



INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE ENERGIA

Análise teórica de tecnologias de recuperação energética do gás
de aterro em Foz do Iguaçu

Maiara Fernanda Garcia

Foz do Iguaçu
2018



INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE ENERGIA

Análise teórica de tecnologias de recuperação energética do gás de aterro em Foz do Iguaçu

Maiara Fernanda Garcia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof.Dr. Luis Evelio G. Acevedo

Coorientador: Prof.Dr. Ricardo M. Hartmann

Maiara Fernanda Garcia

Análise teórica de tecnologias de recuperação energética do gás de aterro em Foz do Iguaçu

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.Dr. Luis Evelio G. Acevedo

Orientador
UNILA

Prof.Dr. Ricardo M. Hartmann

Coorientador
UFSC

Prof. M.Sc. Fabyo Luiz Pereira
Avaliador UNILA

Prof. Dra. Juliana Tófano de Campos Leite
Toneli
Avaliador Externo

M.Sc.Rogério Meneghetti
Avaliador Externo

Foz do Iguaçu, 20 de novembro de 2018.

*Dedico este trabalho ao meu pai José (in memoriam) e meu avô Aurélio (in memoriam),
grande parte do sou hoje eu devo a vocês.
E aos meus familiares e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Neste espaço reservado aos agradecimentos venho expressar minha gratidão a todos que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

A toda minha família por todo amor, apoio e incentivo durante toda minha vida, especialmente minha irmã Ana Luiza e ao Luís, minha mãe Jane, meus tios, e minhas irmãzinhas de coração Amanda e Mari, muito obrigada por sempre acreditarem em mim, pois sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus amigos que fiz durante o curso, Melanie, Giovane, Jonathan e Valentin, pelos sábios conselhos e por dividir bons e maus momentos durante a graduação, espero levá-los comigo para sempre.

Aos meus orientadores, professores Luis Evelio e Ricardo, pela paciência na orientação e ajuda ao desenvolver esse trabalho.

A Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu pela concessão de dados para o desenvolvimento do trabalho.

GARCIA, M. F. **Análise teórica de tecnologias de recuperação energética do gás de aterro em Foz do Iguaçu** .2018. 124 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018.

RESUMO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos abrange preocupações atuais da sociedade contemporânea nas quais se destacam os aspectos ambientais, econômicos e energéticos. O crescimento da população e seu consumo inconsequente à nível global vêm afetando de forma negativa e irreversível o meio ambiente e ameaçando o equilíbrio da biosfera e a própria existência humana, esta situação exige resposta em âmbito governamental e civil. No Brasil a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos e suas orientações para destinação final ambientalmente adequada abriu oportunidade para a recuperação energética por meio de processos termoquímicos, rotas que se tem demonstrado tecnicamente viáveis. Este trabalho apresenta um estudo teórico feito sobre a realidade em Foz de Iguaçu-PR, que destina todo o montante de resíduos sólidos gerado ao aterro municipal, segundo dados apresentados no Plano Municipal de Saneamento Básico do município estima-se que nos 10 primeiros anos de operação do aterro, foram dispostos em média 65 mil toneladas anuais de resíduos, com participação de mais de 60% de matéria orgânica. A partir destas e outras informações atualizadas realizou-se uma simulação da produção de gás de aterro das duas células encerradas, utilizando como base teórica o modelo de decaimento de primeira ordem do IPCC 2006. Com a vazão de gás de aterro prevista, para um horizonte de 30 anos para cada célula, simulou-se dois cenários de conversão de energia térmica em eletricidade optando por uma microturbina à gás operando via ciclo Brayton regenerativo e um motor gerador via ciclo Otto. A simulação realizada abrangeu a verificação de 3 distintos casos de excessos de ar, com objetivo de determinar qual o mais vantajoso, o ponto de partida para tal determinação foi análise energética da planta, nos quais pode-se visualizar os fluxos de energia em cada um dos casos. Os resultados obtidos apontam uma faixa de vazão de biogás recuperado entre 5,97 a 195,07 Nm^3/h , e para a simulação de conversão em energia elétrica, para o caso do ciclo Brayton regenerativo estima-se que seria possível a implantação de um planta termoelétrica com potência instalada de 85,53 kVa, que produziria diariamente 596,12 kWh/dia sendo capaz de atender a demanda de consumo elétrico de 113 residências, para o caso do ciclo Otto, que apresentou melhores resultados, estima-se que a quantidade de gás disponível seria capaz de alimentar uma planta de potencia instalada de 200 kVa, gerando por dia 1393,2 kWh/ dia e suprindo a necessidade energética de aproximadamente 266 residências.

