto	Combustível	Eq. auxiliar
	Compressor, bomba, e ventilador	$E_p = E_2 - E_1$ $C_p = C_2 - C_1$	$E_f = E_s$ $C_f = C_3$	Não há

Fonte: CAVALCANTI (2016).

5.3 AVALIAÇÃO EXERGOAMBIENTAL

O uso da análise exergoambiental é semelhante à análise exergoeconômica e permite identificar, de modo preciso, os componentes que precisam de melhorias em um sistema de conversão de energia. A análise exergoambiental é uma combinação única de exergia e análise do ciclo de vida dos componentes para identificar a localização, a magnitude e as causas do impacto ambiental (MOROSUK, 2013).

A método da avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma abordagem usada para avaliar o impacto ambiental de todas as etapas de um produto, desde a construção até sua destinação final. Dessa forma, a avaliação do ciclo de vida de um sistema de conversão consiste em levantar, para todos os componentes, um inventário dos materiais usados na fabricação, os insumos (energia, água etc) e a quantificar os poluentes gerados ao meio ambiente durante a vida útil do componente (KJAER, 2015).

A combinação da análise exérgica com os impactos ambientais se dá através do uso de um indicador ambiental o qual permite quantificar os impactos através da ACV. Assim, os resultados da ACV são associados a cada fluxo de exergia do sistema o que possibilita o cálculo das variáveis exergoambientais que, por sua vez, permite a avaliação ambiental mostrando os componentes que necessitam reduzir a geração de poluentes.

A primeira etapa da análise exergoambiental é realizar a análise exérgica na qual se obtém os valores de exergia para os fluxos existentes no sistema, da eficiência exérgica e da destruição de exergia para cada componente do sistema, conforme se detalhou na seção anterior. No próximo passo, executa-se a ACV.

5.3.1 A avaliação do Ciclo de Vida

A ACV é um método usado para avaliar o balanço de insumos e de produtos de um sistema e organizar e converter esses insumos e produtos em impactos ambientais relativos ao uso de recursos, saúde humana e áreas ecológicas. A quantificação de entradas e saídas de um sistema é chamado de inventário do ciclo (GUINÉE, 2001).

A estrutura, os requisitos, as recomendações e os princípios de uma ACV é prevista em Normas Brasileiras ABNT NBR ISO 14040 e 14044, ambas de 2009. Nas Normas, é estabelecido a estrutura metodológica de uma ACV, que consiste, de forma geral, nas seguintes etapas:

- Definição de objetivo e escopo
- Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)
- Avaliação do Impacto do ciclo de Vida (AICV)

A realização dessas etapas cumpre todos os requisitos de uma ACV, estabelecidos nas Normas. Na definição de objetivo e escopo são definidos as razões pretendidas, o público alvo, o sistema a ser estudado, a fronteira do sistema, os fluxos de referência e entre outros aspectos. Na ICV são determinados as entradas de energia e de matéria-primas, saída dos produtos e das emissões atmosféricas, e aspectos ambientais, e no AICV é onde se concretiza a avaliação dos impactos ambientais potenciais, a partir dos resultados da ICV.

Como antecipado, a quantificação da ACV decorre do uso de um indicador, chamado de ecoindicador ou indicador ecológico, que mensura o impacto ambiental de um material ou processo. Quanto maior esse indicador, maior o impacto ambiental.

Neste trabalho, destaca-se o ecoindicador 99, que é o indicador amplamente usado na literatura técnica (GUINÉE, 2001), (UDO DE HAES, 2002), (JOLLIET, 2003), (MEYER, 2009), (NETO, 2018), (MARQUES, 2018), (SOUZA, 2019), (ROCHA, 2019) e (CAVALCANTI et al. 2020).

5.3.1.1 Ecoindicador 99

O ecoindicador 99 é um método usado para quantificar o impacto ambiental em uma ACV. Proposto sob a coordenação do *Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Enviromental* e a colaboração de especialistas da Suíça e Holanda, esse indicador é uma evolução do ecoindicador 95 e foi desenvolvido para dar suporte as tomadas de

decisão em projetos de meio-ambiente.

O ecoindicador 99 tem como unidade o point (Pt) ou milipoint (mPt). Essa unidade se refere a uma carga ambiental anual, seu valor absoluto não deve ser tratado com importância, porém a principal vantagem é comparar diferenças relativas entre produtos e componentes.

Há valores padrões do ecoindicador 99 para:

- **Materiais:** Os indicadores para processos de produção levam em conta 1 kg do material.
- **Processos de produção:** Tratamento e processamento de vários materiais.
- **Transporte**
- **Processos geradores de energia:** Unidades usadas são por eletricidade ou calor produzidos
- **Descarte:** São considerados por kg de material depositado, subdividido em tipos de materiais e em métodos de processamento.

Meyer (2009) exemplificou, usando o ecoindicador 99, a avaliação de impacto ambiental de algumas emissões e da geração de eletricidade na Alemanha ver Fig. 5.2.

Figura 5. 2 – Exemplo de valores dos ecoindicadores.

Emissões ou produtos	Ecoindicador 99 (Pts)
1 kg CO ₂ emitido	0,0054545
1 kg CH ₄ emitido	0,1146225
1 kg N ₂ O emitido	1,7922000
1 kg NO _x emitido	2,7493600
1 kg SO _x emitido	1,4993700
1 kg CO emitido	0,0083636
1 kWh gerado na Alemanha	0,01302

Fonte: Meyer (2009).

5.3.2 Balanço exergoambiental

Em analogia com a taxa de custos para os fluxos de exergia, a taxa de impacto

ambiental B_j e o ecoindicador 99 ambiental por unidade de exergia b_j são atribuídos a fluxos de exergia em uma análise exergoambiental.

A taxa de impacto ambiental B_j de um fluxo j (Pt/s) é definido pela Eq. (5.11).

$$B_j = E_j * b_j \quad (5.11)$$

Onde E_j é a exergia do fluxo j e b_j é o ecoindicador 99 específico. Assim, o balanço exergoambiental pode ser escrito de acordo com a Eq. (5.12).

$$\sum_{i=1}^e B_{j,k} + Y_k + B_k = \sum_{i=1}^s B_{j,k} \quad (5.12)$$

O balanço exergoambiental estabelece que a soma dos impactos ambientais de todos os fluxos de entrada ($\sum_{i=1}^e B_{j,k}$), dos impactos dos componentes (Y_k) e do ecoindicador (B_k) é igual a soma dos impactos ambientais de todos os fluxos de saída (CAVALCANTI, 2016).

O impacto ambiental do componente (Y_k) é obtido ao considerar o ciclo de vida completo do componente. Isso é representado pela soma dos impactos ambientais de: i) construção (Y^{CO}), ii) operação e manutenção (Y^{OM}) e iii) descarte (Y^{DI}) (PETRAKOPOULOU, 2012). A equação do impacto ambiental do componente pode ser vista na Eq. (5.13).

$$Y_k = Y_k^{CO} + Y_k^{OM} + Y_k^{DI} \quad (5.13)$$

Assim como o balanço exergoeconômico, o exergoambiental dispõe de um número de equações menor do que o número de variáveis, fazendo com que se utilize das proposições auxiliares do método SPECO para se obter o número necessário de equações para cada componente do sistema.

Ainda é usado outros parâmetros para realização da avaliação dos componentes. Comumente usado, a diferença relativa do ecoindicador ($r_{b,k}$) é definida pela Eq. (5.14).

$$r_{b,k} = \frac{b_{f,k} - b_{p,k}}{b_{f,k}} \quad (5.14)$$

Segundo Marques (2018), valores altos para esse parâmetro significa que o

impacto ambiental causado pelo componente por ser reduzido facilmente quando se compara a equipamentos com baixo valor o mesmo parâmetro.

Também é utilizado o fator exergoambiental ($f_{b,k}$) para se avaliar a causa do impacto ambiental. O fator exergoambiental é determinado usando a Eq. (5.15).

$$f_{b,k} = \frac{Y_k}{Y_k + B_{D,k}} \quad (5.15)$$

Como se pode ver, na Eq. 5.15, esse parâmetro possibilita uma comparação entre o impacto causado pelo componente e o impacto gerado pela exergia destruída. Além disso, o fator exergoambiental demonstra qual componente do sistema causa o maior impacto ambiental, o que permite a realização de melhorias pontuais em um sistema.

CAPÍTULO VI

METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão descritos todos os aparatos utilizados na realização dos testes experimentais e o passo-a-passo empregado durante os experimentos. A metodologia experimental tem por finalidade detalhar o sistema térmico estudado, bem como identificar os equipamentos que foram usados e na medição dos parâmetros (temperatura, níveis de emissões gasosas e vazão de combustível) que suportam às análises energética (1º lei da termodinâmica), exergética (2º lei da termodinâmica), exergoeconômica e exergoambiental, propostas por este trabalho.

6.2 A METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados utilizando um sistema de trиграção composto por um grupo gerador a gás, um refrigerador por absorção e um trocador de calor de uma usina de biodiesel. Usou-se gás natural e biogás do aterro sanitário de João Pessoa como fonte de energia. Todos os equipamentos do sistema de trиграção e as práticas usadas durante o testes experimentais estão descritos abaixo.

6.2.1 O grupo gerador a gás

Os testes de geração de energia elétrica utilizando gás natural foram realizados em um grupo gerador a gás da marca Leon Heimer S/A, cujo motor de combustão interna é do ciclo Otto, da marca *General Motors*, ver Fig. 6.1.

Figura 6. 1 – Grupo gerador da Leon Heimer S/A.



Fonte: Autor.

As especificações técnicas desse grupo gerador a gás estão expostas na Tab. 6.1.

Tabela 6. 1 – Especificações técnicas do grupo gerador Leon Heimer.

Grupo gerador Leon Heimer	
Alimentação	Naturalmente aspirado
Governador de velocidade	Eletrônico
Taxa de compressão	9,1:1
Potência	100 KVA
Tipo de motor	4T
Número de cilindros	8 (V8)
Cilindrada total	8,1 L
Meio de refrigeração	Água
Rotação	1800 RPM
Frequência de geração	60 Hz
Tensão de saída do gerador	380 V (a 1800 RPM)
Regulagem do gás natural	Eletrônica
Ordem de ignição	1-8-7-2-6-5-4-3
Fator de potência do gerador elétrico	0,8

Fonte: Autor.

O grupo gerador conta, ainda, com um quadro de transferência de cargas que é usado para aplicar cargas elétricas durante os testes experimentais e verificar a tensão (com $\pm 2\%$ de precisão), corrente e frequência da geração, ver Fig. 6.2.

Figura 6. 2 – Quadro de transferência de cargas.



Fonte: Autor.

O quadro de transferência é operado de forma manual, ou seja, a aplicação de cargas depende do operador do grupo gerador. As cargas aplicadas ao grupo gerador são provenientes das instalações elétricas existentes na própria UFPB. A estrutura de acionamento das cargas é ilustrada na Fig. 6.3.

Figura 6. 3 – Estrutura de acionamento das cargas.



Fonte: Autor.

Pode-se ver, na Fig. 6.3, que ao aplicar carga elétrica ao grupo gerador, desliga-se, obrigatoriamente, a chave da rede convencional.

O grupo gerador conta também com um painel instalado em sua estrutura onde é possível verificar a pressão e temperatura do óleo, temperatura do fluido de

arrefecimento e indicadores de alerta da temperatura do fluido de arrefecimento e da pressão do óleo, ver Fig. 6.4.

Figura 6. 4 – Painel do grupo gerador Leon Heimer.



Fonte: Autor.

6.2.2 O Refrigerador por absorção

Conectado a tubulação de escapamento do grupo gerador Leon Heimer, há um refrigerador por absorção, como pode ser visto na Fig. 6.5.

O benefício de se instalar um refrigerador por absorção no escapamento de um grupo gerador é recuperar, através da cogeração, parte da energia que seria descartada ao meio ambiente. O refrigerador por absorção tem a função de produzir frio fazendo uso de uma fonte de calor, que nesse caso, são os gases de escape quentes proveniente do grupo gerador.

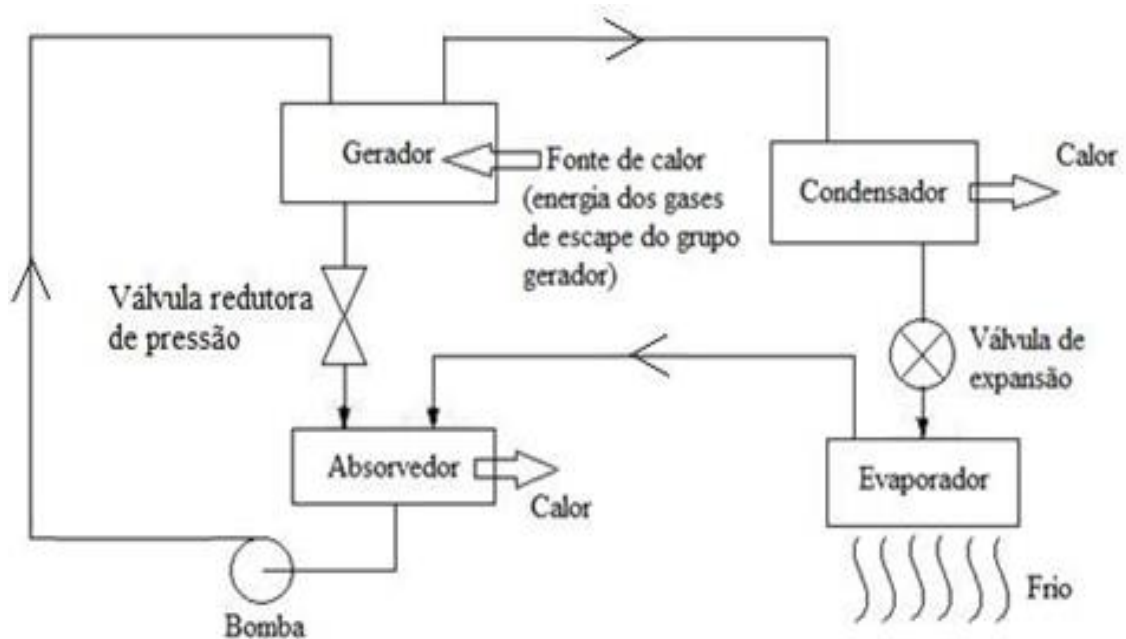
A figura 6.6 ilustra o princípio de funcionamento básico de um refrigerador por absorção.

Figura 6. 5 – Refrigerador por absorção conectado ao escapamento do grupo gerador.



Fonte: Autor.

Figura 6. 6 – Princípio de funcionamento do refrigerador por absorção.



Fonte: Autor.

Nesse refrigerador por absorção (visto de forma esquemática na Fig. 6.6) é usado o par água-amônia como fluido de trabalho. Na Fig. 6.6, a solução água-amônia é bombeada ao gerador, no qual ocorre a transferência de calor dos gases de escape para essa solução. Devido ao fornecimento de calor, tem-se a separação da água e da amônia no gerador. A água, no estado líquido, é direcionada à válvula redutora de pressão e posteriormente ao absorvedor. Por sua vez, a amônia, no estado gasoso, é encaminhada ao condensador para perder calor e voltar ao estado líquido. Ao sair do condensador, a amônia entra em uma válvula de expansão e em seguida no evaporador, onde ocorre a diminuição de sua pressão e temperatura e, conseqüentemente, dá-se a produção de frio. Após sair do evaporador a amônia é absorvida pela água através de uma reação química exotérmica, liberando calor, no absorvedor. Encerrando o ciclo de produção de frio, a solução água-amônia regressa a entrada da bomba.

Na Tab. 6.2 estão as principais informações relacionadas ao refrigerador por absorção usado neste trabalho.

Tabela 6. 2 – Principais características do refrigerador por absorção.

Fabricante	ROBUR
Modelo	ACF60-00
Capacidade de produção de frio	17,73 kW
Quantidade de calor necessária	27,81 kW
Temperatura da água de entrada	45°C
Temperatura da água de saída	3°C
Consumo de energia elétrica	0,75 kW

Fonte: Autor.

6.2.3 A usina de biodiesel

Além da produção de frio, a instalação do grupo gerador Leon Heimer dispõe de uma usina de biodiesel que aproveita, assim como o refrigerador por absorção, o calor existente nos gases de escape do motor (Fig. 6.7).

Figura 6. 7 – Usina de biodiesel.



Fonte: Cavalcante (2015).

O calor proveniente dos gases de escape é suficiente para substituir resistências elétricas que forneciam calor para o processo de produção do biodiesel. A cogeração se dá por meio de tubulações, bomba de óleo e trocadores de calor (Fig. 6.8), cuja função é permitir a transferência de calor entre os gases de escape e um óleo mineral, e entre esse óleo e a matéria prima usada na produção do biodiesel.

Figura 6. 8 – Trocador de calor da usina de biodiesel instalado no escapamento do grupo gerador Leon Heimer.

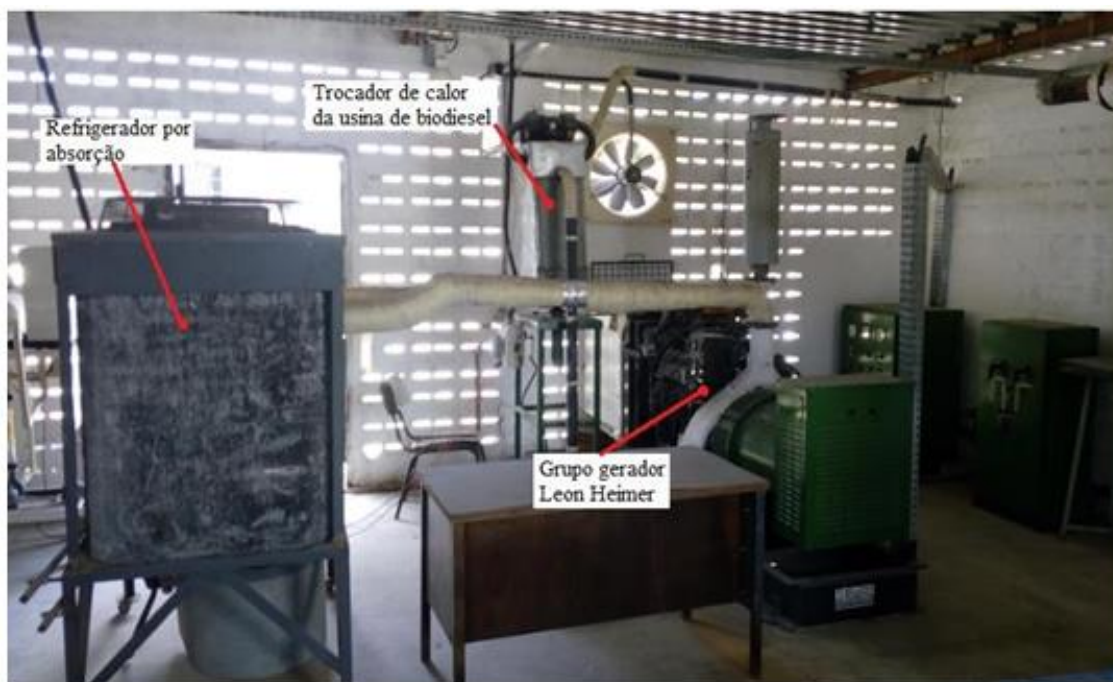


Fonte: Autor.

Os gases de escape que fornecem calor para o refrigerador por absorção descrito no item anterior, são direcionados a um trocador de calor que permite a transferência de energia dos gases de escape para um óleo mineral. Após sair desse trocador de calor, os gases de escape são encaminhados a atmosfera. O óleo mineral aquecido é bombeado até a usina de biodiesel onde fornece o calor recebido ao processo de produção de biodiesel.

Configura-se, portanto, um sistema de trigeração ou *combined cooling, heat and power* (CCHP), pois há um processo de produção combinada de energia elétrica, calor e frio, onde parte do calor produzido durante esse processo é usado em uma planta de cogeração para produção de frio e calor. Assim o sistema de trigeração é composto por um grupo gerador Leon Heimer, um refrigerador por absorção e o um trocador de calor da usina de biodiesel pode ser vista na Fig. 6.9.

Figura 6. 9 – Instalação completa do grupo gerador Leon Heimer, refrigerador por absorção e o trocador de calor da usina de biodiesel.



Fonte: Autor.

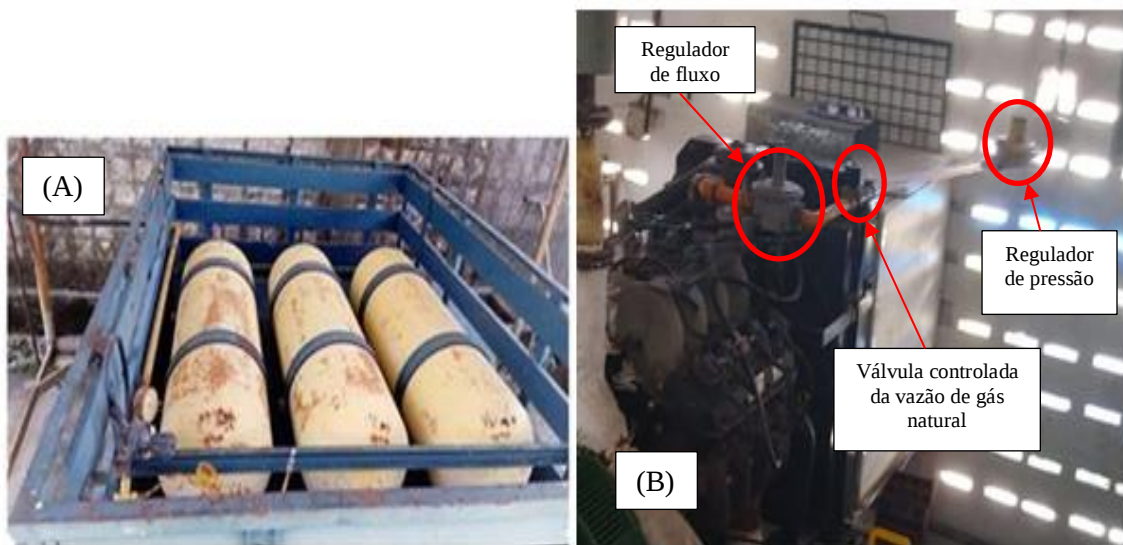
6.2.4 O sistema de fornecimento do gás natural

O gás natural que é usado durante os testes experimentais é armazenado em tanques, conforme a Fig. 6.10 (A). O fornecimento de gás natural ao motor se dá por meio da interligação dos tanques a reguladores de pressão, de fluxo e a válvula controladora da vazão de gás natural, conforme Fig. 6.10 (B).