Palavras-chaves:Recuperação energética; Biogás de aterro; Resíduos sólidos.

GARCIA, M. F. **Thermal evaluation of energy recovery proposals for the landfill of Foz do Iguaçu.** 2018. 124 pages. Bachelor Thesis -- Federal University for Latin American Integration, Foz do Iguaçu, 2018.

ABSTRACT

The management of urban solid waste covers current concerns of contemporary society in which environmental, economic and energy aspects stand out. Population growth and inconsistent global consumption have negatively and irreversibly affected the environment and threatened the balance of the biosphere and human existence itself. This situation requires a response at the governmental and civil levels. In Brazil, the creation of the National Solid Waste Policy and its guidelines for environmentally adequate final destination opened the opportunity for energy recovery through thermochemical processes, routes that have proven to be technically feasible. This work presents a theoretical study about the reality in Foz de Iguaçu-PR, which allocates all the amount of solid waste generated to the municipal landfill, according to data presented in the municipality's Municipal Basic Sanitation Plan, it is estimated that in the first 10 years of operation of the landfill, an average of 65 thousand tons of waste were disposed of, with a share of more than 60 % of organic matter. From these and other updated information a simulation of the landfill gas production of the two enclosed cells was carried out, using as theoretical basis the first-order decay model of the IPCC 2006. With the expected landfill gas flow, for a horizon of 30 years for each cell, it was simulated two scenarios of converting thermal energy into electricity by opting for a gas microturbine operating via the regenerative Brayton cycle and a motor generator via the Otto cycle. The simulation carried out included the verification of 3 different cases of excess air, in order to determine which was the most advantageous, the starting point for such determination was the energy analysis of the plant, in which one can visualize the energy flows in each one of cases. The results show a biogas flow rate recovered between 5.97 and 195.07 Nm^3/h , and for the conversion simulation in electric energy, in the case of the regenerative Brayton cycle it is estimated that it would be possible the installation of a thermoelectric plant with an installed power of 85.53 kVA, which would produce 596.12 kWh/day daily, being able to meet the electric consumption demand of 113 residences, in the case of the Otto cycle, which presented better results, it is estimated that the amount of gas available would be capable of supplying an installed power plant of 200 kVA, generating 1393.2 kWh/day per day and supplying the energy needs of approximately 266 homes.