A interligação entre os componentes do sistema de fornecimento de gás natural se dá através de tubulações e mangueiras. A válvula controladora da vazão de gás natural e os reguladores de fluxo e pressão têm a função de dosar a quantidade necessária de gás natural para o funcionamento do grupo gerador, independente da carga aplicada.

O sistema de fornecimento de gás natural tem uma válvula de bloqueio, ver Fig. 6.11, que é aberta quando se deseja ligar o grupo gerador e é fechada quando se quer desligar o grupo gerador.

Figura 6. 10 – Os tanques de armazenamento de gás natural, os reguladores de fluxo e pressão e a válvula controladora da vazão de gás natural.



Fonte: Autor.

Figura 6. 11 – Válvula de bloqueio.



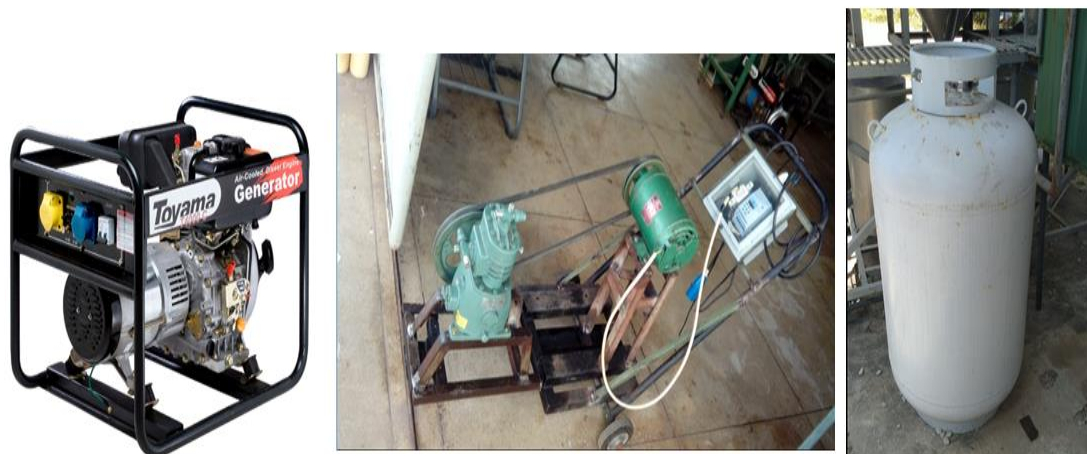
Fonte: Autor.

6.2.5 O sistema de coleta e armazenamento de biogás

O sistema de captação e armazenamento para o biogás desenvolvido durante este

trabalho é composto por um tanque P-190, um sistema de compressão e um grupo gerador a diesel de 3 kVA, ver Fig. 6.12.

Figura 6. 12 – Sistema de captação e armazenamento para biogás.



Fonte: Autor.

O sistema de compressão é constituído por um compressor da marca Bitzer, modelo Typ III, um motor elétrico trifásico da marca WEG, potência de 1,5 cv, e um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW 08. O inversor de frequência tem a função nesse sistema de converter a geração monofásica do grupo gerador a diesel, da marca Toyama, em trifásica, além de controlar a velocidade de rotação do motor elétrico com a finalidade de diminuir a vibração da correia que conecta as polias do compressor e do motor elétrico. Compõe também o sistema de compressão um conjunto de mangueiras e um separador de óleo que é instalado na saída do compressor. Além de reter o óleo na saída do compressor, o separador de óleo é instalado de maneira que o óleo capturado retorne ao compressor.

O grupo gerador a diesel, de 3 kVA, tem a incumbência de gerar energia ao sistema de compressão e armazenamento, visto que a coleta do biogás será em um lugar remoto onde há grande chance de não ter energia elétrica disponível.

Antes do sistema ser transportado ao aterro sanitário e de se efetuar a coleta do biogás realizou-se testes de estanqueidade do sistema ao comprimir ar atmosférico para o tanque P-190. Posteriormente, foi usado o próprio sistema de compressão para retirar todo

o ar de dentro do tanque P-190 e criar vácuo, para que biogás não fosse diluído no ar durante o armazenamento.

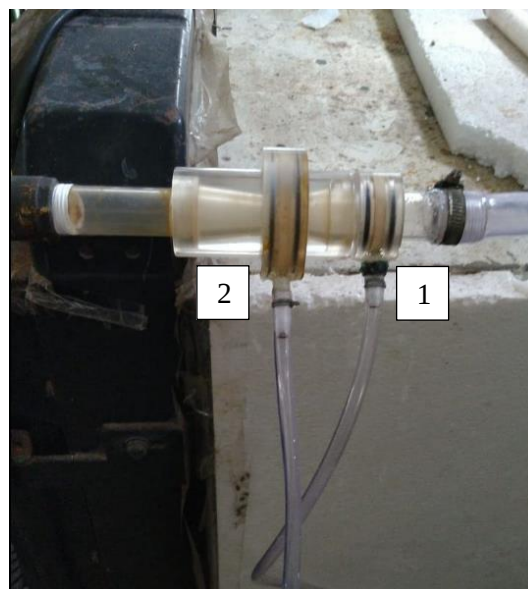
6.2.6 O sistema de fornecimento de biogás

O sistema de fornecimento de biogás ao motor do sistema de trиграção se deu através da mesma tubulação usada no sistema de fornecimento do gás natural. A única mudança nesse sistema foi a troca dos cilindros de gás natural pelo cilindro P-190 com biogás do aterro sanitário de João Pessoa – PB.

6.2.7 O sistema de medição da vazão de combustível

Para medição da vazão de combustível foi utilizado um tubo de Venturi cujo diâmetro da seção maior é 21,5 mm e o da menor é 14 mm, conforme ilustrado na Fig. 6.13.

Figura 6. 13 – O tubo de Venturi usado neste trabalho.



Fonte: Autor.

O funcionamento do tubo de Venturi pressupõe o uso de um medidor de pressão capaz de medir a diferença de pressão entre dois pontos (um ponto na seção de área menor

e outro na seção de área maior). Como o tubo de venturi utilizado não tinha nenhum dispositivo capaz de medir essa diferença de pressão foi desenvolvido durante esse trabalho um manômetro em U, onde suas extremidades foram fixadas aos conectores das tomadas de pressão do tubo de Venturi, como pode ser visto na Fig. 6.13.

O tubo de Venturi usado foi instalado antes da válvula controladora da vazão de combustível e depois do redutor de pressão. Para determinação da vazão mássica (Q) de combustível que está sendo consumido pelo grupo gerador é necessário usar a Eq. 6.3 que é obtida a partir da combinação da equação de Bernoulli (Eq. 6.1), que descreve o princípio da conservação da energia para um fluido em movimento, com a equação que define a vazão mássica de um fluido (Eq. 6.2).

$$\frac{P_1}{\rho_{Gas}} + \frac{V_1^2}{2} + Z_1 g = \frac{P_2}{\rho_{Gas}} + \frac{V_2^2}{2} + Z_2 g \quad (6.1)$$

$$Q = \rho_{Gas} * V * A \quad (6.2)$$

$$Q = A_1 * \rho_{Gas} * C_d * \sqrt{\frac{2 * h * \rho_{H_2O} * g}{\rho_{Gas} * \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}} \quad (6.3)$$

O termo C_d é o coeficiente de descarga do tubo de Venturi. Esse termo é incluído na equação (Eq. 6.3) com intuito de se corrigir os parâmetros medidos devido a contração da veia líquida e perda de carga (Almeida et al., 2018). Na Eq. 6.3, o termo A_2 é a área da seção transversal no ponto 2 (menor diâmetro), A_1 é a área da seção transversal no ponto 1 (maior diâmetro), h é a diferença de altura do fluido manométrico (água) no tubo em U, ρ_{Gas} é a massa específica do gás combustível, ρ_{H_2O} é a massa específica da água e g é a aceleração da gravidade.

O C_d é determinado usando a metodologia descrita proposta por Hutagalung (2019). Para se determinar o C_d usando essa metodologia é necessário usar o número de Reynolds do escoamento (Eq. 6.4) e a relação entre os diâmetros do tubo de Venturi em uma tabela (Tab. 6.3).

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (6.4)$$

Tabela 6. 3 – Valores de coeficientes de descarga.

Discharge Coefficient (C_d)				
Diameter Ratio d/D	Reynolds Numbers			
	10^4	10^5	10^6	10^7
0,2	0,968	0,988	0,994	0,995
0,4	0,957	0,984	0,993	0,995
0,6	0,95	0,981	0,992	0,995
0,7	0,94	0,978	0,991	0,995

Fonte: Hutagalung (2019).

6.2.8 Banco de cargas

Para aplicação de cargas ao grupo gerador Leon Heimer foi necessário projetar e construir um banco de cargas com capacidade de consumo de 70 kW. Os cálculos relacionados ao projeto do banco de cargas pode ser visto no Apêndice III.

O banco de cargas é constituído por resistências elétricas que ficam dispostas em cima de uma manta cerâmica, ver Fig. 6.14.

A manta cerâmica, por sua vez, é fixada em uma estrutura de madeira que possui uma cobertura como se pode ver na Fig. 6.14. Ao todo, foram confeccionadas 27 resistências com um fio de níquel-cromo que possui resistência elétrica de $5,5 \Omega/m$. Cada uma das resistências é capaz de dissipar 2,5926 kW quando são alimentadas por 380V em ligação trifásica.

Figura 6. 14 – Banco de cargas.

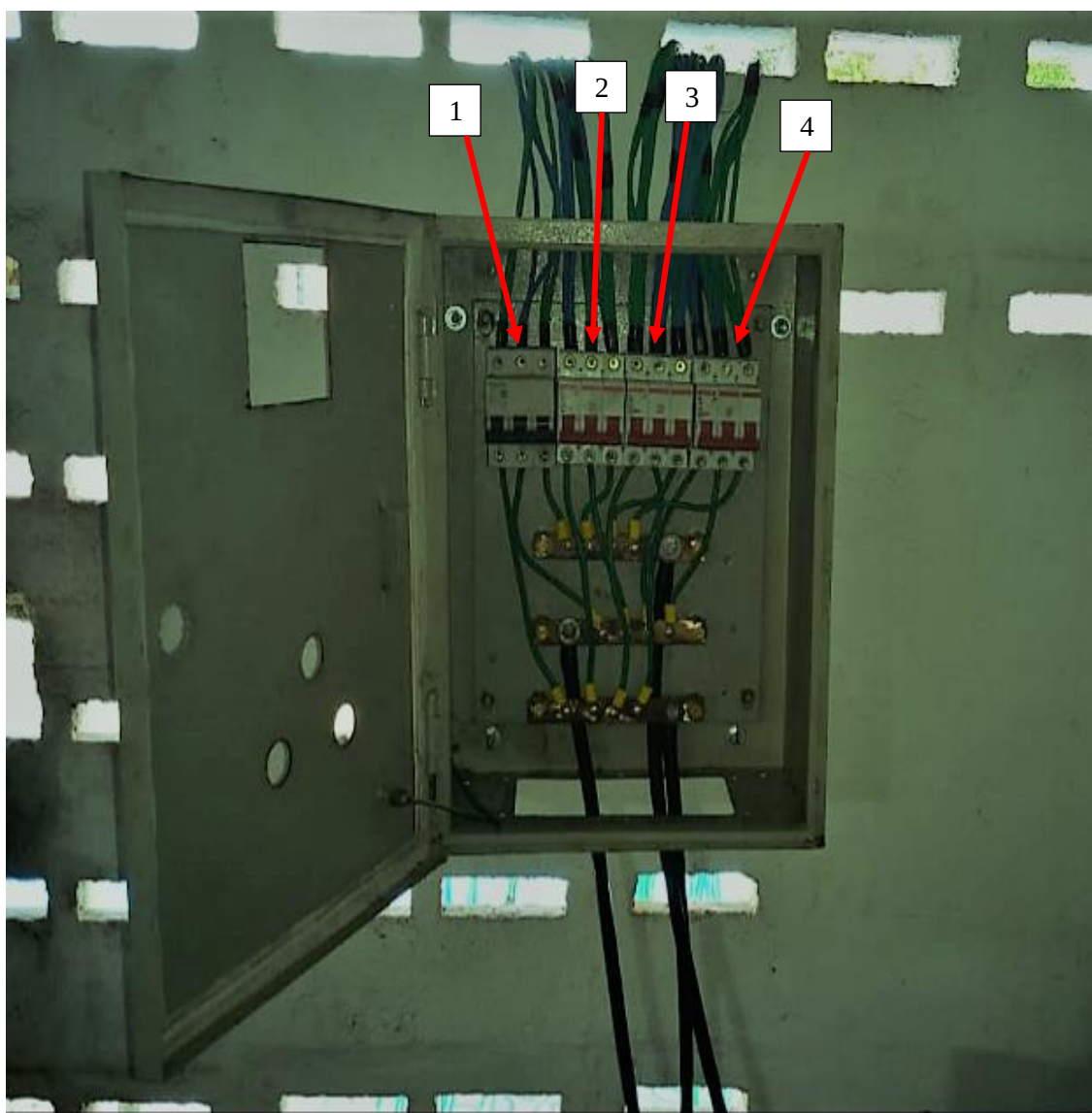


Fonte: Autor.

As resistências são conectadas a disjuntores que são responsáveis pelo acionamento das cargas elétricas. Ao todo, foram instalados cinco disjuntores trifásicos para acionar as resistências, ver Fig. 6.15.

O disjuntor (1) aciona três resistências elétricas (o que resulta na aplicação de 7,8 kW de carga ao gerador elétrico), o disjuntor (2) liga seis resistências (15,55 kW), o disjuntor (3), conecta nove resistências elétricas (23,33 kW) e por último, o disjuntor (4) também interliga nove resistências (23,33 kW). Quando todos os disjuntores estiverem ligados, 70 kW de carga elétrica será imposta ao grupo gerador Leon Heimer.

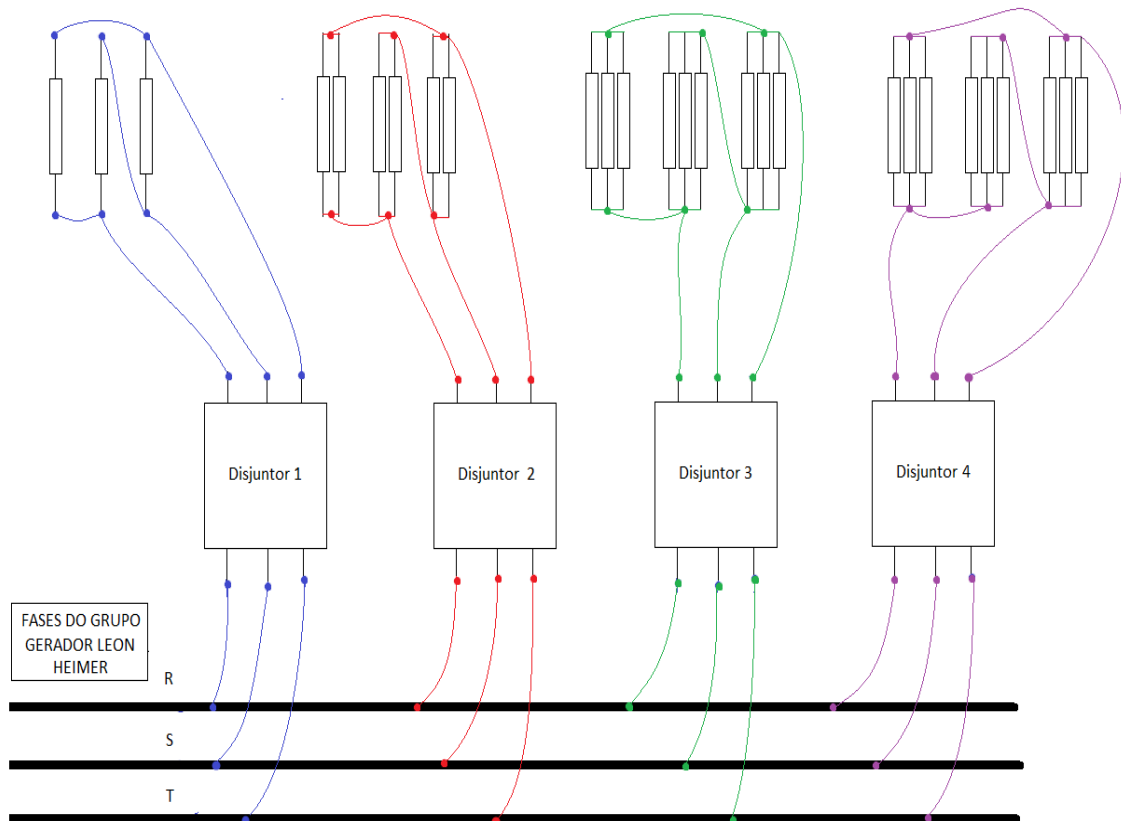
Figura 6. 15 – Quadro de comando do banco de cargas.



Fonte: Autor.

As resistências elétricas foram ligadas em delta, conforme a Figura 6.16. As cargas estipuladas – ao acionar as resistências elétricas – que são aplicadas ao grupo gerador Leon Heimer tem por base de cálculo a consideração de que a tensão de saída do gerador seja 380 V. Caso a tensão de saída do grupo gerador seja maior do que essa referência, a potência gerada por cada resistência será maior, e caso seja o inverso, a tensão de saída menor do que a referência, a potência também será menor.

Figura 6. 16 – Esquema elétrico da ligação das resistências elétricas.



Fonte: Autor.

Todas as resistências elétricas foram confeccionadas em formato de espiral e de serpentina para que a necessidade de área termicamente isolada fosse a menor possível, pois assim os custos com o isolante térmico (manta cerâmica) seriam menores.

6.2.9 A medição dos níveis das emissões gasosas

O fator lambda e os níveis de monóxido de carbono (CO), oxigênio (O₂), hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de carbono (CO₂) foram medidos usando um analisador de gases, da Alfatest, modelo Discovery G4, ver Figura 6.17.

Figura 6. 17 – O analisador de gases.



Fonte: Autor.

O analisador de gases precisa estar conectado a um computador que possua o software desse equipamento. Na tela do software é possível visualizar, em tempo real, os níveis das emissões gasosas e o fator lambda.

6.2.10 A medição de temperatura ao longo do sistema de trigeração

A medição das temperaturas ao longo de todo o sistema de trigeração se deu através do uso de termopares do tipo K, precisão $\pm 0,75 \%$, e de um termômetro infravermelho digital tipo pistola, modelo GM300, precisão de $\pm 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, como os da Fig. 6.18.

Figura 6. 18 – Termopares.



Fonte: Autor.

No sistema de trigeriação as temperaturas foram medidas com intuito de calcular as quantidade de calor que seriam recuperadas pelo refrigerador por absorção e pela usina de biodiesel. Assim, foi medido as temperaturas nos seguintes pontos: entrada dos gases de escape no refrigerador por absorção; saída dos gases de escape do refrigerador por absorção; entrada do óleo no trocar de calor da usina de biodiesel e na saída do óleo do trocador de calor da usina.

6.2.11 A realização dos testes experimentais

Antes de realizar os testes experimentais, buscou-se realizar testes preliminares com intuito de verificar a funcionalidade de todos os equipamentos do sistema de refrigeração e dos dispositivos de medição. Os testes preliminares também serviram para determinar a sequência de passos necessária para o levantamento dos dados requeridos para o desenvolvimento das análises propostas por este trabalho.

Adotou-se a seguinte sequência:

- Acionamento de todos os equipamentos periféricos do sistema de trigeriação (bombas d'água, bomba da solução água-amônia e inversores de frequência), do analisador de gases e dos registradores de temperatura.
- Liberação do gás combustível no sistema de fornecimento do gás natural ou do biogás
- Dá-se, então, partida do motor do grupo gerador Leon Heimer

- Esperou-se o motor atingir a temperatura de regime (80-90 °C) enquanto funcionava sem nenhuma carga.
- Adicionou-se cargas ao motor até atingir a potência máxima do grupo gerador
- Após atinginr carga máxima, aguardou-se até as temperaturas ao longo do sistema de trigerção se estabilizassem (alcançar o regime permanente), o que foi estabelecido após 5-6 minutos de funcionamento.
- Registrou-se as temperaturas ao longo do sistema de geração (pontos ilustrados na Fig. 6.19), a vazão de gás natural, a tensão de saída do gerador, a composição dos gases de escape e valor do fator lambda.

CAPÍTULO VII

MODELAGEM TERMOECONÔMICA E AMBIENTAL

7.1 INTRODUÇÃO

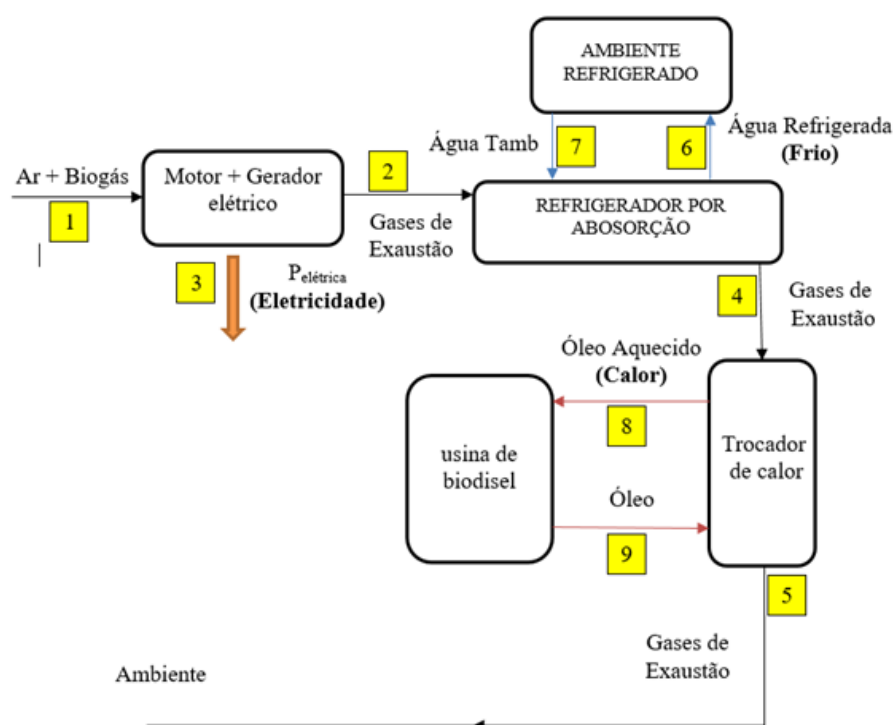
Este capítulo elucida a modelagem e os critérios usados por este trabalho no desenvolvimento das análises energética, exergoeconômica e exergoambiental. São definidos os volumes de controle – a partir da esquematização do sistema de trigeração, conforme descrito no capítulo VI – que são usados na determinação das equações correspondentes as análises exergoeconômica e exergoambiental.