Keywords: Energy recovery; Landfill gas; Solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotas tecnológicas de recuperação energética	23
Figura 2 – Esquema simplificado de um aterro sanitário	25
Figura 3 – Fases de degradação dos resíduos em função do tempo	26
Figura 4 – Tomada de decisão para a escolha da metodologia de cálculo	30
Figura 5 – Diagrama P-v e T-s para ciclo Otto ideal	36
Figura 6 – Diagrama do ciclo Brayton aberto de uma turbina a gás	38
Figura 7 – Diagrama do ciclo Brayton fechado de uma turbina a gás	38
Figura 8 – Ciclo Rankine Simples	39
Figura 9 – Dinâmica do modelo IPCC 2006.	44
Figura 10 – Representação gráfica do ciclo Brayton com regeneração aberto	50
Figura 11 – Volumes de controle analisados	51
Figura 12 – Vista aérea do aterro sanitário	63
Figura 13 – Histórico de armazenamento dos RSU.	64
Figura 14 – Vazão Volumétrica Anual de gás de aterro Recuperado na Célula 1	65
Figura 15 – Vazão Volumétrica Anual de gás de aterro Recuperado na Célula 2	65
Figura 16 – Vazão Volumétrica Anual de gás de aterro Recuperado nas Células 1 e 2	66
Figura 17 – Variação de Φ x Eficiência Térmica	67
Figura 18 – Variação de Φ x Temperatura adiabática de chama	67
Figura 19 – Variação de Φ x Eficiência Térmica	69
Figura 20 – Variação de Φ x Temperatura adiabática de chama	69
Figura 21 – Diagrama de Sankey para os fluxos energéticos	71
Figura 22 – Gráfico comparativo entre os resultados obtidos para o parâmetro 1 para os três casos de Φ para o ciclo Brayton	75
Figura 23 – Comparação entre os resultados obtidos para a eficiência térmica do ciclo Brayton regenerativo	76
Figura 24 – Comparação entre os resultados obtidos para o consumo específico de combustível	77
Figura 25 – Diagrama de Sankey para os fluxos energéticos no ciclo Otto	78
Figura 26 – Gráfico comparativo entre os resultados obtidos para o parâmetro 1 para os três casos de Φ para o ciclo Otto	82
Figura 27 – Comparação entre os resultados obtidos para a eficiência térmica do ciclo Otto	83
Figura 28 – Comparação entre os resultados obtidos para o consumo de combustível do ciclo Otto	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Gases típicos e suas concentrações identificados no gás de aterro	25
Tabela 2 – Características do GMG - Caterpillar 3516 SITA	33
Tabela 3 – Características de uma turbina à gás	34
Tabela 4 – Características de uma turbina à vapor	34
Tabela 5 – Composição Gravimétrica do aterro sanitário de Foz do Iguaçu	45
Tabela 6 – Composição percentual do RSU de Foz do Iguaçu seguindo os padrões do IPCC 2006	46
Tabela 7 – Comparação dos parâmetros	49
Tabela 8 – Concentrações volumétricas consideradas para gás de aterro utilizado .	55
Tabela 9 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 1	68
Tabela 10 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 2	68
Tabela 11 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 3	68
Tabela 12 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 1	70
Tabela 13 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 2	70
Tabela 14 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 3	70
Tabela 15 – Resultados obtidos para o balanço energético por ano em kW - Caso 1: $\Phi = 0,68$	72
Tabela 16 – Resultados obtidos para o balanço energético por ano em kW - Caso 2: $\Phi = 0,58$	73
Tabela 17 – Resultados obtidos para o balanço energético por ano em kW - Caso 3: $\Phi = 0,48$	74
Tabela 18 – Resultados obtidos para o balanço energético no ciclo Otto por ano em kW - Caso 1: $\Phi = 0,95$	79
Tabela 19 – Resultados obtidos para o balanço energético no ciclo Otto por ano em kW - Caso 2: $\Phi = 0,85$	80
Tabela 20 – Resultados obtidos para o balanço energético no ciclo Otto por ano em kW - Caso 3: $\Phi = 0,75$	81
Tabela 21 – Tabela comparativa entre os dois ciclos dimensionados	84
Tabela 22 – Valores de MCF recomendados pelo IPCC 2006	91
Tabela 23 – Valores de k para o clima temperado úmido	91
Tabela 24 – Valores de DOC_i por resíduo	92
Tabela 25 – Estimativa de Geração de Biogás por ano	93
Tabela 26 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 1: $\Phi = 0,68$	113
Tabela 27 – Vazões molares nos pontos de análise por ano (kmol/s) - Caso 1 : $\Phi = 0,68$	114
Tabela 28 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 2: $\Phi = 0,58$	116
Tabela 29 – Vazões molares nos pontos de análise por ano - Caso 2: $\Phi = 0,58$. . .	117

Tabela 30 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 3: $\Phi = 0,48$	119
Tabela 31 – Vazões molares nos pontos de análise por ano - Caso 3: $\Phi = 0,48$. . . 120
Tabela 32 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 1 : $\Phi = 0,95$	122
Tabela 33 – Vazões molares de biogás e ar por ano (kmol/s) - Caso 1: $\Phi = 0,95$. . 122
Tabela 34 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 2: $\Phi = 0,85$	123
Tabela 35 – Vazões molares de biogás e ar por ano (kmol/s) - Caso 2: $\Phi = 0,85$. . 123
Tabela 36 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 3; $\Phi = 0,75$	124
Tabela 37 – Vazões molares de biogás e ar por ano (kmol/s) - Caso 3: $\Phi = 0,75$. . 124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Abrelpe</i>	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
<i>c</i>	Velocidade (m/s)
<i>cp</i>	Capacidade calorífica a pressão constante (kJ/kmol.K)
<i>cv</i>	Capacidade calorífica a volume constante (kJ/kmol.K)
<i>CNTP</i>	Condições Normais de Temperatura e Pressão
<i>CH_{4gT}</i>	Massa de metano gerado em um ano T (Mg)
<i>DBO</i>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
<i>DQO</i>	Demanda Química de Oxigênio
<i>DOC_i</i>	Carbono Orgânico Degradável
<i>DOC_f</i>	Carbono Orgânico Degradável em condições anaeróbicas
<i>DDOC_m</i>	Carbono Orgânico Degradável Decomposto
<i>EES</i>	Engineering Equation Solver
<i>F_{CH₄}</i>	Fração de metano
<i>EPA</i>	Environmental Protection Agency
<i>FR_i</i>	Fração Mássica de Resíduo
<i>GEE</i>	Gases de Efeito Estufa
<i>GMG</i>	Grupo Motor Gerador
<i>g</i>	Aceleração da gravidade (m/s^2)
<i>h_i</i>	Entalpia no ponto i (kJ/kmol)
<i>hp</i>	Horse Power
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Painel on Climate Change
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

k	Taxa de geração de metano
\dot{L}_o	Potencial de geração de metano (m^3/kg)
LFG	Landfill Gas
LFG_a^T	Vazão Volumétrica Média de Biogás gerado no Ano T
LFG_a^{RT}	Vazão Volumétrica Média de Biogás recuperado no Ano T
\dot{m}_i	Vazão molar no ponto i (kmol/s)
MCF	Fator de Correção de Metano
MCI	Motor a Combustão Interna
MT	Microturbina
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Φ	Razão de equivalência
Pa	Pascal
P	Pressão (kPa)
pH	Potencial hidrogeniônico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
$PNRS$	Política Nacional de Resíduos Sólidos
\dot{Q}	Calor (kW)
\dot{Q}_{ch_4i}	Metano produzido no ano i (m^3/ano)
R	Constante universal dos gases (kJ/kmol.K)
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
s	Entropia (kJ/kmol.K)
T	Temperatura (K)
t	Tempo (anos)

TC	Trocador de calor
TG	Turbina à gás
$USEPA$	United States Environmental Protection Agency
$UTEB$	Unidade Termelétrica de Energia Bandeirantes
v	Volume específico (m^3/kg)
W	Massa de Resíduos Sólidos Urbanos (kg)
x_i	Fração molar do componente i
y_i	Fração mássica do componente i
z	Cota de altura (m)
ρ_i	Densidade de substância i (kg/m^3)
η_c	Eficiência do sistema de extração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Resíduos Sólidos	20
2.2	Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos	22
2.3	Recuperação energética de RSU	22
2.4	Gás de aterro	24
2.5	Modelos matemáticos para a estimativa de produção de gás de aterro	27
2.5.1	Modelo USEPA	28
2.5.2	Modelo do Banco Mundial	29
2.5.3	Modelo IPCC 2006	29
2.6	Potencial Térmico do Gás de Aterro	32
2.7	Tecnologias de Conversão de Energia Térmica em Energia Elétrica	33
2.7.1	Motogerador	34
2.7.1.1	<i>Motor de Combustão Interna</i>	35
2.7.2	Turbina a Gás	36
2.7.3	Turbina a Vapor	38
2.8	Balanco de Massa e Energia	40
2.8.1	Balanco de Massa	40
2.8.2	Balanco de Energia	40
3	METODOLOGIA	43
3.1	Primeira Etapa: Estimativa da Produção de Gás de Aterro	43
3.1.1	Geração de Gás de Aterro	43
3.2	Segunda Etapa: Avaliação do Potencial Térmico do Gás de Aterro	46
3.3	Terceira Etapa: Simulação de Sistemas de Conversão de Energia Térmica em Elétrica	47
3.4	Quarta Etapa: Balanco Energético	47
4	MODELO PARA ANÁLISE TERMODINÂMICA	49
4.1	Modelagem do Ciclo Brayton Regenerativo	52
4.1.1	Compressores: Volumes de controle 1 e 3	52