7.2 A ANÁLISE ENERGÉTICA

A análise energética do sistema de trigeração usando gás natural e biogás do aterro sanitário de João Pessoa – PB foi elaborada, usando conceitos da 1ª lei da termodinâmica, com vistas em se identificar e propor possíveis melhorias técnicas nos equipamentos estudados por este trabalho. A análise de desempenho tem por base as especificações técnicas do grupo gerador Leon Heimer, do refrigerador por absorção e da usina de biodiesel, nas medições de dados experimentais e nos valores calculados dos parâmetros de desempenho definidos no capítulo II deste trabalho e na literatura técnica. Os dados experimentais estão relacionados com as medições de temperatura ao longo do sistema de trigeração, ver Fig. 7.1, da vazão de combustível e dos níveis das emissões gasosas.

Nessa análise também é dado um destaque especial ao desempenho do sistema de coleta e armazenamento de biogás, desenvolvido neste trabalho, durante a coleta no aterro sanitário de João Pessoa e aos primeiros testes experimentais do sistema de trigeração utilizando o biogás coletado pois é a primeira vez que se utiliza esse combustível como fonte de energia no sistema.

Figura 7. 1 - Esquema do sistema de trigeriação.



Fonte: Autor.

A Fig. 7.1 ilustra o sistema de trigeriação e a localização dos pontos usados nas análises propostas por este trabalho. O ponto 1 se refere as propriedades da mistura ar e combustível (gás natural ou biogás) e nele foram medidos a vazão de combustível e a temperatura. Os dados levantados no ponto 1 possibilitam o cálculo da quantidade de energia fornecida ao sistema que foi usada na fórmula do rendimento do grupo gerador e do sistema de trigeriação. O ponto 2 corresponde a saída dos gases de escape do grupo gerador que estão sendo encaminhados ao refrigerador por absorção. Nesse ponto foi medido apenas a temperatura. A produção de energia elétrica foi medida no ponto 3, que é o produto do grupo gerador. O ponto 4 representa a condição dos gases de escape ao saírem do refrigerador por absorção em direção a entrada do trocador de calor. Registrou-se a temperatura medida no ponto 4. No ponto 5 foram medidos os níveis das emissões gasosas do sistema de trigeriação e a temperatura. A condição termodinâmica da saída da água resfriada pelo refrigerador por absorção é retratada pelo ponto 6. O ponto 7 representa o retorno da água ao refrigerador por absorção. O ponto 8 caracteriza o estado em que o óleo sai do trocador de calor após retirar calor dos gases de escape e o ponto 9

é o retorno desse óleo vindo da usina de biodiesel. Tanto no ponto 8 quanto no ponto 9 foram medidas as temperaturas do óleo.

A usina de biodiesel não estava em operação durante o período dos testes experimentais devido a questões financeiras, pois era necessário a aquisição de matéria-prima e de se executar serviços de manutenção em toda sua instalação. Logo não foi possível mensurar a produção de biodiesel a partir da recuperação de calor proveniente do sistema de trigeriação. No entanto, foi possível calcular, através da Eq. 7.1, o calor fornecido à usina de biodiesel (Q_{usina}) usando os dados experimentais referentes as temperaturas de entrada (T_e) e de saída (T_s) do trocador de calor da usina, a vazão mássica ($\dot{m}_{\text{óleo}}$) e o calor específico do óleo ($c_{\text{óleo}}$) usado para transportar o calor.

$$Q_{usina} = c_{\text{óleo}} * \dot{m}_{\text{óleo}}(T_s - T_e) \quad (7.1)$$

A partir do calor recuperado pelo trocador de calor da usina e tendo por base a energia necessária para produzir 1 kg/h de biodiesel usando óleo de canola encontrado no trabalho desenvolvido por León (2018), que equivale a 0,27 kWh de calor, calculou-se a capacidade de geração de biodiesel pela usina.

O calor recuperado pelo refrigerador de absorção (Q_{refrig}) foi calculado utilizando a Eq. 7.2.

$$Q_{\text{refrig}} = \dot{m}_{\text{gasesc}} \int_{T_{E\text{refrig}}}^{T_{S\text{refrig}}} c(T) * dT \quad (7.2)$$

Os termos $\dot{m}_{\text{gasesc}}$, $T_{E\text{refrig}}$, $T_{S\text{refrig}}$, $c(T)$ e dT são definidos como a vazão mássica dos gases de escape, as temperaturas de entrada e de saída dos gases de escape ao passar pelo refrigerador por absorção, o calor específico dos gases de escape em função da temperatura e a variação infinitesimal da temperatura dos gases de escape, respectivamente.

A produção de frio pelo refrigerador por absorção (Q_{Frio}) foi calculado usando a Eq. (7.3), o coeficiente de performance (β) fornecido pelo fabricante do refrigerador por absorção (1,759) e o calor proveniente dos gases de escapes que foi recuperado pelo refrigerador de absorção (Q_{refrig}).

$$\beta = \frac{Q_{\text{Frio}}}{Q_{\text{refrig}} - Q_{\text{Frio}}} \quad (7.3)$$

Também é incluído na análise energética a análise dos níveis das emissões gasosas do sistema de trigeriação a partir dos dados experimentais medidos usando o analisador de gases descrito no capítulo anterior.

7.3 A ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA

Por sua vez, a análise exergoeconômica tem por base a 2ª lei da termodinâmica e é fundamentada nos cálculos das exergias através da Eq. (7.4) e dos resultados dos testes experimentais.

$$Exergia_n = (h_n - h_0) - T_0(s_n - s_0) \quad (7.4)$$

Na Eq. (7.4), o subscrito “n” representa o ponto no sistema de trigeriação, “h” é a entalpia e “s” a entropia. Já o subscrito “0” simboliza o estado de referência, o qual é estabelecido neste trabalho como sendo um estado a 25 °C e 101,15 kPa.

As exergias calculadas estão relacionadas com os pontos ao longo do sistema de trigeriação definidos na Fig. 7.1.

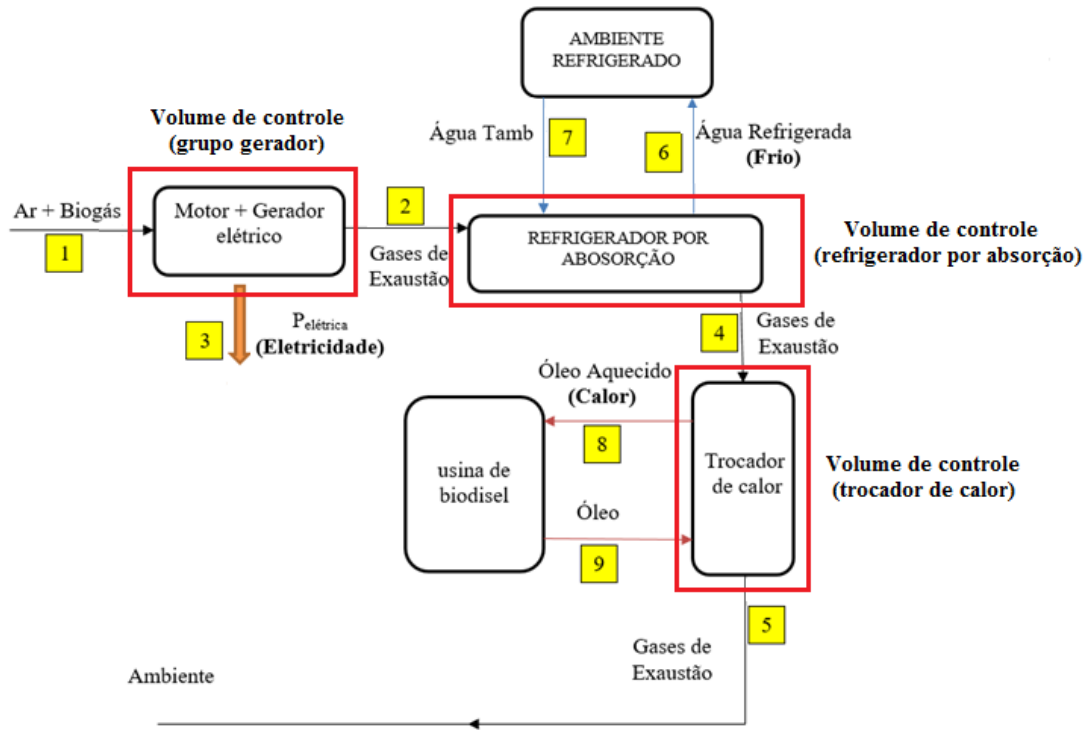
A exergia da mistura ar e gás natural foi determinada usando a Eq. (7.5), que é a exergia química do combustível (*ExGas*).

$$ExGas = \frac{\sum x_k e_k^{comp} + \bar{R} T_0 \sum x_k \ln x_k}{M} \quad (7.5)$$

Onde “x” é a fração molar de cada elemento “k” que compõe o gás natural, “ e_k^{comp} ” é a exergia química por mol do componente “k”, “ $\bar{R}$ ” é a constante universal dos gases, “ T_0 ” é a temperatura de referência e “M” é a massa molecular calculada do gás natural.

Com os valores das exergias determinados em cada ponto escolhido no sistema de trigeriação e considerando os volumes de controle, ver Fig. 7.2, concebeu-se as equações exergoeconômicas que estão relacionadas com o grupo gerador, o refrigerador por absorção e o trocador de calor da usina.

Figura 7. 2 - Volumes de controles usados no desenvolvimento das equações exergoeconômicas.



Fonte: Autor.

As equações exergoeconômicas e exergoambientais foram desenvolvidas usando o método SPECO e os princípios F e P, descritos anteriormente no capítulo V, e as equações auxiliares que foram elaboradas tendo por base as equações e considerações definidas por base Bejan et al. (1996). As equações exergoeconômicas desenvolvidas para cada um dos dispositivos do sistema de trigeriação, Eqs. 7.6 – 7.34, estão expostas abaixo.

- **Volume de controle (grupo gerador)**

Balanço exergoeconômico:

$$(c_3 * Ex_3) + (c_2 * Ex_2) = (c_1 * Ex_1) + Z_{grupogenerator} \quad (7.6)$$

Equações auxiliares – Princípio F:

$$c_1 = c_2 \quad (7.7)$$

$$c_3 = \frac{(c_1 * Ex_1) + Z_{grupogenerator} - (c_2 * Ex_2)}{Ex_3} \quad (7.8)$$

Exergia do produto e do insumo:

$$Ex_{P_{grupogenerator}} = Ex_3 \quad (7.9)$$

$$Ex_{F_{grupogenerator}} = Ex_1 - Ex_2 \quad (7.10)$$

Taxa de custo do produto e do insumo:

$$\dot{C}_{P_{grupogenerator}} = C_3 \quad (7.11)$$

$$\dot{C}_{F_{grupogenerator}} = C_1 - C_2 \quad (7.12)$$

- **Volume de controle (refrigerador por absorção)**

Balanço Exergoeconômico:

$$(c_4 * Ex_4) + (c_6 * Ex_6) = (c_2 * Ex_2) + (c_7 * Ex_7) + Z_{refrig} \quad (7.13)$$

Equações auxiliares – Princípio F:

$$c_2 = c_4 \quad (7.14)$$

$$c_7 = c_6 \quad (7.15)$$

$$c_6 = \frac{(c_2 * Ex_2) + Z_{refrig} - (c_4 * Ex_4)}{Ex_6 + Ex_7} \quad (7.16)$$

Exergia do produto e do insumo:

$$Ex_{P_{refrig}} = Ex_6 - Ex_7 \quad (7.17)$$

$$Ex_{F_{refrig}} = Ex_2 - Ex_4 \quad (7.18)$$

Taxa de custo do produto e do insumo:

$$\dot{C}_{P_{refrig}} = \dot{C}_6 - \dot{C}_7 \quad (7.19)$$

$$\dot{C}_{F_{refrig}} = \dot{C}_2 - \dot{C}_4 \quad (7.20)$$

- **Volume de controle (trocador de calor da usina)**

Balanço exergoeconômico:

$$(c_5 * Ex_5) + (c_8 * Ex_8) = (c_4 * Ex_4) + (c_9 * Ex_9) + Z_{trocador} \quad (7.21)$$

Equações auxiliares – Princípio F:

$$c_4 = c_5 \quad (7.22)$$

$$c_8 = c_9 \quad (7.23)$$

$$c_8 = \frac{(c_4 * Ex_4) + Z_{trocador} - (c_5 * Ex_5)}{Ex_8 - Ex_9} \quad (7.24)$$

Exergia do produto e do insumo:

$$Ex_{P_{trocador}} = Ex_8 - Ex_9 \quad (7.25)$$

$$Ex_{F_{trocador}} = Ex_4 - Ex_5 \quad (7.26)$$

Taxa de custo do produto e do insumo:

$$\dot{C}_{P_{trocador}} = \dot{C}_8 - \dot{C}_9 \quad (7.27)$$

$$\dot{C}_{F_{trocador}} = \dot{C}_4 - \dot{C}_5 \quad (7.28)$$

- **Outras variáveis exergoeconômicas**

Eficiência exergética:

$$\varepsilon = \left(\frac{Ex_{P_{equipamento}}}{Ex_{F_{equipamento}}} \right) * 100 \quad (7.29)$$

Destruição da exergia:

$$Ex_{D_{equipamento}} = Ex_{F_{equipamento}} - Ex_{P_{equipamento}} \quad (7.30)$$

Custo médio dos produtos e dos insumos:

$$C_{P_{equipamento}} = \frac{\dot{C}_{P_{equipamento}}}{Ex_{P_{equipamento}}} \quad (7.31)$$

$$C_{F_{equipamento}} = \frac{\dot{C}_{F_{equipamento}}}{Ex_{F_{equipamento}}} \quad (7.32)$$

Taxa de custo da destruição da exergia:

$$\dot{C}_{D_{equipamento}} = C_{F_{equipamento}} * Ex_{D_{equipamento}} \quad (7.33)$$

Diferença relativa dos custos médios dos produtos e dos insumos:

$$r_{k_{equipamento}} = \frac{C_{P_{equipamento}} - C_{F_{equipamento}}}{C_{F_{equipamento}}} \quad (7.34)$$

Relacionado aos custos exergéticos estão os dados que foram usados como entrada nos cálculos exergoeconômicos e que constam na Tab. 7.1.

Tabela 7. 1 - Dados de entrada no cálculo dos custos exergeticos.

Descrição	Valor	Fonte
Tarifa GN Geração Distribuída (R\$/m ³)	2,1240	PBGas (04/2020)
Custo do específico do ar (R\$/kJ)	0	Autor
Custo investimeno grupo gerador (R\$)	100.000	Autor
Custo investimento do refrigerador (R\$)	30.000	Marques (2018)
Custo de investimento da usina (R\$)	25.000	Marques (2018)
Custo sistema de recuperação de calor da Usina (R\$)	1320	Marques (2018)
Taxa de juros (%)	6	Autor
Vida útil dos equipamentos (anos)	20	Autor
Dias úteis (dia/ano)	250	Autor
Quantidade de operador do sistema (unidade)	1	Autor
Salário bruto do operador ⁹ (R\$/ano)	37.500	Autor
Horas em operação do sistema por dia (h/dia)	8	Autor
Fator de manutenção dos equipamentos (%)	6	Marques (2018)

Fonte: Autor.

Como o ar não tem custo para o sistema de trigeriação, foi estabelecido o valor de 0 R\$/kJ. O custo de investimento do grupo gerador (R\$ 100.000) inclui, além do custo de compra do equipamento, o custo de sua instalação no Laboratório de Cogeração. A vida útil do sistema de trigeriação (20 anos), tem por base a vida útil do grupo gerador e o cumprimento das ações de manutenção preventiva em todos os equipamentos. A quantidade de dias úteis no ano (quantidade de dias de operação do sistema) foi determinada levando-se em conta os dias úteis em 2020 e a quantidade de horas em operação por dia, 8 horas. O funcionamento do sistema de trigeriação requer um operador cuja função, além de operar, é executar os procedimentos de manutenção.

Cabe destacar, aqui, que o custo total do equipamento considera, além do custo de investimento, o fator de recuperação de capital. O fator de recuperação de capital

⁹ O salário bruto anual do operador do sistema é composto por um salário mensal de R\$ 2.000, férias e décimo terceiro.

(FRC) é definido pela Eq. (6.5).

$$FRC = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (7.35)$$

Os termos “i” e “N” na E. (7.35) são a taxa de juros e a vida útil do equipamento, respectivamente. Buscou-se usar um valor da taxa de juros neste trabalho (6%) igual ao fator de manutenção dos equipamentos. O custo total (Z) do equipamento (n) é então definido pela Eq. (7.36).

$$Z_n = CA + CM + CO = \frac{GA*FRC}{Du*Ho} + \frac{GM*FRC}{Du*Ho} + \frac{GT}{Du*Ho} \quad (7.36)$$

Na equação acima, o termo “CA”, “CM” e “CO” representam os custos com aquisição, manutenção e operação, respectivamente. Os termos “GA”, “GM” e “GT” significam os gastos anuais com aquisição, com manutenção, com gás natural e com trabalhador e as siglas “Du” e “Ho” são os dias úteis por ano e a quantidade de horas em operação por dia, respectivamente.

A partir dos custos exergéticos e da análise exergoeconômica, desenvolveu-se uma análise dos custos de geração de energia elétrica (CE), frio (CF) e calor (CC) do sistema de trigeriação utilizando as Eqs. (7.37), (7.38) e (7.39).

$$CE = \frac{Z_{GrupoGerador}}{E} + \frac{GGN}{E} + \frac{\left(\frac{Ex_1 - Ex_2}{Ex_1} + \frac{Ex_5}{3*Ex_1}\right)*GT}{E} \quad (7.37)$$

$$CF = \frac{Z_{Refrigerador}}{F} + \frac{\left(\frac{Ex_2 - Ex_4}{Ex_1} + \frac{Ex_5}{3*Ex_1}\right)*GT}{F} \quad (7.38)$$

$$CC = \frac{Z_{CalorUsina}}{C} + \frac{\left(\frac{Ex_4 - Ex_5}{Ex_1} + \frac{Ex_5}{3*Ex_1}\right)*GT}{C} \quad (7.39)$$

Os componentes “E”, “F” e “C” significam a energia elétrica líquida, a quantidade de frio e a quantidade de calor fornecido para a usina de biodiesel gerados pelo sistema de trigeriação estudado por um ano. O termo “GGN” representa o gasto com gás natural usado no sistema de trigeriação. Os termos entre parênteses, das equações

acima, representam os percentuais do gasto com trabalhador que é atribuído a cada um dos produtos do sistema de trigeriação (energia elétrica, frio e calor). Esses termos foram definidos levando-se em conta o consumo de exergia do gás natural por cada um dos equipamentos que compõe o sistema somada a parcela de exergia descartada para o o meio ambiente, que é divida igualmente aos três componentes do sistema. “ Ex_n ” é a exergia calculada para o ponto “n” cuja localização é definida na descrição do sistema de trigeriação, ver Fig. 7.2.

7.4 A ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL

A análise exergoambiental inicia-se a partir dos fluxos exergéticos calculados para os pontos do sistema de trigeriação utilizando as equações definidas anteriormente neste item.

A ACV aplicada a este trabalho tem por base o levantamento de dados e o desenvolvimento de uma ACV realizada por Marques (2018). Marques (2018) desenvolveu, a partir de simulações, uma análise exergoambiental envolvendo o mesmo sistema de trigeriação usado por este trabalho.

Assim, a ACV usada neste trabalho, usa os dados encontrados e considerações feitas por Marques (2018), que estão relacionados com os mesmos equipamentos do sistema de trigeriação estudado por este trabalho. Esses dados estão expostos na Tab. 7.2.

A ACV elaborada por Marques (2018) usou, ainda, o software *SimaPro*, versão 8.4, da *Pré Consultants*, na determinação dos valores do impacto ambiental de cada componente do sistema, $\dot{Y}_k$. Esse software segue os critérios estabelecidos pelas Normas ABNT BRN ISO 14044 e 14040. Os valores de impactos ambientais usados neste trabalho, para cada um dos equipamento, para o ar atmosférico e para o gás natural, e que foram obtidos por Marques (2018), estão expostos na Tab. 7.3.

Os valores relacionados ao impacto ambiental causado pelos gases de exaustão expelidos pelo motor do grupo gerador Leon Heimer foram calculados através da composição da gasosa e do ecoindicador 99 relativo a cada um dos componentes gasosos. Os ecoindicadores 99 usados neste trabalho estão expostos na Fig. 5.2.

Tabela 7. 2 - Dados de entrada na ACV.

Equipamento	Materiais de fabricação	%	Peso total (kg)	Roteiro	Distância (km)	Descarte
Grupo gerador Leon Heimer 100 kVA	Ferro fundido	60	500	Recife – João Pessoa	120	Aterro Sanitário de João Pessoa
	Aço carbono	20				
	Cobre	15				
	Alumínio	5				
Refrigerador por absorção	Aço carbono	72	362	Bahia – João Pessoa	950	Aterro Sanitário de João Pessoa
	Alumínio	13				
	cobre	12				
	Ferro fundido	1				
	Borracha	1				
	Aço galvanizado	1				
Trocador de calor da Usina	Aço carbono	80	50	NA	Feito no Laboratório	Aterro Sanitário de João Pessoa
	Aço galvanizado	15				
	Cobre	5				

Fonte: Marques (2018)

Tabela 7. 3 - Valores de impactos ambientais.

Equipamento/Insumo	Impacto ambiental
Ar	0 mPts/kJ
Gás natural	166 mPts/m ³
Grupo gerador Leon Heimer	88,5 Pts/ano
Refrigerador por absorção	39,5 Pts/ano
Trocador de calor da usina	5 Pts/ano

Fonte: Marques (2018).

As equações exergoambientais desenvolvidas para todos os componentes do sistema de trigeriação, Eqs. 7.40 – 7.60 , consideram os mesmos volumes de controles usados na concepção das equações exergoeconômica que estão apresentadas na Fig. 7.2.

- **Volume de controle (grupo gerador)**

Balanço exergoambiental:

$$(b_1 * Ex_1) + Y_{motor} = (b_2 * Ex_2) + (b_3 * Ex_3) \quad (7.40)$$

$$b_3 = \frac{(b_1 * Ex_1) + Y_{motor} - (b_2 * Ex_2)}{Ex_3} \quad (7.41)$$

Taxa de impacto ambiental do produto e do insumo:

$$B_{P_{motor}} = B_3 \quad (7.42)$$

$$B_{F_{motor}} = B_1 - B_2 \quad (7.43)$$

- **Volume de controle (refrigerador por absorção)**

Balanço exergoambiental:

$$(b_2 * Ex_2) + (b_7 * Ex_7) + Y_{refrig} = (b_6 * Ex_6) + (b_4 * Ex_4) \quad (7.44)$$

Equação auxiliar – Princípio F:

$$b_2 = b_4 \quad (7.45)$$

$$b_6 = b_7 \quad (7.46)$$

$$b_6 = \frac{(b_2 * Ex_2) + Y_{refrig} - (b_4 * Ex_4)}{Ex_6 + Ex_7} \quad (7.47)$$

Taxa de impacto ambiental do produto e do insumo:

$$B_{P_{refrig}} = B_6 - B_7 \quad (7.48)$$

$$B_{Frefrig} = B_2 - B_4 \quad (7.49)$$

- **Volume de controle (trocador de calor)**

Balanço exergoambiental:

$$(b_4 * Ex_4) + (b_9 * Ex_9) + Y_{trocador} = (b_8 * Ex_8) + (b_5 * Ex_5) \quad (7.50)$$

Equação auxiliar – Princípio F:

$$b_4 = b_5 \quad (7.51)$$

$$b_8 = b_9 \quad (7.52)$$

$$b_8 = \frac{(b_4 * Ex_4) + (b_9 * Ex_9) + Y_{trocador} - (b_5 * Ex_5)}{Ex_8 + Ex_9} \quad (7.53)$$

Taxa do impacto ambiental do produto e do insumo:

$$B_{P_{trocador}} = B_8 - B_9 \quad (7.54)$$

$$B_{Ftrocador} = B_4 - B_5 \quad (7.55)$$

- **Outras variáveis exergoambientais**

Indicador médio dos produtos e dos insumos:

$$b_{Pequipamento} = \frac{B_{Pequipamento}}{Ex_{Pequipamento}} \quad (7.56)$$

$$b_{F_{equipamento}} = \frac{B_{F_{equipamento}}}{Ex_{F_{equipamento}}} \quad (7.57)$$

Taxa de impacto ambiental pela destruição de exergia:

$$B_{D_{equipamento}} = b_{F_{equipamento}} * Ex_{D_{equipamento}} \quad (7.58)$$

Diferença relativa dos impactos ambientais médios dos produtos e dos insumos:

$$rb_{k_{equipamento}} = \frac{b_{p_{equipamento}} - b_{F_{equipamento}}}{b_{F_{equipamento}}} \quad (7.59)$$

Fator exergoambiental:

$$fb_{k_{equipamento}} = \left(\frac{Y_{equipamento}}{B_{D_{equipamento}} + Y_{equipamento}} \right) * 100 \quad (7.60)$$

CAPÍTULO VIII

METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, FRIO E CALOR PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA

8.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo detalha-se a determinação – usando o método *LandGem* – da produção de biogás e metano oriundos do aterro sanitário de João Pessoa-PB e sua capacidade de produção de energia elétrica, frio e calor, ao considerar uma eficiência de coleta do biogás e o uso de um sistema de trigeração semelhante ao descrito e usado neste trabalho.

8.2 A DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E METANO PRODUZIDO NO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA-PB

A determinação da produção de energia elétrica, frio e calor pelo aterro sanitário de João Pessoa passa primeiramente pela estimativa da produção de biogás e de metano por esse aterro. Neste trabalho, a estimativa da quantidade de biogás e de metano gerada pelo aterro sanitário estudado se deu por meio o método *LandGem* versão 3.02, descrito no item 3.5.1.

Os primeiros parâmetros que precisam ser definidos nesse método são os relacionados com as características do aterro sanitário estudado, como os anos de abertura e fechamento do aterro sanitário. Os anos de abertura e fechamento do aterro sanitário de João Pessoa – PB é 2003 e 2028, respectivamente, ver Fig. 8.1.

Figura 8. 1 – Dados de entrada referente ao ano de abertura e fechamento do aterro sanitário de João Pessoa – PB.

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS		
Landfill Open Year	2003	
Landfill Closure Year	2028	
Have Model Calculate Closure Year?	☐ Yes ☒ No	
Waste Design Capacity		megagrams

Fonte: Autor.

Os próximos dados de entrada requisitados por esse métodos são os relacionados a produção de metano. Foram utilizados os dados padrões para definir a taxa de geração de metano (0,05/ano), potencial de geração de metano (170 m³/ton), compostos orgânicos diferentes do metano (4,0) e quantidade de metano no biogás (50%), como pode ser visto na Fig. 8.2.

Figura 8. 2 – Entrada de dados relativos a geração do metano no método LandGem.

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS	
Methane Generation Rate, k (year^{-1})	CAA Conventional - 0.05
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)	CAA Conventional - 170
NMOC Concentration (ppmv as hexane)	CAA - 4,000
Methane Content (% by volume)	CAA - 50% by volume

Fonte: Autor.

O terceiro passo do método *LandGem* é selecionar quais componentes gasosos é de interesse do usuário. No programa é possível selecionar até quatro componentes do biogás, tais como, monóxido de carbono, metano, hexano, dióxido de carbono, butano e outros gases. Neste trabalho selecionou-se biogás, metano, dióxido de carbono e componentes orgânicos diferentes do metano, como está exposto na Fig. 8.3.

Figura 8. 3 – Entrada de dados relacionados aos gases de interesse deste trabalho.

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1 Default pollutant parameters are currently being used by model.
Total landfill gas

Gas / Pollutant #2
Methane

Gas / Pollutant #3
Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4
NMOC

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Fonte: Autor.

Juntamente com as informações detalhadas acima, usaram-se os dados fornecidos pela EMLUR, a respeito das quantidades de resíduos sólidos que foram dispostas entre de 2008 a 2018. Como o início das operações do aterro sanitário foi em 2003 e o ano de encerramento será em 2028, fez-se necessário extrapolar os dados das quantidades de resíduos sólidos para se obter informações referentes aos anos entre 2003-2008 e 2018- 2028. Assim, utilizou-se, no *LandGem*, os dados que estão expostos na Fig. 8.4 para estimar as quantidades de biogás e metano.

Figura 8. 4 – Dados correspondentes a quantidade de resíduo sólidos recebida pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB ao longo dos anos.

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2003	184,774	203,251
2004	204,061.58	224,468
2005	243,964.05	268,360
2006	241,122.72	265,235
2007	253,057.30	278,363
2008	283,637.76	312,002
2009	291,937.06	321,131
2010	302,659.81	332,926
2011	326,621.13	359,283
2012	318,190.33	350,009
2013	326,568.90	359,226
2014	339,077.27	372,985
2015	350,422.79	385,465
2016	341,783.79	375,962
2017	352,604.71	387,865
2018	352,450.65	387,696
2019	363,271.57	399,599
2020	363,117.51	399,429
2021	373,938.43	411,332
2022	373,784.37	411,163
2023	384,605.29	423,066
2024	384,451.23	422,896
2025	395,272.15	434,799
2026	395,118.09	434,630
2027	405,939.01	446,533
2028	405,784.95	446,363

Fonte: Autor.

Ao determinar a capacidade de produção de biogás pelo aterro sanitário de João Pessoa de energia é necessário ter em conta a eficiência da coleta de biogás que equaciona a quantidade total de biogás gerada pelo aterro sanitário com a capacidade do sistema de captação do aterro sanitário. Segundo Barlaz (2009) a eficiência da coleta do biogás pode variar entre 50 e 90%. Esses valores de eficiência de coleta serão usadas nesta tese. Destaca-se que a produção teórica de biogás jamais será igual a real devido a vazamentos nas canalizações, microfissuras na camada de cobertura dos resíduos e tempo de preenchimento das células. Todos esses fatores contribuem para a diminuição da eficiência da coleta do biogás. Como o metano é o único componente do biogás capaz de gerar energia, este trabalho ressalta a produção de metano pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB.

8.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CALOR E FRIO PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA – PB

De posse dos resultados da estimativa da produção de biogás e metano pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB, levando-se em conta as eficiências de coleta, este trabalho propõe analisar a projeção da capacidade de geração de energia elétrica, frio e calor utilizando o biogás em um sistema de trigeração foi feita usando o poder calorífico do metano, quantidade estimada de metano, rendimento térmico do grupo gerador e eficiência de recuperação de calor dos sistemas de cogeração. O rendimento térmico do grupo gerador representa a parcela da energia contida no combustível que é transformada em energia elétrica e as eficiências de recuperação de calor dos sistemas de cogeração relaciona a quantidade de energia do combustível que é transformada em frio e calor.

O sistema de trigeração considerado nos cálculos das estimativas de produção de energia elétrica, frio e calor é o mesmo usado nos experimentos propostos neste trabalho e descrito no capítulo VI. Assim serão usados o rendimento térmico do grupo gerador Leon Heimer e as eficiências de recuperação de calor do refrigerador por absorção e da usina de biodiesel, que serão obtidos através dos resultados experimentais.

Usando o poder calorífico inferior do metano (35800 kJ/m^3) e as quantidades estimadas de geração de metano pelo método *LandGem* pode-se calcular, através da Eqs. 8.1, 8.2 e 8.3, a capacidade de geração de eletricidade, de frio e de calor, respectivamente.

$$Elet = Q_{metano} * \eta_{coleta} * PCI_{metano} * \eta_{grupo} \quad (8.1)$$

$$Frio = Q_{metano} * \eta_{coleta} * PCI_{metano} * \eta_{refrig} * \beta \quad (8.2)$$

$$Calor = Q_{metano} * \eta_{coleta} * PCI_{metano} * \eta_{recup} \quad (8.3)$$

Na Eq. 8.1, Elet é a quantidade de energia elétrica gerada, Q_{metano} é a quantidade de metano gerado no aterro, η_{coleta} é a eficiência da coleta do biogás no aterro sanitário, PCI_{metano} é o poder calorífico inferior do metano e η_{grupo} é o rendimento térmico do grupo gerador (1ª lei da termodinâmica). Os termos “Frio”, η_{refrig} e β na Eq. 8.2, representam a quantidade de frio, a eficiência de recuperação de calor do refrigerador por absorção e o coeficiente de desempenho do refrigerador por absorção, respectivamente. Na Eq. 8.3, “Calor” representam a quantidade de calor produzido e η_{recup} é a eficiência de recuperação de calor do trocador de calor da usina de biodiesel.

CAPÍTULO IX

RESULTADOS E ANÁLISES

9.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrita a análise dos resultados experimentais do sistema de trigeração operando com gás natural e com biogás. Inicialmente serão avaliados os parâmetros de desempenho do sistema de geração, seguido pelas análises exergoeconômica e exergoambiental do sistema estudado.

9.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os parâmetros medidos durante os experimentos usando gás natural como combustível no sistema de trigeração estão apresetados na Tab. 9.1.

Tabela 9. 1 – Os dados experimentais.

Potência elétrica gerada	54,7 kW	Temperatura no Ponto 1	30 °C
Vazão de gás natural	0,0032 kg/s	Temperatura no Ponto 2	592 °C
Rotação do motor	1532 RPM	Temperatura no Ponto 4	384 °C
Nível de emissão de O ₂	6,27% Vol.	Temperatura no Ponto 5	30 °C
Nível de emissão de CO ₂	8,4% Vol.	Temperatura no Ponto 6	10 °C
Nível de emissão de CO	0,09% Vol.	Temperatura no Ponto 7	5 °C
Nível de emissão de NO _x	150 ppm	Temperatura no Ponto 8	90 °C
Nível de emissão de HC	81 ppm	Temperatura no Ponto 9	120 °C
Lambda	1,56		

Fonte: Autor.

Apesar do erro associado a precisão dos equipamentos de medição usados durante os experimentos, descritos no capítulo 6, este trabalho considera apenas os valores medidos (Tab. 9.1) nos cálculos e análises realizadas neste capítulo.

Não foi possível medir os dados experimentais referentes à operação do sistema de trigeração usando biogás do aterro sanitário de João Pessoa. Essa impossibilidade decorre dos diversos problemas encontrados durante os testes experimentais que estão relacionados com o fornecimento e controle da vazão do biogás ao grupo gerador Leon Heimer. Essas disfunções do sistema de fornecimento e controle do biogás ao motor de combustão interna são discutidas nos próximos itens.

9.2.1 Testes experimentais usando o biogás do aterro sanitário de João Pessoa no sistema de trigeração

A realização dos testes experimentais utilizando o biogás no sistema de trigeração, descrito no capítulo VI, sucedeu-se a sua coleta e armazenamento no aterro sanitário de João Pessoa – PB.

9.2.1.1 Coleta e armazenamento do biogás

O biogás foi coletado e acondicionado pelo sistema de captação e armazenamento que foi desenvolvido neste trabalho e que está descrito no item 6.2.5. O sistema de coleta foi capaz de comprimir o biogás no tanque P-190 até a pressão de 9,5 bar cuja operação levou o sistema a funcionar durante duas horas. A pressão de 9,5 bar foi a pressão máxima que o sistema foi capaz de comprimir pois ao atingir esse nível de pressão, a rotação do motor elétrico começou a variar e causar instabilidade também na operação do compressor. A Fig. 9.1 ilustra o sistema instalado no aterro sanitário de João Pessoa – PB, realizando a coleta e o armazenamento do biogás.

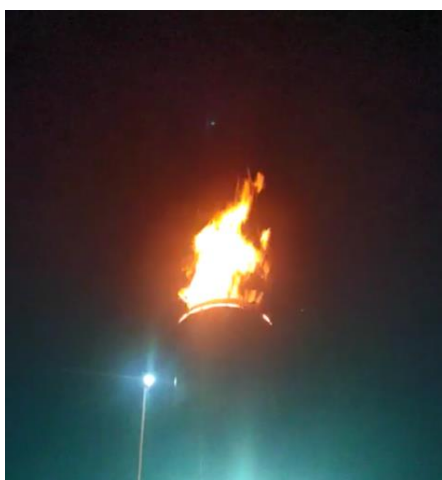
Figura 9. 1 – Sistema de captação e armazenamento de biogás instalado no aterro sanitário.



Fonte: Autor.

O sistema de captação foi conectado à tubulação a montante do sistema de controle do fluxo do biogás que é direcionado aos motores, ou seja, o ponto de coleta do biogás se deu após o sistema de lavagem e filtragem do biogás. Ao mesmo tempo em que o sistema comprimia o biogás para o tanque P-190, era possível verificar o aspecto visual da chama do biogás no queimador, conforme a Fig. 9.2.

Figura 9. 2 – Chama do biogás do aterro sanitário de João Pessoa.



Fonte: Autor.

Após a coleta do biogás no aterro sanitário, o tanque P-190 e os outros componentes do sistema de captação foram transportado para o Laboratório de Cogeração em um reboque automotivo, ver Fig. 9.3.

Figura 9. 3 – O sistema de captação e armazenamento de biogás sendo transportado.



Fonte: Autor.

No Laboratório de Cogeração foi substituído os cilindros de gás natural pelo tanque P-190, já abastecido com biogás, com vista na realização dos testes experimentais do sistema de trigerção usando o biogás coletado no aterro sanitário.

9.2.1.2 Os testes experimentais do sistema de trigerção usando biogás

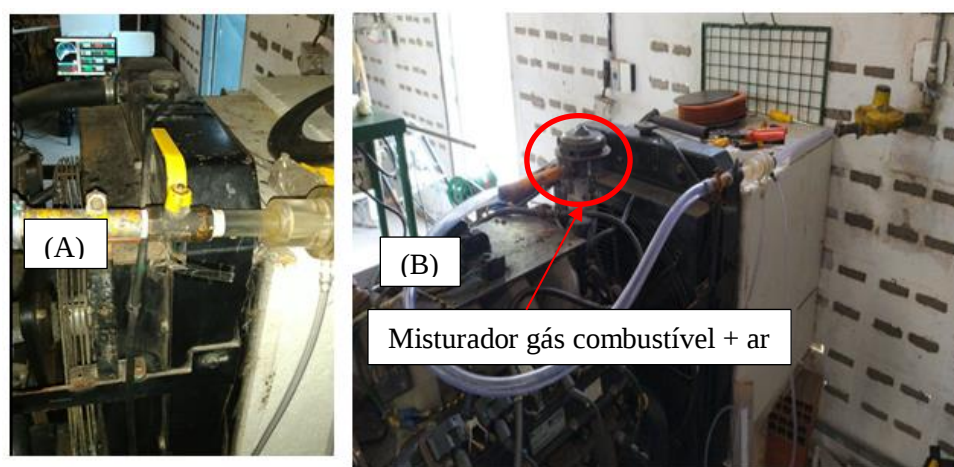
Os testes com o biogás oriundo do aterro sanitário foi realizado no sistema de trigerção, alterando-se, apenas, o sistema de fornecimento de combustível.

Durante os testes com biogás verificou-se que o motor do grupo gerador Leon Heimer não dava partida, apesar dos componentes de seu sistema de partida estarem funcionando normalmente. Percebeu-se, então, que o sistema de fornecimento de combustível – reguladores de pressão, de fluxo e a válvula controladora de vazão – restringia o fornecimento do biogás ao motor, pois foram fabricados e calibrados para

adequar e controlar o fluxo de gás natural ao motor, cuja vazão necessária para ligar o motor é menor do que o fluxo de biogás requerido na partida.

Buscando diminuir as restrições e aumentar a vazão de biogás fornecida ao motor, retirou-se os reguladores de pressão e de fluxo de gás natural e a válvula controladora de vazão e inclui-se uma válvula controladora manual, como pode ser visto na Fig. 9.4 (A) e (B).

Figura 9. 4 – Válvula controladora manual e sistema de fornecimento com biogás.



Fonte: Autor.

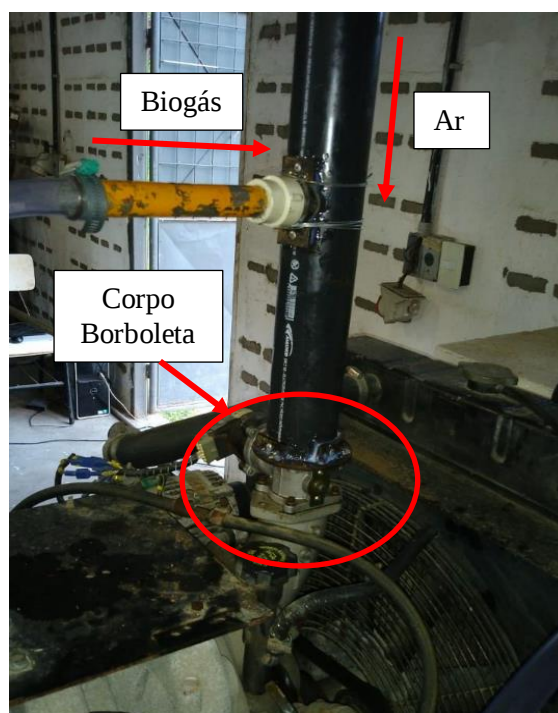
Realizou-se novas tentativas de dar partida no motor com o sistema de fornecimento de biogás modificado. Mais uma vez, foi constatado que o motor não conseguia dar partida, no entanto, dessa vez, o motor dava sinais sonoros e de vibração de que havia queima do biogás no interior dos seus cilindros. O novo sistema de fornecimento de combustível conseguiu aumentar o fluxo de biogás ao motor, porém não o suficiente para que o motor conseguisse atingir uma rotação mínima de funcionamento estável.

Ao investigar, novamente, as possíveis restrições ainda existentes no sistema de fornecimento de biogás que impossibilitavam o seu fornecimento adequado, identificou-se anteparos no misturador gás combustível e ar, indicado na Fig. 9.4.

Esses anteparos são reguláveis, e estavam regulados para o funcionamento do motor com o gás natural, o que restringia também o fornecimento de biogás ao motor. Modificou-se outra vez o sistema de fornecimento ao retirar o misturador e incluir um

novo, de construção muito simplificada, concebido no Laboratório de Cogeração, ver Fig. 9.5.

Figura 9. 5 – Novo misturador biogás e ar e o corpo borboleta.



Fonte: Autor.

Com a nova modificação no sistema de fornecimento de biogás foi possível dar partida no motor do grupo gerador Leon Heimer. Entretanto, o controle de rotação do motor não foi capaz de estabilizar a rotação do motor em 1800 RPM. A rotação do motor ficou variando. O controle de rotação do motor é realizado no corpo borboleta (dosando fluxo da mistura ar-combustível) que funciona em uma lógica em malha fechada. Assim que o motor dá partida, o controlador busca uma posição no corpo borboleta que corresponda a rotação de 1800 RPM do motor (caso a rotação esteja abaixo dessa referência o controlador abre a válvula, caso contrário, fecha). Ao ponto que o corpo borboleta abre ou fecha, a depender da rotação do motor, a válvula controladora de combustível deve responder em perfeita sincronia, mantendo uma vazão ar-combustível constante para o motor. Como o sistema de fornecimento conta com uma válvula de controladora manual, o controle da vazão ar-combustível fica muito prejudicada e impossibilita o ajuste da vazão de biogás ao motor. Além disso, o controlador do corpo

borboleta foi calibrado (definição dos ganhos proporcional e integral) considerando o funcionamento com gás natural, o que também dificulta o controle da vazão de biogás fornecida ao motor.