4.1.1.1	<i>Análise energética nos volumes de controle 1 e 3</i>	52
4.1.2	Trocador de Calor: Volume de Controle 2	53
4.1.2.1	<i>Análise energética do volume de controle 2</i>	54
4.1.3	Câmara de Combustão: Volume de Controle 4	54
4.1.3.1	<i>Estequiometria da combustão</i>	55
4.1.3.2	<i>Relação de equivalência</i>	56
4.1.3.3	<i>Temperatura de chama adiabática</i>	56
4.1.3.4	<i>Análise energética no volume de controle 4</i>	57
4.1.4	Microturbina : Volume de Controle 5	57
4.1.4.1	<i>Análise energética do volume de controle 5</i>	58
4.2	Modelagem do Ciclo Otto	58
4.2.1	Primeiro Tempo: Admissão	58
4.2.2	Segundo Tempo: Compressão	58
4.2.3	Terceiro Tempo: Combustão e expansão	59
4.2.4	Quarto Tempo: Descarga	60
4.2.5	Análise energética do ciclo	60
4.3	Parâmetros de Desempenho	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1	Caracterização do aterro sanitário de Foz do Iguaçu	63
5.2	Geração de Gás de Aterro	64
5.3	Avaliação do Potencial Térmico do Gás de Aterro	65
5.4	Análise da combustão	66
5.4.1	Análise dos resultados para o Ciclo Brayton Regenerativo	66
5.4.2	Análise dos resultados para o Ciclo Otto	68
5.5	Análise Termodinâmica	70
5.5.1	Análise Energética e de Desempenho para o ciclo Brayton	71
5.5.2	Análise Energética e de Desempenho para o ciclo Otto	78
5.6	Comparação entre os ciclos dimensionados	84
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A – TABELA COM OS PARÂMETROS RE- COMENDADOS PELO IPCC 2006	91
	APÊNDICE B – ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIO- GÁS POR ANO	93

APÊNDICE C – ROTINA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA NO EES - CICLO BRAYTON REGENERATIVO	95
APÊNDICE D – ROTINA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA NO EES - CICLO OTTO	104
APÊNDICE E – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS PARA O CICLO BRAYTON REGENERATIVO CALCULADAS NOS PONTOS DE ANÁLISE POR ANO	113
APÊNDICE F – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS PARA O CICLO OTTO CALCULADAS NOS PONTOS DE ANÁLISE POR ANO	122

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento econômico do Brasil aliado à expansão populacional urbana verificada nas últimas décadas apresenta um quadro preocupante quanto ao aumento da demanda energética (EPE, 2017) (IBGE, 2018). Esta relação entre desenvolvimento econômico, urbanização desordenada e aumento do consumo energético vem afetando significativamente o meio ambiente desde século XVIII, início da Revolução Industrial, a qual originou uma maior variedade e quantidade de resíduos devido à modificação dos hábitos de consumo do homem. Tais preocupações possibilitaram o fomento da discussão em âmbito governamental, industrial e na academia para a construção de políticas, e o desenvolvimento de tecnologias e metodologias que aplicadas à gestão dos resíduos sólidos consigam, por um lado, mitigar o impacto ambiental e os riscos à saúde pública e, por outro, explorar as possibilidades de aproveitamento econômico e energético dos resíduos.