Devido aos problemas acima citados é necessário a instalação de um sistema eletrônico capaz de controlar a vazão do biogás ao motor do grupo gerador Leon Heimer. Por conta da falta de auxílio financeiro à pesquisa (problema encarado atualmente por todas universidades do Brasil), não foi possível adquirir ou desenvolver um sistema eletrônico com a função requerida pelo motor, no Laboratório de Cogeração. Por esses motivos, não foi possível realizar testes de desempenho do sistema de trigeração usando biogás do aterro sanitário de João Pessoa – PB durante este trabalho.

9.3 ANÁLISE ENERGÉTICA

Usando as equações descritas no capítulo II e os dados experimentais foi possível quantificar os parâmetros relacionados com a análise exergética e com a performance do sistema de trigeração usando gás natural como combustível. Na Tab. 9.2, estão expostos os parâmetros de desempenho relacionados ao grupo gerador Leon Heimer, de 100 kVA, funcionando apenas com gás natural.

Alguns equipamentos periféricos do sistema de trigeração necessitam de energia elétrica para seu funcionamento (bombas d'água, bomba da solução água-amônio, ventiladores e sopradores). A soma total requerida é 1 kWe. Portanto, a potência desenvolvida pelo grupo gerador Leon Heimer durante os testes foi de 53,7 kWe.

Os parâmetros de funcionamento relacionados ao grupo gerador, ao refrigerador por absorção, ao trocador de calor da usina de biodiesel e ao sistema de trigeração como um todo podem ser vistos na Tab 9.3.

Tabela 9. 2 – Parâmetros de desempenho do grupo gerador Leon Heimer usando gás natural como combustível.

Rendimento Térmico do grupo gerador	36,3 %	Relação ar-combustível	24,1
Potência elétrica líquida	53,7 kW	Vazão de ar	0,077 kg/s
bsfc	200 g/kWh	Consumo de ar por ciclo do motor	$6,9 \times 10^{-4}$ kg/ciclo
Eficiência Volumétrica	0,611	Consumo de GNV por ciclo do motor	$2,87 \times 10^{-5}$ kg/ciclo
PME	2,561 bar	Combustão da vazão de GNV	155,2 kW

Fonte: Autor.

Tabela 9. 3 – Parâmetros de funcionamento do sistema de trиграção.

Redimento térmico do sistema de trиграção	51,7 %	Frio produzido pelo refrigerador por absorção	15,67 kW
Quantidade de energia fornecida pela combustão do gás natural	147,9 kW	Calor recuperador pelo trocador de calor da usina de biodiesel	6,86 kW
Calor fornecido ao refrigerador pelos gases de escape	24,58 kW	Capacidade de produção de biodiesel a base de óleo de canola	25,07 kg/h

Fonte: Autor.

A potência elétrica desenvolvida pelo grupo gerador, de 54,7 kWe (esse valor não considera o consumo de 1 kWe pelos equipamentos do sistema de trigação), está abaixo da potência máxima que o grupo gerador poderia desenvolver usando gás natural. O grupo gerador Leon Heimer possui um gerador elétrico com fator de potência de 0,8, ou seja, considerando apenas esse fator, a potência máxima de geração de energia elétrica seria de 80 kWe. No entanto, ainda há o fator de potência da carga aplicada ao grupo gerador. Comumente, para cargas resistivas, o fator de potência da carga é de 0,75. Assim, a potência máxima que o gerador Leon Heimer é capaz de gerar, de forma segura e contínua, para cargas resistivas, é 60 kWe, valor que é maior do que a potência alcançada durante os testes experimentais.

Após analisar os resultados (principalmente o valor do fator λ) e os sistemas que controlam a vazão de GNV, rotação e ignição do motor foi possível levantar as possíveis causas de o grupo gerador Leon Heimer não atingir a potência máxima. As principais causas são:

- O sistema de fornecimento de gás natural possui um misturador, responsável por homogeneizar a mistura de ar e gás natural. Percebeu-se, utilizando o tubo de Venturi, que a vazão de gás natural aumenta, chegando a dobrar de valor, quando se retira o misturador de ar-gás natural. No entanto, da forma que o sistema de fornecimento de gás natural está instalado no grupo gerador e sua calibração, não é possível funcionar o motor sem o misturador citado. A solução, aqui levantada, é a substituição do misturador ou modificação do mesmo para aumentar a vazão de gás natural a ponto de alcançar o valor de 1 para o fator λ (o fator λ medido foi igual a 1,56).

- O sistema de ignição do motor não é do tipo variável, ou seja, o ângulo de ignição não é ajustado conforme a necessidade de carga o que pode reduzir a potência máxima do grupo gerador.

Com vistas no rendimento térmico do motor e consequentemente no consumo específico de combustível, ressalta-se, primeiramente, que o motor é naturalmente aspirado, com taxa de compressão (9,1:1), que é muito baixa para funcionar com gás natural ou biogás, de modo eficiente. Na literatura se têm diversos trabalhos desenvolvidos usando motores com taxa de compressão maior usando gás natural e biogás de aterro sanitário como combustível, sem ser constatado a ocorrência de *knock*.

Bhaskor (2015) investigou a influência da taxa de compressão no desempenho de um motor dual (diesel e biogás) turboalimentado. Dentre as quatro taxas de

compressão analisadas (18, 17,5 e 16:1), a de maior valor resultou no maior rendimento e na máxima substituição de diesel.

Além da taxa de compressão, outro fator que tem forte influência no rendimento térmico do motor, no consumo específico de combustível e na eficiência volumétrica é o sistema de alimentação original do motor. Tanto para gás natural quanto para biogás, é possível verificar na literatura técnica o uso de sistemas turboalimentados em motores que utilizam esses tipos de combustíveis.

Haydargil (2018) investigou diferentes métodos termoeconômicos para quantificar o custo de produção de energia elétrica e calor através do uso de biogás em um sistema de cogeração composto por um motor turboalimentado do ciclo Otto, com 12 cilindros em configuração em V e capacidade de produção anual de energia elétrica de 8760 GWh.

Alves (2015) também testou um motor convertido para operar apenas com gás natural com taxa de compressão de 8,7:1 e sistema de alimentação a turbocompressor. Foi verificado que o motor não apresentou ocorrência de *knock*, atingiu a potência máxima de 150 cv e rendimento térmico de 39,1%.

Barros (2015) analisou o desempenho e o efeito da contrapressão de um motor convertido para gás natural e turboalimentado. Seus resultados e conclusões mostraram que durante os testes experimentais não houve *knock* e o motor atingiu um rendimento térmico máximo de 40,46%.

Por último, há também a possibilidade de diminuir o consumo de combustível através do uso de um sistema de ignição onde seja possível configurar um mapa de ângulo de ignição em função da carga que está sendo aplicada ao motor (FERRAZ, 2014). Os ângulos de ignição que constituem o mapa podem ser escolhidos durante um teste prévio onde são escolhidos os ângulos que permitem o motor atingir o máximo rendimento térmico.

Em relação a PME desenvolvida pelo motor do grupo gerador Leon Heimer, percebe-se que o valor é baixo quando se compara com valores de 12 bar para motores a gás natural e de 11 bar e 4,5 bar para a biogás, encontrados na literatura (GUPTA, 2012) (SAMANTA, 2016) (KOZARC et al, 2016). Esse valor baixo para a PME se deve aos parâmetros de funcionamento do motor – principalmente a taxa de compressão – que foram estabelecidos visando o uso de diversos tipos de combustíveis para geração de energia. A PME máxima desse motor é 2,85 bar quando o motor atinge a potência máxima de 60 kW.

Um motor com baixa PME significa que a relação entre a potência desenvolvida e volume estrutural do motor é baixa. No entanto, uma PME baixa pode ser resultado também de uma operação cujo objetivo seja minimizar o consumo específico e, consequentemente, maximizar o rendimento térmico do motor ao fazer uso de uma mistura ar-combustível pobre. Os grupos geradores Jenbacher utilizados no aterro sanitário de João Pessoa, desenvolvem até 1,39 bar de PME, com rendimento térmico de 40,8% e consumo específico de 2,38 g/kWh e rotação fixa de 1500 RPM.

Em geral, os motores do ciclo Otto que utilizam gás como fonte de energia desenvolvem menores PME do que os motores do ciclo Diesel devido a fatores estruturais dos motores do ciclo Otto e características de combustão. Os principais fatores são estes (ZHANG, 1998):

- Mistura ar-combustível com baixo poder calorífico
- Não há aumento da massa molecular durante a combustão
- Baixa velocidade de chama
- Altas temperaturas durante a combustão
- Probabilidade de ocorrer *knock*
- Menores valores para a eficiência volumétrica
- Maiores perdas associadas ao controle de potência desenvolvida pelo corpo borboleta
- Maiores emissões de combustível não queimado devido a necessidade de pré-mistura do ar e combustível.

Em relação aos níveis das emissões gasosas destaca-se, primeiramente, os baixos níveis de CO e HC, durante a operação do motor com gás natural. Esses níveis são justificados pelo uso de uma mistura pobre durante a operação do motor que proporciona a combustão completa do gás natural dentro do cilindro devido a disponibilidade em excesso de ar.

Cho (2009) analisou o efeito da variação do λ e do tempo de injeção de gás natural nas emissões gasosas de um motor do ciclo Otto cuja rotação foi fixada em 2000 RPM e a PME em 7 bar. Os níveis de CO e HC medidos foram de 0,045% Vol. e 1500 ppm, respectivamente, para uma condição de λ de 1,4 (condição de funcionamento semelhante a usada neste trabalho e exposto na Tab. 9.1) e com injeção 60° depois do ponto morto superior. Uma das conclusões apresentada nesse trabalho é de que como a mistura é pobre (λ maior do que um) há excesso de oxigênio dentro

cilindro o que melhora o processo de combustão beneficiando a oxidação dos combustíveis não queimados.

Jahirul (2010) comparou o desempenho e as emissões gasosas de um motor do ciclo Otto usando gasolina e gás natural. Os experimentos foram realizados considerando a abertura do corpo borboleta em 50% e 80%, condições próximas a estequiométrica e a rotação variando entre 1500 a 5500 RPM com incremento de 500. Os menores níveis de emissões de HC (249,6 ppm) e CO (5% Vol.) foram medidos quando o motor operava utilizando gás natural, abertura máxima do corpo borboleta e mistura pobre. A combustão incompleta de combustível foi um dos resultados observado no estudo quando se buscou utilizar misturas mais ricas durante os testes experimentais, o que causou um aumento nos níveis de CO e HC.

O uso de misturas pobres, mesmo considerando o uso de biogás ou qualquer outro tipo de combustível, no sistema de trigerção também resultará em menores níveis de emissões de HC e CO.

Percebe-se, também, que a relação ar-combustível usada durante os testes deste trabalho trouxe benefícios em relação aos níveis de NO_x (150 ppm) e CO_2 (8,4% Vol.). Como a mistura ar-combustível é pobre (λ igual a 1,56) e há menos carbono (gás natural) do que o necessário para a combustão estequiométrica, as níveis de emissões de CO_2 são menores. Devido ao excesso de ar, parte dos componentes da mistura ar-combustível, como nitrogênio e o excesso de O_2 (6,27 % Vol.), não participam da reação de combustão, mas passam a absorver o calor gerado durante esse processo, o que resulta na diminuição de calor disponível para a formação de NO_x dentro do cilindro.

Du (2015) analisou as características da combustão usando misturas pobres em um motor do ciclo Otto que utiliza gasolina e hidrogênio como fonte de energia. Os resultados desse trabalho mostraram que ao alterar o λ de 1,1 para 1,5 os níveis de emissões de NO_x diminuíram cinco vezes.

Jahirul (2010) também analisou os níveis de emissões de CO_2 e NO_x quando o motor operava com diferentes relações de ar-combustível. Os resultados do trabalho mostraram que na operação com gás natural, os menores níveis de CO_2 (aproximadamente 6,5%) e de NO_x (aproximadamente 250 ppm) foram medidos quando a relação de ar-combustível tinha o maior nível de excesso de ar.

Jung (2015) simulou a performance e as emissões gasosas de um motor turboalimentado operando com biogás de aterro sanitário e considerando diversas relações de ar-combustível. Os resultados da simulação mostram que os níveis de

emissões de NO_x tende a diminuir quando o λ aumenta a partir 1,1 e se aproxima de zero quando é considerado um λ de 1,9.

Apesar do λ maior do que 1 impossibilitar o grupo gerador Leon Heimer de desenvolver sua potência máxima durante os testes, houve um benefício quanto aos níveis de emissões gasosas. Tais níveis podem ser ainda mais reduzidos através do uso de sistemas de recirculação dos gases de escape, de adição de hidrogênio ou uma combinação de ambos, o que possibilita elevar ainda mais o valor da relação ar-combustível, seja na operação com gás natural ou com biogás de aterro sanitário (CHEOLWOONG, 2017) e (YU, 2017).

Além dos níveis de emissões, buscou-se calcular as quantidades de calor recuperadas dos gases de escape do motor do grupo gerador Leon Heimer. O detalhamento dos cálculos para determinação das quantidades de calor recuperadas pelo refrigerador por absorção e pelo trocador de calor da usina de biodiesel pode ser visto no Apêndice II.

O calor recuperado dos gases de escape do grupo gerador Leon Heimer pelo refrigerador de absorção (24,58 kW) é capaz de gerar 15,67 kW de frio, o que equivale a 53468 BTU/h. O calor recuperado por esse equipamento representa 16,6% da energia proveniente da combustão do gás natural, 45% da energia elétrica gerada e 88,4% do calor necessário para seu funcionamento a capacidade máxima.

A quantidade de frio gerada pelo refrigerador pode ser usada na climatização de ambientes buscando conforto térmico ou no condicionamento de frutas, por exemplo.

Alcântara (2019) desenvolveu uma análise exergética e financeira de um sistema de trigeração que usa gás natural como fonte de combustível. A quantidade de frio gerado pelo refrigerador por absorção é usado para resfriar água e representou 16,67% da energia elétrica gerada pelo motor e apenas 6,2% da energia da combustão do gás natural que é consumido pelo motor. Os valores que representam a geração de frio em relação a geração de energia elétrica e energia de combustão encontrados por essa autora são inferiores ao que foi encontrado neste trabalho. Isso se deve a diferença entre as potências de geração do motor (214,1 kW) e do refrigerador por absorção (35,7 kW) considerados no trabalho desenvolvido por Alcântara (2019). Quanto maior for essa diferença, menor será a capacidade de recuperação de energia disponível nos gases de exaustão pelo refrigerador por absorção.

Rocha (2012) analisou o desempenho de dois sistemas de trigeração. Um dos sistemas é composto por um motor de combustão interna a gás natural, um refrigerador

de absorção que utiliza o par água-amônia e uma caldeira. O sistema de trigeração estudado nesse trabalho foi capaz de gerar 21 kWe, 8,98 kW de frio e 2,51 kW de calor. Os resultados desse trabalho mostram que a quantidade de frio gerada corresponde a 42,8% e o calor aproveitado pela caldeira 15,7% da energia elétrica gerada, respectivamente. O design do sistema de trigeração usado por esse autor permite controlar o fluxo dos gases de escape do motor para cada um dos sistemas de cogeração (refrigerador e caldeira), isso se deve a metodologia adotada pelos autores que buscou atingir a máxima capacidade de geração de frio pelo refrigerador por absorção e assim aumentando a capacidade de recuperação de calor provindo dos gases de escape. O rendimento térmico do sistema de trigeração encontrado foi de 42,7%.

A capacidade de geração de biodiesel a partir de óleo de canola e do calor recuperado pelo trocador de calor da usina de biodiesel foi estimada em 25,07 kg/h. O biodiesel normalmente é misturado com o óleo diesel para ser usado em motores de combustão interna. Os principais objetivos de se usar a mistura biodiesel e diesel oriundo do petróleo em motores é a diminuição dos níveis de poluentes e o aproveitamento das fontes de energia renováveis. No Brasil, os postos de combustíveis são obrigados por lei a comercializar o diesel S10, que possui em sua composição 8% de biodiesel.

9.4 ANÁLISE EXERGEOCONÔMICA

Previamente a análise exergoeconômica, ressaltam-se os parâmetros e análise termodinâmica do sistema de trigeração. Na Tab. 9.4 estão ilustrados os parâmetros calculados (exergias, entropias e vazões mássicas) e outros medidos (temperaturas) durante os experimentos, relacionados a cada ponto do sistema de trigeração usando gás natural, ilustrados na Fig. 7.2.

Tabela 9. 4 – Parâmetros do sistema de trigeração.

Ponto no sistema de trigeração	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	s (kJ/kgK)	e_x (kJ/kg)	$\dot{E}_x$ (kW)
1	25	0,0076	-	19417,5	147,573
2	592	0,0076	9,056	3943,2	29,968
4	384	0,0076	8,668	1865,3	14,176
5	321	0,0076	8,534	1363,7	10,364
6	10°C	0,75	0,076	20,98	1,393
7	5°C	0,75	0,1510	42	0,41
8	120	0,143	-	20,06	2,868
9	90	0,143	-	9,92	1,418

Fonte: Autor.

Percebe-se que entre os pontos 1 e 2, que representam a entrada e saída do grupo gerador Leon Heimer, há o maior consumo de exergia pelo sistema de trigeração, correspondendo há 80% da exergia da mistura ar-gás natural. Isso se deve ao fato do motor de combustão interna rejeitar grande parte do calor (exergia) gerado durante a combustão para o meio ambiente e para o sistema de arrefecimento.

Esse nível de consumo de exergia pelo motor de combustão interna, em relação a exergia do combustível, também é observado em outros trabalhos disponíveis na literatura técnica, inclusive quando se analisa motores do ciclo Diesel (MORTAZA, 2018) (SCHRÖDER, 2020).

O refrigerador por absorção e o trocador de calor da usina de biodiesel consomem 10,7% e 2,5% da exergia do gás natural fornecido ao sistema de trigeração, respectivamente. Evidencia-se que a exergia dos gases de escape descartada no meio ambiente – ponto 5 – corresponde a 10,4 kW ou 7% do exergia total do combustível usado nos experimentos.

Uma constatação que pode ser feita através da Tab. 7.3 é que a temperatura do ponto 9 – entrada do óleo no trocador de calor usado para recuperação da energia presente nos gases de escape – está muito próxima do valor de temperatura medido para o ponto 8 (saída do óleo do trocador de calor). Isso decorre da impossibilidade de se usar a usina de

biodiesel durante os testes experimentais, o que iria consumir grande parte do calor recuperado dos gases de escape do motor e diminuir a exergia rejeitada pelo sistema de trigeração.

A Tabela 9.5 mostra os custos específicos e exergéticos relacionados a cada ponto estudado do sistema de trigeração.

Tabela 9. 5 – Custos específicos e exergéticos ao longo da unidade de trigeração.

Ponto no sistema de trigeração	Exergia (kW)	c (R\$/GJ)	$\dot{C}$ (R\$/h)
1	147,573	60,654	32,223
2	29,968	60,654	6,544
3	53,7	206,583	39,937
4	14,176	60,654	3,095
5	10,364	60,654	2,263
6	1,393	769,7	3,095
7	0,409	769,7	1,135
8	2,868	182,741	1,89
9	1,418	182,741	0,933

Fonte: Autor.

Entre os custos dos produtos do sistema de trigeração, pontos 3 (eletricidade), 6 (frio) e 8 (calor), o referente a energia elétrica é o que possui o maior valor, 39,937 R\$/h. Atribui-se esse valor devido ao consumo exergético pelo sistema para a produção de eletricidade ser 87% e 97% maior do que o consumo exergético para se produzir frio e calor, respectivamente. Além do mais, a eletricidade é o principal produto do sistema de trigeração, visto que o calor e o frio são gerados a partir de processos de cogeração no sistema.

Observa-se, na Tab. 9.4, que o custo específico exergético relativo ao frio é o maior dentre os custos específicos exergéticos dos produtos, pois a exergia desse produto é 91% menor do que a exergia do insumo, enquanto que as exergias da energia elétrica e do calor são 54% e 25% menores do que a exergia dos seus respectivos insumos.

Na Tabela 9.6 estão expostos os parâmetros exergoeconômicos que foram

calculados para cada um dos equipamentos que compõe o sistema de trigeração.

Tabela 9. 6 – Os parâmetros exergoeconômicos do sistema de trigeração.

Equipamento	ε (%)	E_D (kW)	C_F (R\$/h)	C_P (R\$/h)	$\dot{C}_D$ (R\$/h)	$\dot{Z}_k$ (R\$/h)	r_k (%)	f_k (%)
Grupo Gerador Leon Heimer	45,7	63,9	25,68	39,97	13,95	14,26	240,6	50,5
Refrigerador por absorção	6,2	14,81	3,45	2,72	3,23	1,545	1169	3,4
Trocador de calor da usina	38,02	2,36	0,83	0,95	0,52	0,121	201,3	5,5

Fonte: Autor.

O grupo gerador Leon Heimer está relacionado com os máximos valores dos parâmetros exergoeconômicos calculados neste trabalho. O grupo gerador possui a maior taxa de custo de equipamento ($\dot{Z}_k$) devido aos custos de aquisição e manutenção ser igual a duas vezes os custos relacionados ao refrigerador por absorção e 45 vezes aos custos do sistema de recuperação de calor da usina de biodiesel. Para esse equipamento, os custos dos produtos e dos insumo são os maiores do sistema de trigeração em consequência do maior custo de equipamento e por ser o maior consumidor e destruidor de exergia do sistema de trigeração, ver Tab. 9.6. Por outro lado, é o equipamento com maior fator exergoeconômico e a maior eficiência exergética do sistema.

Leite (2019) realizou uma análise exergoeconômica de um sistema de trigeração no setor terciário. Os parâmetros exergoeconômicos apresentados nos resultados desse trabalho mostraram que o motor de combustão interna do grupo gerador é o equipamento onde há a maior destruição de exergia e onde estão os maiores custos com equipamento e manutenção. Tais resultados são semelhantes aos encontrados neste trabalho.

O refrigerador por absorção possui o maior valor para a diferença relativa de custos (r_k) dentre os equipamentos do sistema de trigeração, o que é resultado do menor valor da exergia do produto do sistema de trigeração. A exergia do produto do refrigerador por absorção é, necessariamente, baixa, quando se compara com a exergia dos outros

produtos do sistema, pois a função desse equipamento é gerar a maior quantidade de frio possível cujo energia disponível sempre será baixa.

O trocador de calor da usina possui a menor exergia destruída para um equipamento do sistema de trigeração, além de gerar um produto com o menor custo do sistema de trigeração.

Uma forma de se melhorar os resultados exergoeconômicos do grupo gerador é aumentar o rendimento térmico desse equipamento através dos pontos levantados na análise de desempenho do grupo gerador Leon Heimer. Consequentemente, ao melhorar o desempenho do motor, a exergia destruída e o consumo de exergia diminuem, bem como os custos com gás natural.

O custo com equipamento e manutenção do refrigerador por absorção é 12,45 vezes maior que o custo com o sistema de recuperação de calor da usina, que é o outro equipamento de cogeração do sistema. O valor de aquisição e manutenção para o refrigerador por absorção é maior, principalmente, por conta de ser um equipamento importado, diferentemente do sistema de recuperação de calor que foi fabricado no próprio Laboratório de Cogeração. Uma maneira de se diminuir os custos de produção de frio, pelo sistema de trigeração, é fabricar, no Laboratório de Cogeração, um refrigerador por absorção, cuja fabricação é simples.

Comitadamente a análise exergoeconômica, este trabalho propôs uma análise econômica do sistema de trigeração e seus produtos. Na tabela 9.7 estão descritos os valores relacionados aos custos identificados para produção de energia elétrica, frio e calor.

Tabela 9. 7 – Os custos associados aos produtos do sistema de trиграção.

Custos	Valores
Custo com aquisição do grupo gerador	0,049 R\$/kWh
Custo com a manutenção do grupo gerador	0,003 R\$/kWh
Custo com gás natural	0,631 R\$/kWh
Custo com operador (grupo gerador)	0,214 R\$/kWh
Custo da Energia Elétrica	0,897 R\$/kWh
Custo com aquisição do refrigerador	0,083 R\$/kWh
Custo com a manutenção do refrigerador	0,006 R\$/kWh
Custo com operador (refrigerador)	0,116 R\$/kWh
Custo do Frio	0,205 R\$/kWh
Custo com aquisição do sistema de recuperação de calor	0,008 R\$/kWh
Custo com a manutenção do sistema de recuperação de calor	0,0005 R\$/kWh
Custo com operador (sistema de recuperação de calor)	0,10 R\$/kWh
Custo do Calor	0,109 R\$/kWh

Fonte: Autor.

Nota-se na Tab. 9.6 que a soma dos custos para produção de energia elétrica, 0,897 kWh, é o maior valor entre os custos dos produtos do sistema de trиграção. O custo desse produto é fortemente impactado pelo custo com gás natural e com operador do sistema, que representam 69% e 25% do custo total da energia elétrica, respectivamente.

Os custos do frio e do calor produzidos pelo sistema são, essencialmente, influenciados pelos custos com operador. No caso do refrigerador por absorção, o custo com aquisição do equipamento representa 31% do custo do frio.

Com finalidade comparativa, estão expostos na Tab. 9.8 os custos da energia elétrica, fornecida pela concessionária Energisa – PB, do frio, considerando o funcionamento de um ar-condicionado Split Carrier Space Inverter 54.000 BTU/h e do calor, admitindo o uso de resistências elétricas.

Tabela 9. 8 – Os valores dos produtos utilizando meios convencionais.

Custos (com impostos)	Valores dos produtos
Custo da energia elétrica – Concessionária Energisa/PB	0,814 R\$/kWh
Custo do Frio – Ar condicionado Split	0,25 R\$/kWh
Custo do Calor – Resistência elétrica	0,814 R\$/kWh

Fonte: Autor.

Ao comparar as Tabs. 9.7 e 9.8 percebe-se que o custo da energia elétrica gerada pelo sistema de trigeração é maior do que o custo por kWh fornecido pela concessionária Energisa – PB. Essa diferença equivale a 11% do custo proveniente da concessionária. Em contrapartida, verifica-se que os custos de produção de frio e calor são menores quando se opta pelo sistema de trigeração. O custo do frio é 18% e do calor é 87% menor quando se utiliza o sistema de trigeração a gás natural em substituição aos sistemas descritos na Tab. 9.8.

9.5 ANÁLISE EXERGOAMBIENTAL

Na tabela 9.9 são apresentados os resultados a respeito dos indicadores ambiental específico e das taxas de impacto ambiental calculados referente a cada ponto do sistema de trigeração usando gás natural.

Tabela 9. 9 – Os indicadores ambiental específico e as taxas de impacto ambiental.

Ponto no sistema de trigeração	Exergia (kW)	b (Pts/GJ)	B (Pts/h)
1	147,573	4,74	2,52
2	29,968	0,286	0,387
3	53,7	12,87	2,49
4	14,176	0,286	0,146
5	10,364	0,286	0,017
6	1,393	3,202	0,16
7	0,409	3,202	0,005
8	2,868	0,291	0,003
9	1,418	0,291	0,001

Fonte: Autor.

Como se vê na Tab. 9.9, o maior valor de indicador ambiental específico, 12,87 Pts/GJ, é o no ponto 3 do sistema de trigeração que corresponde a energia elétrica gerada pelo grupo gerador Leon Heimer. A taxa de impacto ambiental máxima foi calculada para o ponto 1, que representa a mistura ar-gás natural, com o valor de 2,52 Pts/h. Esse valor resulta do impacto ambiental causado pelos componentes do gás natural.

Em relação a mistura ar-gás natural, Marques (2018) encontrou 5,24 Pts/h referente a taxa de impacto ambiental, valor maior do que foi exposto no ponto 1 da Tab. 7.8. Essa diferença se deve, principalmente, a diferença entre a relação ar-combustível usada neste trabalho e a considerada por Marques (2018). A relação ar-gás natural usada durante os experimentos deste trabalho foi maior do que aquela usada por Marques (2018) em seus cálculos. Quanto maior for a relação ar-combustível menor será o valor para a taxa de impacto ambiental dessa mistura.

Na Tab. 7.8 os produtos do sistema de trigeração estão representados pelos ponto 3 (energia elétrica), ponto 6 (frio) e ponto 8 (calor). Dentre esses pontos, o produto que tem o menor impacto ambiental é calor, considerando tanto o indicador ambiental específico quanto a taxa de impacto ambiental. Esse resultado se deve, sobretudo, à construção no próprio Laboratório de Cogeração do equipamento responsável por gerar o calor e pela quantidade de material usado.

Outro ponto de destaque é o impacto ambiental causado pelos produtos da combustão durante a operação com gás natural e emitidos à atmosfera. No ponto 5, que representa as emissões gasosas descartadas na atmosfera pelo sistema de trigeração, o valor calculado para a taxa de impacto ambiental foi de 0,017 Pts/h. Marques (2018) encontrou 1,18 Pts/h nesse mesmo ponto, valor 98,6% maior. Além de considerar, em sua simulação, uma relação ar-combustível menor do que a usada neste trabalho, o que resulta em maiores níveis de emissões gasosas, Marques (2018) considerou uma geração de energia elétrica maior do que a potência elétrica medida nos testes experimentais do presente trabalho. Essa última consideração implicou em uma quantidade de exergia descartada no meio ambiente 4,84 vezes maior do que a exergia calculada, para o mesmo ponto, neste trabalho.

Percebe-se, então, que ao elevar o valor da relação ar-combustível, o sistema de trigeração passa a causar menos impactos ambientais relacionados às emissões gasosas ao meio ambiente, além de ganhos econômicos discutidos no item anterior.

A Tab. 9.10 traz os valores calculados referentes aos parâmetros exergoambientais do sistema de trigeração usando gás natural.

Tabela 9. 10 – Os parâmetros exergoambientais do sistema de trigeração.

Equipamento	Y_k^* (Pts/ano)	B_d (Pts/h)	b_f (Pts/h)	b_p (Pts/h)	rb_k (%)	fb_k (%)
Grupo gerador Leon Heimer	88,5	1,09	5,875	12,92	119,9	0,741
Refrigerador por absorção	39,5	0,15	0,16	0,11	1000,2	22,80
Trocador de calor da usina	5	0,002	0,29	0,29	1,3	1,9

Fonte: Autor e Marques (2018)*.

O grupo gerador Leon Heimer é o equipamento que gera a maior taxa de impacto ambiental pela destruição de exergia do sistema de trigeração, como pode ser visto na Tab. 9.10. Marques (2018) calculou, para esse mesmo parâmetro e equipamento, 1,43 Pts/h. Mais uma vez, essa diferença é devida a maior geração de energia elétrica pelo grupo gerador Leon Heimer considerada em suas simulações, pois também aumenta a exergia destruída por esse equipamento.

O fator exergoeconômico (fb_k) calculado é menor para o grupo gerador Leon Heimer do que para os outros equipamentos do sistema de trigeração. Isso é resultado do impacto ambiental causado pela exergia destruída nesse equipamento. A nível de comparação, o impacto ambiental causado pela exergia destruída no grupo gerador Leon Heimer é 545 vezes maior do que esse mesmo tipo de impacto ambiental provocado pelo trocador de calor da usina e pelo refrigerador por absorção.

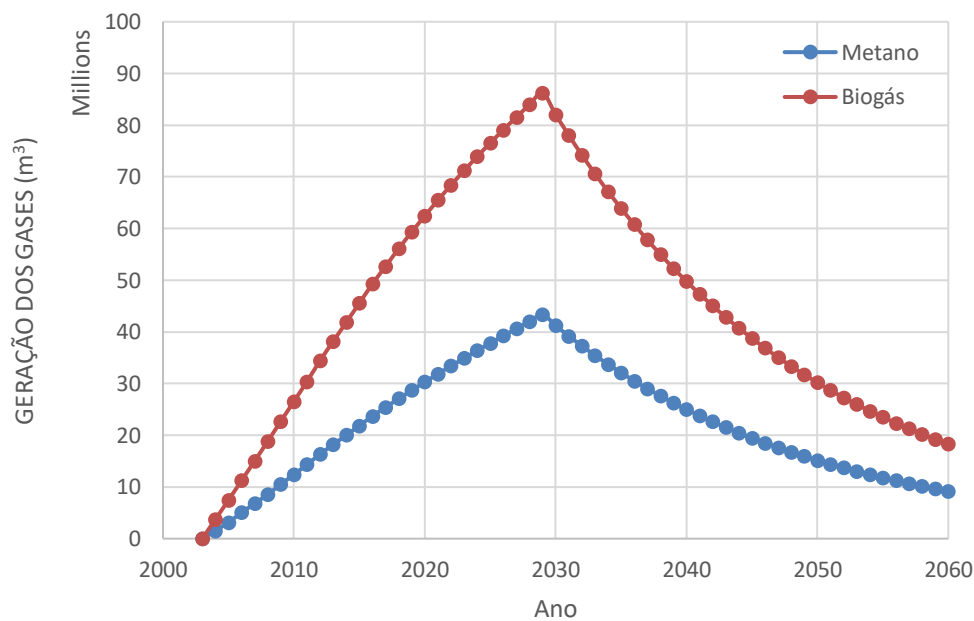
Quanto ao refrigerador por absorção, destaca-se o valor calculado relacionado a diferença relativa do impacto ambiental médio do produto e do insumo (rb_k), que atingiu o valor de 1000,2 %. Esse valor poderia ser menor, caso o refrigerador por absorção fosse fabricado no próprio Laboratório de Cogeração, pois o impacto ambiental causado pela fabricação e transporte seriam menores. Essa afirmação fica mais evidente quando se compara os impactos ambientais causados pelo trocador de calor da usina, que foi fabricado no local dos experimentos. Percebe-se que a produção do trocador de calor da usina e sua operação resultam nos menores impactos ambientais do sistema de trigeração, que são representados na Tab. 9.10 por Y_k (impacto ambiental relativo a aquisição) e pela

diferença relativa do impacto ambiental médio do produto e do insumo (rb_k).

9.6 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CALOR E FRIO PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA – PB

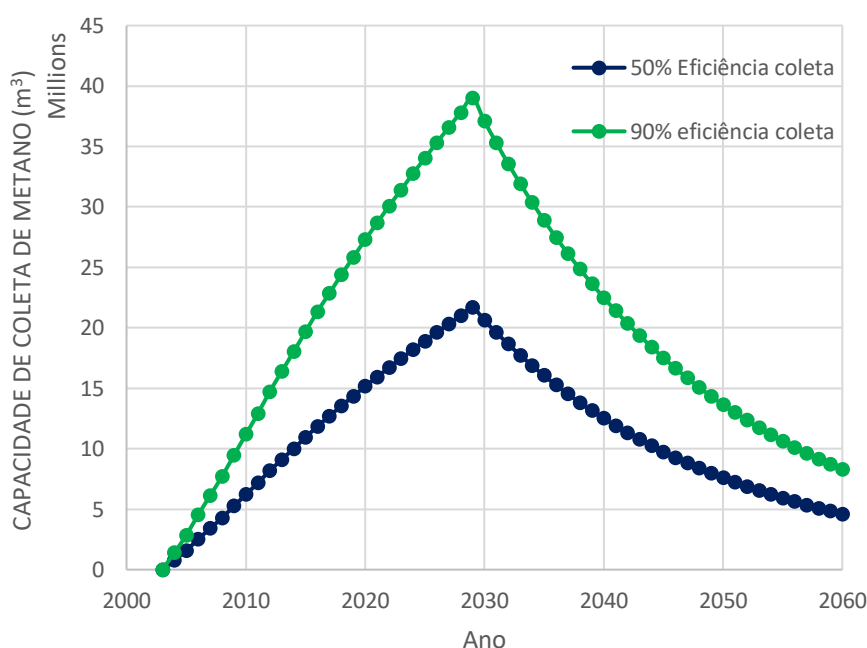
As projeções das quantidades de biogás e de metano produzidas pelo aterro sanitário de João Pessoa – PB estão ilustradas na Fig. 9.6. Já as as quantidades estimadas da captação de metano considerando as eficiências de coleta de 50% e 90 % pelo aterro sanitário estudado podem ser vistas nas Fig. 9.7.

Figura 9. 6 – Estimativa da produção de biogás e metano do aterro sanitário de João Pessoa-PB usando o método LandGem 3.02.



Fonte: Autor.

Figura 9. 7 – Estimativa da geração de metano considerando as eficiências de coleta de 50 e 90%.



Fonte: Autor.

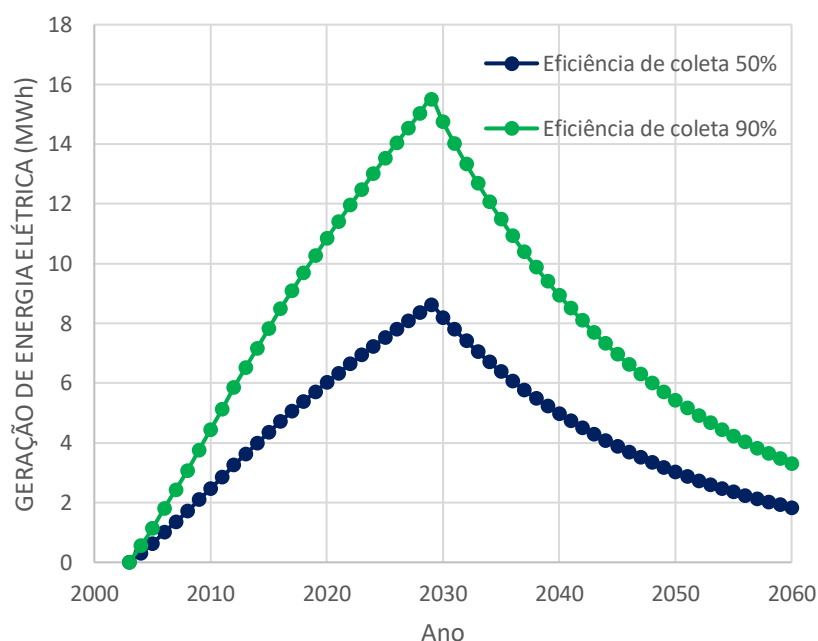
Percebe-se, na Fig. 9.6, que a estimativa da produção de biogás e de metano pelo aterro sanitário de João Pessoa atinge seu valor máximo de 88 milhões de m^3 , no ano de 2029, um ano após o encerramento do despejo de resíduos sólidos no aterro. Ainda segundo as estimativas através dos cálculos realizados, o aterro sanitário irá gerar, aproximadamente 2,6 bilhões de m^3 de biogás até o ano de 2060. Assim como o biogás, estima-se que a maior quantidade de metano será gerada no ano de 2029, atingindo 43 milhões de m^3 naquele ano e em 2060 a quantidade total gerada pelo aterro sanitário chegará a produção de 1,3 bilhões de m^3 . Além do metano, o *LandGem* considera que o biogás é composto pelo CO_2 e composto não orgânicos que não serão analisados neste trabalho.

Conforme se vê na Fig. 9.7, a máxima produção de metano considerando uma eficiência de coleta de 50% é de 21,66 milhões de m^3 no ano de 2029. Nesse mesmo ano, com uma eficiência de coleta de 90%, a produção de metano atinge 38,99 milhões de m^3 .

A partir dos resultados das estimativas da produção de metano pelo aterro sanitário de João Pessoa mostrados acima e fazendo uso das considerações e equações

discutidas no capítulo VIII, calculou-se a capacidade de geração de energia elétrica, frio e calor por esse aterro sanitário. As quantidades estipuladas de geração de energia elétrica podem ser vistas na Figs. 9.8.

Figura 9. 8 – Estimativa da produção de energia elétrica.



Fonte: Autor.

Percebe-se, nas Figs. 9.8, que no ano de 2029, a estimativa da máxima produção de energia elétrica varia entre 8,93 MWh e 16,07 MWh quando a eficiência da coleta de biogás oscila de 50% para 90%. Ressalta-se, também, que em 2020, ano corrente, a produção estimada de energia elétrica pelo aterro sanitário é de 11,24 MWh para uma eficiência de coleta de 90% e de 6,24 MWh quando a eficiência de coleta considerada diminui para 50%.

Atualmente, a URE do aterro sanitário produz 4,2 MWh, o que é uma produção menor do que foi estimado neste trabalho. A principal causa dessa diferença é que o aterro não aproveita totalmente o biogás gerado nas células, parte do biogás captado pelo sistema de compressão é direcionado ao queimador do aterro sanitário e não há nenhum proveito da energia liberada durante sua combustão.

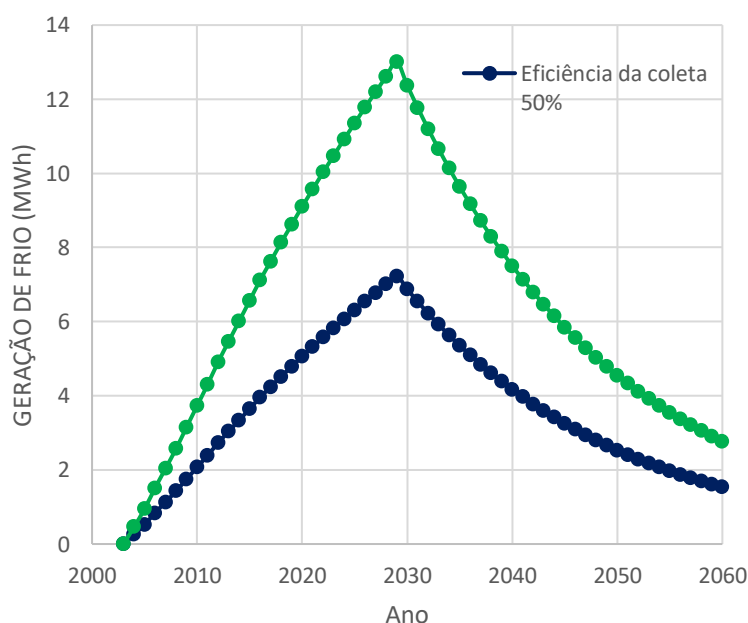
Sowunmi (2016) estimou um potencial de geração de energia elétrica usando biogás capaz de abastecer 6% da demanda doméstica em Abu Dhabi e 1,9% da meta de

uso de energias renováveis do país. Considerando todo estado da Paraíba e o ano de 2020, a máxima geração de energia elétrica estimada pelo aterro sanitário de João Pessoa corresponde a 10% da capacidade máxima de geração de energia elétrica das usinas solares que é de 108 MWh (GERAÇÃO, 2019).

Em João Pessoa, há uma termelétrica (UTE Termoparaíba) a óleo combustível e a óleo diesel cuja capacidade total de geração de energia elétrica é de 170,7 MWh ao tempo que consome 1630 toneladas de óleo por hora. A geração de energia elétrica estimada pelo aterro sanitário, no ano de 2020, corresponde 6,3% da capacidade de geração máxima da Termoparaíba, o que equivale a prevenir o consumo de 103 toneladas de óleo combustível por hora.

A capacidade de produção de frio e calor considerando o sistema de trigeração analisado neste trabalho estão ilustradas nas Figs. 9.9 e 9.10.

Figura 9. 9 – Capacidade de produção de frio considerando uma eficiência de coleta de biogás de 50 e 90%.

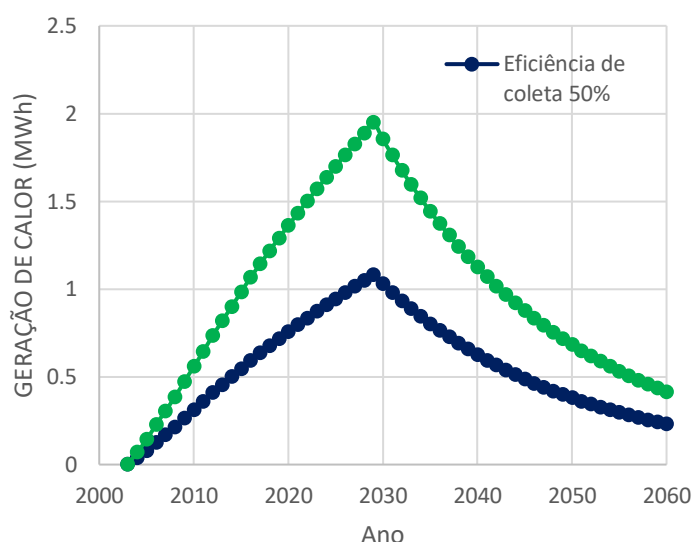


Fonte: Autor.