No ano de 2010 sancionou-se a Lei ° 12.305/10, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sendo os seus principais objetivos a redução na geração de resíduos e a eliminação de lixões a céu aberto com a implementação de aterros sanitários, para tal feito a PNRS estipulou um prazo de 4 anos para que todas as cidades brasileiras adequassem suas gestões dos resíduos de acordo com legislação vigente, aquelas que não cumprissem tal legislação seriam punidas com multas, corte de verbas do governo federal e também poderiam responder judicialmente por crime ambiental (BRASIL, 2010). De acordo com dados divulgados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), no ano de 2016, em torno de 60% das cidades brasileiras ainda não destinaram os resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados a aterros sanitários, ou seja, dos 5.570 municípios somente 2.239 estavam adequadas às regras do PNRS (ABRELPE, 2016).

No ano de 2016 estima-se que foram gerados no Brasil aproximadamente 78,3 milhões de toneladas de RSU, o equivalente à 214,5 mil toneladas por dia, que quando comparado com o montante gerado no ano de 2015 constata-se uma redução de 2% (ABRELPE, 2016). Avalia-se que 91% deste total, 64,9 milhões de toneladas, foram coletadas diariamente pelos sistemas de limpeza municipais, dos resíduos coletados cerca de 58,4 % são destinados a aterros sanitários, 24,2% a aterros controlados e 17,4% em lixões, ou seja, uma parcela de 29,7 milhões de toneladas não recebem o tratamento adequado e previsto por legislação e tornam-se uma ameaça eminente ao meio ambiente e à saúde humana (ABRELPE, 2016).

Uma das técnicas indicadas para a disposição final ambientalmente adequada de resíduos, pelo terceiro artigo da PNRS, é o uso de aterros sanitários, nos quais é gerado

gás combustível devido à decomposição da fração orgânica em um processo anaeróbico. A característica combustível do gás de aterro é devida à alta concentração de metano que permite seu aproveitamento como fonte de energia, em geral é feita através de processos termoquímicos em máquinas térmicas, como por exemplo, caldeiras, turbinas e motores.

O atlas brasileiro de emissão de GEE informa que no território brasileiro, até a data de publicação do documento, existiam 46 projetos de gerenciamento de resíduos sólidos registrados, sendo que a metade são de recuperação energética de biogás de aterro, desses 23 projetos, 22 visavam a conversão da energia térmica do biogás em eletricidade e apenas 1 contemplava a purificação do gás e injeção na rede de gasoduto local (ABRELPE, 2013a). Dos 22 projetos mencionados acima, nenhum se situava na região sul, sendo 16 na região sudeste, 4 no nordeste e 1 na região norte. Porém, apenas 2 deles entraram em operação, o aterro dos Bandeirantes e o aterro sanitário de São João, ambos localizados no estado de São Paulo que, juntos, somam uma produção anual de 1,2 milhões de MWh.

O município de Foz do Iguaçu, localizado no oeste do Estado do Paraná, apresenta uma população estimada de 263.647 habitantes (IBGE, 2018). Com o objetivo de atender a PNRS, grande população e quantidade de turistas que o município recebe anualmente, o município possui um aterro sanitário de grande porte para destinação dos RSU, em operação desde 2001, ele já conta com 2 células já encerradas e uma terceira que iniciou suas atividades em julho de 2017, que recebe diariamente aproximadamente 224 toneladas de RSU/dia (PMFI, 2018).

Para um aterro de grande porte e já instalado, torna-se interessante avaliar a possibilidade de aproveitamento do biogás produzido no aterro, que hoje, é coletado e queimado em flares, sendo desprezado seu potencial energético. Além disso, o uso do gás para geração de eletricidade é também interessante do ponto de vista econômico, visto que a Resolução Normativa n 482/2012 estabelece as condições para o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora (NORMATIVA, 2012).

Desse modo, neste trabalho, propõe-se verificar a possibilidade de aproveitamento energético do biogás produzido no aterro sanitário de Foz do Iguaçu - PR, mediante estimativa da quantidade de metano aproveitável gerado, e identificar as possíveis alternativas para sua utilização.