Verifica-se, nas Fig. 9.9, que a capacidade de produção de frio atinge seu valor máximo no ano de 2029, variando entre 13,01 MW e 7,23 MW quando a eficiência da coleta de biogás é 90% e 50%, respectivamente. Tais quantidades de frio

podem ser usadas por supermercados, indústrias, shoppings ou outros estabelecimentos.

Figura 9. 10 – Capacidade de produção de calor considerando uma eficiência de coleta de biogás de 50 e 90%.



Fonte: Autor.

Nota-se, na Fig. 9.10, que a capacidade de produção de calor alcança o maior valor, de 1,94 MWh, no ano de 2029 ao considerar uma eficiência de coleta de biogás de 90%. Quando a eficiência de coleta cai para 50 %, o maior valor para capacidade de produção de calor decresce para 1,08 MWh.

Os valores, ao longo dos anos, das estimativas de geração de energia elétrica, frio e calor pelo aterro sanitário de João Pessoa podem ser encontrados nas tabelas dispostas no Anexo I deste trabalho.

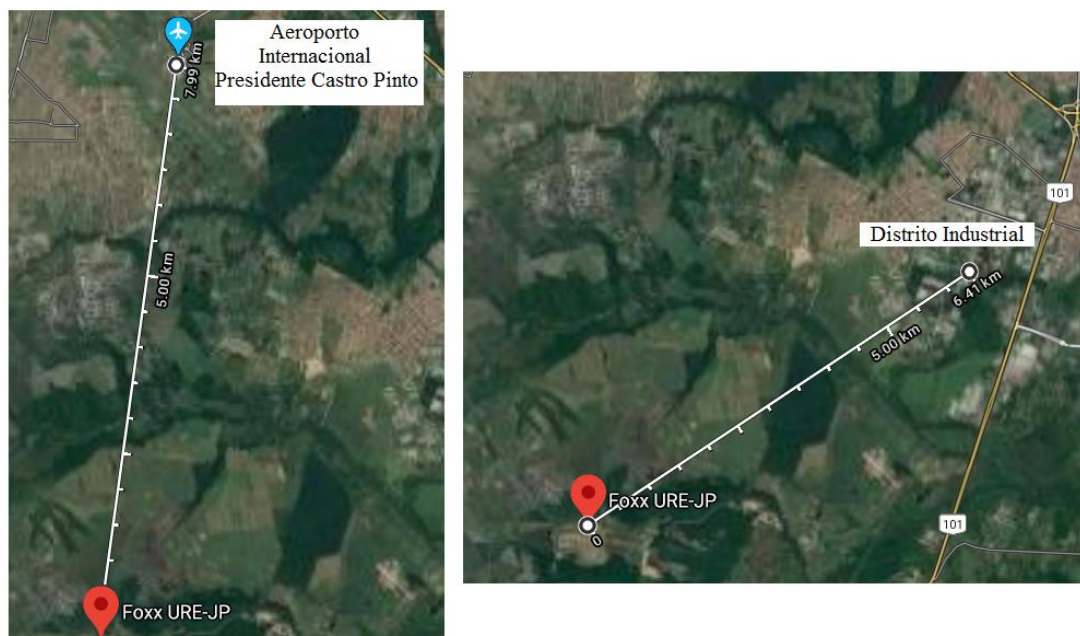
9.6.1 Possível destinação da geração de eletricidade, de frio e de calor a partir de um sistema de trigeração instalado no aterro sanitário de João Pessoa – PB

A energia elétrica gerada pelo URE do aterro sanitário de João Pessoa é vendida no mercado livre de energia ou através de leilões do governo brasileiro. O frio e o calor gerados através do uso do biogás em um sistema de trigeração podem ser comercializados com empresas situadas no entorno do aterro sanitário, já que a quantidade estimada neste

trabalho supera o consumo desses produtos pelas empresas instaladas no próprio aterro sanitário (EMLUR E FOXX HAZTEC).

Próximo ao aterro sanitário de João Pessoa, encontra-se o distrito industrial da cidade, onde está localizada a maior quantidade de indústrias e locais de armazenamento e distribuição da região. Há ainda, na vizinhança do aterro sanitário, o Aeroporto Internacional de João Pessoa – Presidente Castro Pinto. A proximidade entre o aterro sanitário, o aeroporto e o distrito industrial pode ser visto na Fig. 9.11.

Figura 9. 11 – Distâncias entre a URE do aterro sanitário, aeroporto e o distrito industrial.



Fonte: Autor.

Tanto o distrito industrial quanto o aeroporto internacional são consumidores de frio e de calor. O frio é necessário principalmente no resfriamento do ar ambiente visando o conforto térmico, que pode ser obtido através dos refrigerador por absorção, e o calor, na proposta apresentada neste trabalho (geração de biodiesel), e mais comumente na geração de vapor.

Parques industriais usam da alternativa de gerar energia usando grupos geradores para mitigar a possibilidade de blackouts e, ao mesmo tempo, de se aproveitar a energia que seria desperdiçada por grupos geradores para gerar frio e calor. Isso acontece, por

exemplo, na China, no parque industrial de Beijing, onde grupos geradores a gás natural, da marca Jenbacher (a mesma dos grupos geradores existentes no aterro sanitário de João Pessoa), produzem energia elétrica e, através da cogeração, frio e calor que são distribuídos às empresas do parque.

O *Toronto Pearson International Airport*, em Ontario, Canada, possui uma planta de cogeração, há uma distância de 2 km, cuja função é produzir eletricidade e gerar vapor (a partir da cogeração) ao aeroporto. Outro exemplo é o *Los Angeles International Airport* que possui uma planta de trigerção, dentro do próprio complexo aeroportuário, que fornece eletricidade, frio e calor à suas instalações.

Comumente o frio e o calor produzidos por um sistema de trigerção são transportados por meio de líquidos até os locais de consumo. A água, por ser um fluído abundante, não tóxica ao ser humano e ao meio ambiente e de custo acessível, é usada com essa finalidade.

Inevitavelmente, o fornecimento de frio e calor para os consumidores no em torno do aterro sanitário pressupõe um estudo cujo objetivo seja analisar a viabilidade econômica e ambiental da geração e comercialização de frio e calor pela URE instalada no aterro sanitário de João Pessoa.

CAPITULO X

CONCLUSÃO

Levando-se em consideração os resultados e as análises relacionadas aos testes experimentais do sistema de trigeração, as simulações usando o *LandGem* 3.02 e as estimativas de produção de eletricidade, frio e calor por meio de um sistema de trigeração utilizando biogás oriundo do aterro sanitário da cidade de João Pessoa – PB, pode-se concluir que:

i. Durante os testes experimentais e na análise de desempenho do sistema de trigeração usando biogás do aterro sanitário de João Pessoa constatou-se que o controle eletrônico do sistema de fornecimento de gás natural não é capaz de controlar o fluxo de biogás ao motor do grupo gerador Leon Heimer. Com a adaptação de um controle manual da vazão de biogás e de um misturador ar-biogás, foi possível dar partida e manter o motor funcionando. No entanto, o sistema manual não possibilita um fornecimento contínuo de uma mistura ar-combustível o que causa instabilidade na rotação do motor e impossibilita a operação do grupo gerador. Portanto, o desenvolvimento de um sistema de controle eletrônico da vazão de biogás é crucial para a operação do sistema de trigeração usando esse tipo de combustível.

ii. O controle de rotação do motor, calibrado para o funcionamento com gás natural, deve ser substituído por outro que possibilite o ajuste necessário à operação do motor com biogás.

iii. Durante os testes experimentais usando gás natural o sistema de trigeração produziu 53,7 kWe enquanto o grupo gerador Leon Heimer desenvolvia 36,3% de rendimento térmico. Na análise de desempenho foi possível listar as possíveis medidas para aumentar o rendimento térmico do motor, como a elevação da taxa de compressão e ajuste do ângulo de ignição do motor. O uso da mistura pobre proporcionou um consumo específico de 200 g/kWh ao motor do grupo gerador Leon Heimer, bem como reduzir os

níveis de emissões do motor.

iv. Utilizando gás natural como combustível o sistema de trigeração gerou 15,67 kW de frio e 6,86 kW de calor. O rendimento térmico do sistema de trigeração alcançou 51,7%

v. A análise exergoeconômica do sistema de trigeração mostrou que o motor do grupo gerador Leon Heimer é o maior consumidor e destruidor entre todos os componentes do sistema. O custo exergético da energia elétrica gerada é o maior relacionado aos fluxos exergéticos existentes no sistema, correspondendo a 39,937 R\$/h. O referente a mistura ar-gás natural é igual a 32,223 R\$/h. O menor custo foi calculado para a exergia recuperada no trocador de calor da usina, sendo igual a 1,87 R\$/h.

vi. Apesar de ser o maior destruidor de exergia, o grupo gerador Leon Heimer possui uma eficiência exergética igual 45,7%. Por outro lado, possui o maior custo de equipamento do sistema de trigeração, 14,26 R\$/h, o que eleva o custo do produto, a energia elétrica. A melhoria das variáveis exergoeconômicas desse equipamento se dará através das melhores sugeridas que visam o aumento do rendimento térmico do motor do grupo gerador Leon Heimer.

vii. O refrigerador por absorção possui o maior valor para a diferença relativa de custos, 1389%, que é resultado da baixa exergia do produto. O refrigerador por absorção possui um custo de equipamento 12,45 vezes maior do que o relacionado ao trocador de calor da usina. Uma forma de reduzir esse custo seria a fabricação de um refrigerador no próprio Laboratório de Cogeração.

viii. O calor recuperado no trocador de calor da usina possui a maior eficiência exergética, 54,8%, o menor custo de exergia destruída, 2,36 R\$/h, e o menor custo do produto, 1,887 R\$/h.

ix. Ao comparar custos de produção, usando resultados da análise econômica, a respeito da geração dos produtos do sistema de trigeração usando gás natural e dos custos dos produtos considerando meios convencionais, verificou-se que o sistema de trigeração gera energia elétrica com um custo 11% maior, frio e calor com custos 18% e 97 % menores, respectivamente.

x. Na análise exergoambiental, o ponto 1, que representa a mistura ar-gás natural tem a maior taxa de impacto ambiental do sistema de trigeração, 2,52 Pts/h. Essa quantidade, referente ao impacto do gás natural, é maior do que os valores calculados da taxa de impacto ambiental causado pela geração de energia elétrica, 2,49 Pts/h, e pelos gases de exaustão do motor, 0,387 Pts/h.

xi. O grupo gerador Leon Heimer é o equipamento do sistema de trigeriação que está associado aos maiores valores de: taxa de impacto ambiental relacionado a equipamento, taxa de impacto ambiental devido a destruição de exergia, impacto ambiental devido ao uso do combustível e da geração do produto.

xii. O refrigerador por absorção é o equipamento que possui a maior diferença relativa do impacto ambiental médio do produto e do insumo, 789%. O trocador de calor da usina, por sua vez, dispõe do menor valor considerando esse parâmetro, 1,3%, e a principal razão é que o trocador de calor foi fabricado no próprio Laboratório de Cogeração, enquanto o refrigerador de absorção foi importado.

xiii. A projeção da produção de biogás mostrou que no ano de 2029, irá acontecer a maior geração de biogás pelo aterro de João Pessoa, alcançando o valor de 88 milhões de m³ e que até o ano de 2060 o aterro produzirá 1,3 bilhões de m³ de biogás. Assim como a produção do biogás, a geração de metano se dá de forma semelhante. O valor máximo de geração de metano também foi no ano de 2029, quando foi calculado 43 milhões de m³.

xiv. Ao considerar as eficiências de coleta de biogás de 50 e 90%, a máxima produção de metano caiu para 21,66 milhões de m³ e 38,99 milhões de m³ para o ano de 2029, respectivamente.

xv. A capacidade máxima de geração de eletricidade estimada foi de 16,07 MW/h para uma eficiência de coleta de 90% e de 8,93 MW/h quando a eficiência de coleta considerada foi de 50%, ambos no de 2029. No ano corrente, 2020, as estimativas mostraram que a capacidade de geração de energia elétrica varia entre 6,24 MW/h e 11,24 MW/h, dependendo da eficiência de coleta. Esses valores estimados são maiores do que a produção atual da URE devido ao não aproveitamento energético de parte do biogás que é destinado ao queimador.

xvi. A projeção da máxima capacidade de geração de frio, utilizando os resultados experimentais do sistema de trigeriação, foi de 13,01 MW/h e de 7,23 MW/h quando a eficiência de coleta do biogás variou entre 90% e 50%, respectivamente.

xvii. A capacidade máxima de geração de calor estimada foi de 1,94 MW/h quando a eficiência de coleta considerada foi de 90% e de 1,08 MW/h para uma eficiência de coleta de 50, respectivamente.

xviii. A partir da posição geográfica do aterro sanitário, formulou-se a ideia de que o distrito industrial de João Pessoa e o Aeroporto Internacional Castro Pinto são possíveis consumidores dos produtos gerados por um sistema de trigeriação instalado no

aterro sanitário estudado neste trabalho.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando as análises feitas e as conclusões obtidas, sugere-se para um novo trabalho:

- Desenvolvimento de um sistema eletrônico de controle de vazão de biogás capaz de adequar a mistura ar-combustível ao motor do grupo gerador Leon Heimer. Bem como de um sistema de controle de rotação do motor cuja lógica de funcionamento permita o ajuste da curva de aceleração do motor durante o funcionamento com biogás;
- Mapeamento da taxa de compressão e ângulo de ignição ideal para o biogás;
- Investigar condições de operação do motor que permitam o empobrecimento da mistura ar-biogás fornecida ao motor;
- Fabricar, no próprio Laboratório de Cogeração, e analisar o desempenho de um refrigerador por absorção similar ao usado neste trabalho;
- Analisar os custos necessários à comercialização de frio e calor a partir da geração de um sistema de trigeração instalado no aterro sanitário de João Pessoa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, **ABNT NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <http://licenciadorambiental.com.br/wp-content/uploads/2015/01/NBR-8.419-NB-843-Apresentac%C3%A3o-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-SU.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://analiticaqmresíduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, **ABNT NBR 11174**: Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III - inertes. Rio de Janeiro, 1990. Disponível em: <https://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MTkzMg%2C>. Acesso em: 14 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, **ABNT NBR 12235**: Armazenamento de resíduos sólidos perigosos. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/nbr-12235-1992-armazenamento-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos-perigosos.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, **ABNT NBR 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS, **ABNT NBR 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS

ESPECIAIS, ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. Edição especial 15 anos. Disponível em: http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf. Acesso em: 10 jan. 2019.

ACHINAS, S.; EUVERINK, G.J.W. Theoretical analysis of biogas potencial prediction from agricultural waste. **Resource-Efficient Technologies** 2, p. 143–147, 2016.

ALAM, P.; AHMADE, K. Impact of solid waste on health and the environment. **Special Issue of International Journal of Sustainable Development and Green Economics (IJSDEG)**, ISSN nº: 2315-4721, 2013.

ALCÂNTARA, Suellen Cristina Sousa. **Análise Energética e Financeira de um Sistema de Trigeração de Energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ALMEIDA, A.S.O.; SALES, M.V.; LIMA, M.V.; NETO, J.C. Determinação do coeficiente de descarga para orifícios de parede delgada considerando números de Reynolds reduzidos. **Revista DAE**, nº 210, vol. 66, 2018.

ALVES, André Filipe Mendes. **Influência do Resfriamento da Turbina no Desempenho de um Motor Diesel Turboalimentado Ottolizado para Gás Natural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

AMINI, E.; NEMATOLLAHI, H.; BANESTANI, N.M. Estimation and Modeling of biogas production in rural small landfills (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari and Yazd rural areas. **Environmental Energy and Economic Research**, vol. 1, p. 383-395, 2017.

ANDRADE, Rodrigo Latuf de. **Avaliação de desempenho de um grupo gerador à biocombustíveis para geração de energia elétrica distribuída**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia em Biocombustíveis) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

ANTONIASSI, B. A; SILVA, M. C. K. Importância do gerenciamento de resíduos perigosos

em uma universidade: estudo de caso dos laboratórios de ensino e pesquisa. **Revista eletrônica Sistema & Gestão**, Vol. 12, nº 2, p. 183-191, 2017.

BARLAZ, M.; DAVID, K.A.B.; FRANÇOIS, G.; RICHARD, C.T. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical transactions of the royal society B biological sciences**, vol. 364, p. 1985 – 1998, 2009.

BHASKOR, J. B.; SAHA, U. K. Optimization of injection timing and compression ratio of a raw biogas powered dual fuel diesel engine. **Applied Thermal Engineering**, vol. 92, p. 111-121, 2015.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1996

BICHO, Hugo Emanuel Fino dos Santos. **Cogeração e Trigeração: Estudo das Tecnologias, Enquadramento Jurídico e Aplicações à Indústria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Ambiental) – Universidade da Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2018.

BLIGARI, H.; RAHDAR, S.; BANESHI, M.M.; AHAMADABADI, M.; SAEIDI, M.; NAROOIE, M.R.; SALIMI, A.; KHAKSEFIDI, R. Estimating the amount of methane gas generated from the solid waste using the LandGem software, Sistan and Baluchistan. **Journal of Global Pharma Technology**, vol. 9, p. 35-41, 2017.

BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D.J. Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil. **Interciência**, vol. 43, nº 10, 2018.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna – Volume 1**. 2ª ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012.

CASARIN, Marco Antônio. **Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CAVALCANTE, Antônio Wilton Araújo. **Análise energética e exergética de um sistema de alto desempenho de um grupo: motor de combustão interna a gás natural – alternador síncrono.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

CAVALCANTI, E. J. C. **Análise Exergoeconômica e Exergoambiental.** 1ª ed., Editora Edgard Blucher Energy, São Paulo, 2016.

CAVALCANTI, E.J.C; LIMA, M.S.R.; SOUZA, G.F. Comparison of carbon capture system and concentrated solar power in natural gas combined cycle: Exergetic and exergoenvironmental analysis. **Renewable Energy**, vol. 156, p. 1336 – 1347, 2020.

CORDEIRO, Marcos Cézar Lima. **Estudo termodinâmico e avaliação experimental do protótipo 01 do sistema de refrigeração por absorção com o par água-brometo de lítio da Recogás.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

CHANG, C.W.; LEE, T.H.; LIN, W.T.; CHEN, C.H. Electricity generation using biogas from swine manure for farm power requirement. **International Journal of Green Energy**, vol. 12, p. 339–346, 2015.

CHEOLWOONG, P.; SUNYOUP L.; CHANGGI, K.; YOUNG, C. A comparative study of lean burn and exhaust gas recirculation in an HCNG-fueled heavy-duty engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 42, p. 26094-26101, 2017.

CHO, H.; HE, B. Combustion and Emission Characteristics of a Natural Gas Engine under Different Operating Conditions. **Environmental Engineering Research**, vol. 14, p. 95-101, 2009.

CREUTZBERG, R.; FERRARI, M.J.; ENGELAGE, E. Análise de descarte de resíduos sólidos: Estudo de caso em uma empresa do ramo metal mecânica. **Anais do V Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade.** São Paulo, Brasil, 2016.

DALPAZ, Ricardo. **Avaliação energética do biogás com diferentes percentuais de metano na produção de energia térmica e elétrica**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Ambientais Sustentáveis) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2019.

DU, Y.; YU, X.; WANG, J.; WU, H.; DONG, W.; GU, J. Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection. **International Journal of Hydrogen Energy**, vol. 41, p. 3240-3248, 2015.

FILHO, P.P. **Os motores a combustão interna**. 2ª ed., Belo Horizonte: Lemi S.A., vol. 1, 405 p., 1991.

FONSECA, J.C.L. **Manual para gerenciamento de resíduos perigosos**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

GANESHAN, V. **Internal Combustion Engines**. 3ª ed., MC Graw Hill Publishing Company Limited, 7 West Patel Nagar, New Dehli, 2007.

GERAÇÃO de energia solar cresce 86,6% no país neste primeiro semestre. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**, Comunicação CCEE, 2019. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticiaeitura?contentid=CCEE_650025&_afLoop=92812419116661&_adf.ctrl-state=16ro3g2tjg_45#!%40%40%3Fcontentid%3DCCEE_650025%26_afLoop%3D92812419116661%26_adf.ctrl-state%3D16ro3g2tjg_49. Acesso em: mar. 2020.

GUINÉE, J.B. Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 7, p. 311-313, 2001.

GUEDES, M.J.F.; MOREIRA, F.G.S.; AIRES, K. O.; CURI, R. C.; MONTEIRO, V.E.D. Simulação do Potencial de Geração de Biogás para o Aterro Sanitário em Campina Grande – PB. **II Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências**, 2017.

GUPTA, S.B.; BIRUDUGANTI, M.; BIHARI, B.; SEKAR, R. **Natural Gas - Extraction to**

End Use. 1ª ed., IntechOpen, 2012.

HENDGES, A.S. Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil em 2016. **EcoDebate**, 2016. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2017/10/06/disposicao-final-dos-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-em-2016-artigo-de-antonio-silvio-hendges/>. Acesso em: 12 dez. 2018.

HEYWOOD, J. **Internal combustion engine fundamentals**. 1ª ed. McGraw-Hill, Singapore, 1988.

HUTAGALUNG, S.S. Estimation Optimal Value of Discharge Coefficient in a Venturi Tubes. 2019. **Journal of Physics: Conference Series** 1230, 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Relatório de Pesquisa, Governo Federal, Brasília, 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=17247. Acesso em: 13 jan. 2019.

JAHIRUL, M. I., MASJUKI, H. H., SAIDUR, R., KALAM, M. A., JAYED, M. H., WAZED, M. A. Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine. **Applied Thermal Engineering**, vol. 30, p. 2219-2226, 2010.

JOLLIET, O. Life cycle impact assessment definition: Study of the SETAC-UNEP life cycle initiative. **United Nations Environment Programme**, 2003.

JUNG, C.; PARK, J.; SONG, S. Performance and NOx emissions of a biogas-fueled turbocharged internal combustion engine. **Energy**, vol. 86, p. 186-195, 2015.

KJAER, J.J.; BRIX, M.W.; LARS, R.; BRIAN, E. Conventional and advanced exergoenvironmental analysis of an ammonia-water hybrid absorption-compression heat pump. **28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems**, Pau, France, 2015.

KOOP, M.P.; ARAUJO, C.A.S.; FIGUEIREDO, K.F. Gestão dos resíduos sólidos

hospitales: estudo de casos em hospitais do Rio de Janeiro e de São Paulo. **Gestão Contemporânea**, Porto Alegre, ano 10, n. 13, p. 71-95, 2013.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Energy**, vol. 31, p. 1257–1289, 2006.

LAZZARETO, A. Fuel and product definitions in cost accounting evaluations: is it a solved problem? **12th Joint European Thermodynamics Conference Brescia**, p. 244 – 250, 2013.

LEITE, Ana Livia Formiga Leite. **Análise exergoeconômica de um sistema de trigeração no setor terciário: um estudo de caso em um resort**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

LEÓN, J.A.; MONTERO, G.; CORONADO, M.A.; GARCÍA, C.; CAMPBELL, H.E.; AYALA, J.R.; MONTES, D.; SAGASTE, C.A. Renewable Energy Integration: Economic Assessment of Solar Energy to Produce Biodiesel at Supercritical Conditions. **International Journal of Photoenergy**, p. 1-9, 2018.

LICHTIG, J.; CARVALHO, M.F.H.; KIRA, C.S.; MAIO, F.D. Descarte de resíduos de laboratório contendo metais pesados (Hg, Pb, Cd) por adsorção em hidróxido de ferro (III). **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, vol. 63, p. 70 – 72, 2004.

LLERENA, O. Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo. **INGENIUS**, nº 19, p. 29 – 39, 2018.

LOPEZ, Efrain Rafael Acevedo. **Localização de aterro sanitário baseado em modelo de decisão multicritério**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

LOVATI, Cláudio Vill. **Otimização operacional de um sistema de trigeração para atender demandas variáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

LUIZ, J.D.; LUIZ, G.E.; REIS, M.S.; CALVO, M.J.; RABAÇA, G.V.; CARDOSO, T.E. **Plano de Gestão de Resíduos Sólidos do Centro Tecnológico**. Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, SC, 93 p., 2013.

MAGALHÃES, Geísa Vieira Vasconcelos. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MARQUES, Adriano da Silva. **Avaliação exergoeconômica e ambiental de uma unidade de micro-trigeração**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

MARQUES, A.S.; CARVALHO, M.; LOURENÇO, A.B.; SANTOS, C.A.C. Energy, exergy, and exergoeconomic evaluations of a micro-trigeneration system. **J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng**, vol. 42, 324, 2020.

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

MEYER, L.; TSATSARONIS, G.; BUCKGEISTER, J.; SCHEBEK, L. Exergoenvironmental Analysis for Evaluation of the Environmental Impact of Energy Conversion Systems. **Energy**, vol. 34, p. 75 – 89, 2009.

MOROSUK, T. & TSATSARONIS, G. Exergoenvironmental analysis is a new tool for evaluation of an energy conversion system. **Энергетика і автоматика**, n ° 4, 2013.

MORTAZA A.; MEISAM T.; ESMAIL K.; TAHA R.S., ALI D. Exergoeconomic analysis of a DI diesel engine fueled with diesel/biodiesel (B5) emulsions containing aqueous nano cerium oxide. **Energy**, vol. 149, p. 967 – 978, 2018.

NETO, João Luiz de Medeiros. **Análise Comparativa das Metodologias de Estudo**

Exergoeconômico para um Sistema de Refrigeração por Absorção de Vapor de Duplo Efeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

NASCIMENTO, A.A.; OLIVEIRA, R.J.; MENEZES, J.E. A reciclagem do lixo urbano como fonte de renda, e a preservação dos recursos naturais e ambientais. **Revista Gestão Ambiental**, vol. 13, p. 22 – 37, 2017. 2017.

OCHOA, A.A.; DINIZ, H.; SANTANA, W.; SILVA, P.; OCHOA, L. Aplicação de uma fonte alternativa de energia termelétrica a gás natural visando reduzir o custo com energia elétrica em um edifício comercial. **HOLOS**, ano 31, vol. 1, 2015.

OCHOA, A.A.V.; DUTRA, J.C.C.; HENRÍQUEZ, J.R.; SANTOS, C.A.C. Techno-Economic and Exergoeconomic Analysis of a Micro Cogeneration System for a Residential use. **Acta Scientiarum**, vol. 38.3, p. 327-338, 2016.

OLIVER, S.; SILVA, V.L.; SOBRINHO, M.A.M. Resíduos industriais ricos em metais pesados e implicações ambientais associadas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, nº 9, p. 4 – 8, 2008.

ONU, 2017. Towards a pollution-free planet. **United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme**, 3ª session, Nairobi, Kenya, 2017.

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. **Municipal Solid Waste Management and Energy Recovery – Current Technologies and Future Trends**. 1ª ed., vol. 1, IntechOpen, 2019.

PIÑAS, J.A.V.; VENTURINI, O.J.; LORA, E.E.S.; OLIVEIRA, M.A.; ROALCABA, O.D.C. Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGem (EPA) e Biogás (Cesteb). **Revista Brasileira de Estudos de População**, Rio de Janeiro, vol. 33, nº 1, p. 175 – 188, 2016.

PETRAKOPOULOU, F.; TSATSARONIS, G.; MOROSUK, T.; PAITAZOGLU, C.

Environmental evaluation of a power plant using conventional and advanced exergy-based methods. **Energy**, vol. 45, p. 23 – 30, 2012.

PLOCOSTE, T.; KOALY, S.J.; PETIT, R. H.; ROUSSAS, A. Estimation of methane emission from a waste dome in a tropical insular area. **International Journal of Waste Resources**, vol. 6, 7 p., 2016.

RANZI, A.; ANCONA, C.; ANGELINI, P.; BADALONI, C.; CERNIGLIARO, A.; CHIUSOLO, M. Health impact assessment of policies for municipal solid waste management: findings of the SESPIR Project. **Epidemiologia e Prevenzione**, Itália, vol. 38, p. 313 – 322, 2014.

ROCHA, Danilo Henrique Donato. **Análise exergoambiental de centrais termelétricas supercríticas e ultrassupercríticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

ROCHA, Márcio Andrade. **Estudo teórico-experimental de um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série usando água/brometo de lítio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

ROCHA, M.S.; ANDREOS, R.; SIMÕES-MOREIRA, J.R. Performance tests of two small trigeneration pilot plants. **Applied Thermal Engineering**, vol. 41, p. 84 – 91, 2012.

RODRIGUE, K.A.; ESSI, K.; CYRIL, K.M.; ALBERT, T. Estimation of methane emission from Kossihouen sanitary landfill and its electricity generation potential (Côte d'Ivoire). **Journal of Power and Energy Engineering**, vol. 6, p. 22 – 31, 2018.

SAMANTA, A.; DAS, S.; ROY, P. C. Performance analysis of a biogas engine. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, vol. 5, Especial Issue: 01, 2016.

SANTOS, T. Cenário brasileiro da gestão dos resíduos sólidos urbanos e coleta seletiva. **Anais do IV SINGEP**, São Paulo: Universidade Nove de Julho, 2017.

SCHRÖDER, D.; HEGNER, R.; GÜNGÖR, A.; ATAKAN, B. Exergoeconomic analysis of an HCCI engine polygeneration process. **Energy Conversion and Management**, vol. 203, 112085, 2020.

SILVA, Gisely Alves. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SILVA, Manoel Rodrigues. **Produção e caracterização do biogás de vinhaça com dejetos de bovinos visando a geração de energia e de biofertilizante**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2015.

SILVA, Rodrigo Gomide de. **Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

SILVESTRE, Victor Valente. **Levantamento do potencial de geração de biogás de aterro sanitário para aproveitamento sob a forma de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUZA, Gabriel Fernandes de. **Resultados exergoeconômicos e exergoambientais de um ciclo de potência combinado com sistema de captura e armazenamento de carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SOUZA, R.; SANTOS, C.A.C.; OCHOA, A.; MARQUES, A.S. Proposal and 3E (energy, exergy, and exergoeconomic) assessment of a cogeneration system using an organic Rankine cycle and an Absorption Refrigeration System in the Northeast Brazil: Thermodynamic investigation of a facility case study. **Energy Conversion and Management**, vol. 217, 2020.

SOWUNMI, A.; MAMONE, R.M.; BASTIDAS-OYANEDEL, J.R. Biogas potential for electricity generation in the Emirate of Abu Dhabi. **Biomass Conversion and Biorefinery**,

vol. 6, p. 39 – 47, 2016.

UDO DE HAES, H.A.; GOEDKOOP, M.J.; FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M.Z. **Life cycle impact assessment — striving towards best practice**. Proceedings. Pensacola, Florida: SETAC Press, 2002

VIEIRA, G.E.G.; CAMPOS, C.E.A.; TEIXEIRA, L.F.; COLEN, A.G.N. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 16, n° 26, p. 101 –220, 2015.

WEI, L.; GENG P. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. **Fuel Processing Technology**, vol. 142, p. 264 – 278, 2016.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 5^a ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

WORLD BANK GROUP. **What a waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. International Bank for Reconstruction and Development, Washington DC, USA, 2018.

XAVIER, Beatriz Helene. **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, 2016.

YU, X.; DU, Y.; SUN, P.; LIU, L.; WU, H.; ZUO, X. Effects of hydrogen direct injection strategy on characteristics of lean-burn hydrogen–gasoline engines. **Fuel**, vol. 208, p. 602 – 611, 2017.

ZHANG, F. R.; OKAMOTO, K.; MORIMOTO, S.; SHOJI F. Methods of increasing the BMEP (Power Output) for natural gas spark ignition engines. **SAE Technical Paper**, Spring Conference, paper n° 981385, 1998.

APÊNDICE I – OS CÁLCULOS RELACIONADOS AO PROJETO DO BANCO DE CARGAS DESENVOLVIDO NO LABORATÓRIO DE COGERAÇÃO.

Os cálculos foram feitos usando o software MathCad.

$r_w = 5.50 \, \Omega$	Resistência do fio (níquel-cromo)
$V = 380 \, V$	Tensão na saída do gerador elétrico
$I_{max} = 6,90 \, A$	Corrente máxima suportado pelo fio níquel-cromo

Potência

$$P = I_{max} * V$$

$$P = 2,622 \, kW$$
 Potência máxima dissipada por cada resistência

Resistência Total

$$R = \frac{P}{I_{max}^2}$$

$$R = 55,072 \, \Omega$$
 Resistência elétrica total necessária em cada uma das resistências

Comprimento do fio para cada uma das resistências

$$L = \frac{R}{r_w}$$

$$L = 10,013 \, m$$
 Quantidade de fio necessária para confeccionar uma resistência

Quantidade de resistências

$$Q_r = \frac{70 \, kW}{P}$$

$$Q_r = 26,7$$
 São necessárias 27 resistências elétricas para produzir 70 kW

Quantidade de fio

$$Q_f = Q_r * L$$

$$Q_f = 267,3 \text{ m}$$

Quantidade de fio necessária à produção de 70 kW

APÊNDICE II – OS CÁLCULOS RELACIONADOS ÀS QUANTIDADES DE CALOR RECUPERADAS PELO REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO E PELO TROCADOR DE CALOR DA USINA DE BIODIESEL.

Fração Molar dos gases de escape:

$$\begin{array}{llll}
 \text{CO}_2 & \text{O}_2 & \text{HC} & \text{H}_2\text{O} \\
 \text{XCOO} := \text{COOum} = 0.062 & \text{XOO} := \text{OOum} = 0.046 & \text{XHC} := \text{HCum} = 5.937 \times 10^{-4} & \text{XH2O} := \text{H2Oum} = 0.267 \\
 \text{CO} & \text{NO}_x & & \text{N}_2 \\
 \text{XMonoxC} := \text{MonoxCum} = 6.597 \times 10^{-4} & \text{XNO} := \text{NOum} = 1.099 \times 10^{-3} & \text{XN2} := \text{N2um} = 0.623 &
 \end{array}$$

Massas Molares:

$$\begin{array}{lllllll}
 \text{CO}_2 & \text{CO} & \text{O}_2 & \text{NO}_x & \text{HC} & \text{N}_2 & \text{H}_2\text{O} \\
 \text{MMCO2} := 44.01 & \text{MMCO} := 28.01 & \text{MMO2} := 31.999 & \text{MMNO} := 30.006 & \text{MMHC} := 16 & \text{MMN2} := 28.013 & \text{MMH2O} := 18.015
 \end{array}$$

Determinação do calor específico dos componentes dos gases de exaustão em função da temperatura (Van Wylen, 2007):

$$\text{Cp} := \begin{pmatrix} 22.6 & 5.981 \cdot 10^{-2} & 3.501 \cdot 10^{-5} & 7.469 \cdot 10^{-9} \\ 28.16 & 0.1675 \cdot 10^{-2} & 0.5372 \cdot 10^{-5} & 2.222 \cdot 10^{-9} \\ 25.48 & 1.520 \cdot 10^{-2} & 0.7155 \cdot 10^{-5} & 1.312 \cdot 10^{-9} \\ 29.34 & -0.0938510 \cdot 10^{-2} & 0.974710 \cdot 10^{-5} & -4.187 \cdot 10^{-9} \\ 19.89 & 5.025 \cdot 10^{-2} & 1.269 \cdot 10^{-5} & 11.01 \cdot 10^{-9} \\ 28.9 & -0.1571 \cdot 10^{-2} & 0.8081 \cdot 10^{-5} & 2.873 \cdot 10^{-9} \\ 32.34 & 0.1923 \cdot 10^{-2} & 1.005 \cdot 10^{-5} & 3.595 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{CO2} \\ \text{CO} \\ \text{O2} \\ \text{NO} \\ \text{CH4} \\ \text{N2} \\ \text{H2O} \end{array}$$

Massa dos gases de exaustão:

$$\text{MasEx} := 0.076$$

Temperatura de entrada no refrigerador por absorção

$$\text{TE} := (592 + 273.15)$$

Temperatura de saída do refrigerador por absorção

$$\text{TS} := (384 + 273.15)$$

Given

$$Q = \text{MasEx} \cdot \left[\frac{\text{XCOO}}{\text{MMCO}_2} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{0,0} + \text{Cp}_{0,1} \cdot T + \text{Cp}_{0,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{0,3} \cdot T^3 \right) dT + \frac{\text{XMonoxC}}{\text{MMCO}} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{1,0} + \text{Cp}_{1,1} \cdot T + \text{Cp}_{1,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{1,3} \cdot T^3 \right) dT \dots \right. \\ \left. + \frac{\text{XNO}}{\text{MMNO}} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{3,0} + \text{Cp}_{3,1} \cdot T + \text{Cp}_{3,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{3,3} \cdot T^3 \right) dT + \frac{\text{XHC}}{\text{MMHC}} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{4,0} + \text{Cp}_{4,1} \cdot T + \text{Cp}_{4,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{4,3} \cdot T^3 \right) dT \dots \right. \\ \left. + \frac{\text{XH}_2\text{O}}{\text{MMH}_2\text{O}} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{6,0} + \text{Cp}_{6,1} \cdot T + \text{Cp}_{6,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{6,3} \cdot T^3 \right) dT + \frac{\text{XOO}}{\text{MMO}_2} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{2,0} + \text{Cp}_{2,1} \cdot T + \text{Cp}_{2,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{2,3} \cdot T^3 \right) dT \dots \right. \\ \left. + \frac{\text{XN}_2}{\text{MMN}_2} \cdot \int_{\text{TS}}^{\text{TE}} \left(\text{Cp}_{5,0} + \text{Cp}_{5,1} \cdot T + \text{Cp}_{5,2} \cdot T^2 + \text{Cp}_{5,3} \cdot T^3 \right) dT \right]$$

Find(Q) → 24.577482050405016273

Oref := 24.58kW

Calculo Calor no trocador de calor da usina

$$\text{moleo} := 0.143 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{cpoleo} := 1.6 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Temperatura do óleo na entrada do trocador de calor Temperatura do óleo na saída do trocador de calor

$$T_2 := (120 + 273.15)\text{K} \quad T_1 := (90 + 273.15)\text{K}$$

$$Q_{\text{usina}} := \text{moleo} \cdot \text{cpoleo} \cdot (T_2 - T_1) \quad Q_{\text{usina}} = 6.864 \times 10^3 \text{ W}$$

ANEXO I – VALORES CORRESPONDENTES AS ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, FRIO E CALOR PELO ATERRO SANITÁRIO DE JOÃO PESSOA.

Abaixo estão ilustrado, em uma tabela, os resultados referentes as estimativas feitas neste trabalho relativas as potencialidades de produção do aterro sanitário estudado.

	Energia Elétrica (MW/h)		Frio (MW/h)		Calor (MW/h)	
Eficiência de coleta	0.5	0.9	0.5	0.9	0.5	0.9
Ano						
2003	0	0	0	0	0	0
2004	0.316435936	0.569584684	0.256217218	0.461190993	0.038355871	0.069040568
2005	0.65047034	1.170846612	0.526683863	0.948030954	0.07884489	0.141920801
2006	1.036548964	1.865788136	0.839290555	1.510723	0.125642299	0.226156138
2007	1.398932371	2.518078269	1.132711302	2.038880344	0.16956756	0.305221608
2008	1.764080784	3.175345412	1.428370865	2.571067558	0.213827974	0.384890353
2009	2.163791497	3.894824694	1.752015418	3.153627752	0.262277757	0.472099963
2010	2.558221115	4.604798008	2.071383885	3.728490993	0.310087408	0.558157334
2011	2.951777494	5.31319949	2.390045292	4.302081526	0.357791211	0.644024181
2012	3.367175029	6.060915052	2.726391417	4.907504551	0.408142428	0.73465637
2013	3.747875172	6.746175309	3.034643169	5.462357705	0.4542879	0.817718219
2014	4.124357133	7.42384284	3.339479473	6.011063051	0.499922077	0.899859738
2015	4.503899146	8.107018462	3.64679349	6.564228282	0.545927169	0.982668905
2016	4.884360526	8.791848948	3.954851917	7.118733451	0.5920437	1.06567866
2017	5.231471815	9.416649268	4.235906876	7.624632377	0.634117796	1.141412032
2018	5.580185727	10.04433431	4.518259473	8.132867052	0.676386149	1.217495068
2019	5.911628823	10.64093188	4.786627944	8.6159303	0.71656107	1.289809925
2020	6.245438696	11.24178965	5.056912787	9.102443016	0.757022872	1.36264117
2021	6.562704632	11.81286834	5.313802054	9.564843697	0.795479349	1.431862829
2022	6.883028773	12.38945179	5.57316754	10.03170157	0.834306518	1.501751732
2023	7.187466684	12.93744003	5.819669994	10.47540599	0.871208083	1.568174549
2024	7.49558843	13.49205917	6.069155238	10.92447943	0.908556173	1.635401112
2025	7.788419064	14.01915432	6.306259315	11.35126677	0.944050796	1.699291432
2026	8.085499627	14.55389933	6.546804546	11.78424818	0.980060561	1.764109009
2027	8.367827562	15.06208961	6.77540462	12.19572832	1.014282129	1.825707832
2028	8.654917649	15.57885177	7.007860593	12.61414907	1.049080927	1.888345669
2029	8.92774235	16.06993623	7.228765927	13.01177867	1.082150588	1.947871058
2030	8.492331217	15.28619619	6.876214852	12.37718673	1.029373481	1.852872266
2031	8.078155336	14.54067961	6.540857897	11.77354421	0.979170344	1.762506619
2032	7.684179052	13.83152229	6.221856493	11.19934169	0.931415643	1.676548157
2033	7.309417217	13.15695099	5.918412971	10.65314335	0.885989966	1.594781938
2034	6.952932733	12.51527892	5.629768564	10.13358342	0.842779725	1.517003505
2035	6.613834202	11.90490156	5.35201512	9.639362721	0.801676873	1.443018371
2036	6.291273702	11.32429266	5.094025252	9.169245453	0.762578631	1.372641535
2037	5.984444663	10.77200039	4.845586709	8.722056076	0.725387232	1.305697017
2038	5.692579852	10.24664373	4.609264656	8.296676381	0.690009679	1.242017422
2039	5.414949457	9.746909023	4.384468166	7.8920427	0.65635751	1.181443518
2040	5.150859256	9.27154666	4.170635131	7.507143235	0.624346576	1.123823838
2041	4.899648885	8.819367994	3.967230855	7.141015539	0.593896835	1.069014302
2042	4.66069019	8.389242341	3.773746723	6.792744102	0.564932144	1.01687786
2043	4.433385647	7.980094164	3.589689824	6.461458063	0.537380078	0.967284141
2044	4.217166877	7.590900379	3.414627241	6.146329034	0.511171743	0.920109137
2045	4.011493222	7.220687799	3.248093906	5.84656903	0.486241603	0.875234885
2046	3.815850389	6.8685307	3.089682497	5.561428494	0.46252732	0.832549176
2047	3.629749169	6.533548505	2.938996903	5.290194426	0.439969596	0.791945273
2048	3.452724213	6.214903584	2.795660333	5.032188599	0.418512026	0.753321647
2049	3.284332866	5.91179916	2.659314369	4.786765865	0.398100954	0.716581716
2050	3.124154062	5.623477312	2.529618077	4.553312539	0.378685341	0.681633614
2051	2.971787271	5.349217088	2.406247148	4.331244866	0.360216639	0.64838995
2052	2.826851495	5.088332692	2.28889309	4.120007561	0.342648666	0.616767599
2053	2.688984321	4.840171778	2.177262456	3.919072421	0.325937493	0.586687488
2054	2.557841008	4.604113815	2.071076113	3.727937004	0.310041334	0.558074402
2055	2.43309363	4.379568534	1.970068539	3.546123371	0.29492044	0.530856792
2056	2.314430254	4.165974457	1.873987163	3.373176893	0.280537	0.504966601
2057	2.201554158	3.962797485	1.782591731	3.208665115	0.266855049	0.480339089
2058	2.094183095	3.769529571	1.695653706	3.052176671	0.253840375	0.456912675
2059	1.99204858	3.585687444	1.612955699	2.903320258	0.241460434	0.434628781
2060	1.894895225	3.410811404	1.534290921	2.761723658	0.22968427	0.413431685