O presente trabalho está dividido em 7 capítulos, o primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema resíduos sólidos no Brasil e projetos de aproveitamento energético em aterros, e partir deste contexto pretende-se propor uma solução para o aproveitamento energético do gás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu. No segundo capítulo são apresentados quais são os objetivos deste trabalho.

O terceiro capítulo pretende apresentar inicialmente uma breve revisão bibliográfica

sobre a temática de resíduos sólidos no Brasil, focado principalmente em aspectos normativos e legislativos de classificação e destinação dos resíduos. Além disso, neste capítulo são tratados temas inerentes ao biogás de aterro: mecanismo de produção de gases (fases da digestão anaeróbica), métodos para a estimativa de geração de gás de aterro, análise do potencial energético e apresentação das principais rotas de conversão energética. Nas últimas seções deste capítulo explana-se sobre as bases teóricas para a análise energética que será realizada no decorrer do trabalho.

O quarto capítulo tem objetivo de apresentar a metodologia seguida para a execução do trabalho, a qual foi dividida em 4 etapas. A primeira compreendeu na avaliação das condições do aterro sanitário de Foz do Iguaçu e levantamento do potencial energético; os próximos passos foram a avaliação do potencial térmico do gás, simulação de dois sistemas de conversão energética e finalmente aplicação de métodos de balanço energético com o objetivo de estudar a efetividade dos sistemas dimensionados.

A quinta parte do presente trabalho expõe o modelo termodinâmico escolhido para dimensionamento e aplicação da métodos apresentados nas últimas seções do capítulo 3. No sexto capítulo, apresentam-se os resultados gerados a partir do desenvolvimento da quarta etapa da metodologia e no sétimo e último capítulo são apresentadas as conclusões sobre o desenvolvimento e resultados do trabalho.

1.1 Objetivos

Considerando o cenário atual de manejo dos RSU do município de Foz do Iguaçu, o objetivo central deste trabalho foi avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário municipal e identificar entre as tecnologias de recuperação energética a qual possui mais benefícios do ponto de vista energético. Para atender este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser atingidos:

- Levantar informações a respeito da situação do tratamento dos RSU no município de Foz do Iguaçu;
- Mensurar o potencial de geração de biogás no aterro, por meio do método IPCC 2006;
- Mensurar o potencial térmico do gás, utilizando metodologia analítica;
- Pesquisar e avaliar a tecnologias de conversão da energia térmica em elétrica, que são empregadas em aterros sanitários. E posteriormente dimensionar aquelas que melhor se ajustam as condições do aterro. As tecnologias escolhidas foram: microturbina a gás e motogerador;

-
- Durante a simulação em ambiente EES, estudar diferentes cenários de queima do biogás variando a razão de equivalência de ar/combustível na câmara de combustão da microturbina e no motor de combustão interna do motogerador e, observar os efeitos causados na eficiência dos ciclos;
 - Realizar o balanço energético dos sistemas propostos, aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica, visando identificar a potência de eixo extraída dos ciclos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão teórica neste capítulo teve como objetivo descrever sucintamente o que são os resíduos sólidos, como são classificados e qual sua destinação final; apresentar tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU); especificar conceitos e definições do mecanismo de degradação dos RSU e formação do gás de aterro e, por fim, apresentar metodologias que podem ser empregadas para a estimativa de emissões de gás dos aterros sanitários e rotas de aproveitamento energético.

2.1 Resíduos Sólidos

O termo resíduos sólidos é definido e classificado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma regulamentadora NBR 10004:

"Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água"(ABNT, 2004).

A classificação dos resíduos sólidos, segundo a NBR 10004, os segrega em três classes distintas de acordo com os riscos potenciais gerados ao meio ambiente e à saúde pública. Para tal catalogação, são levados em consideração: a origem do resíduo, a identificação das características de seus constituintes seguindo as normas ABNT NBR 10006¹ e NBR 10007², e comparando estes componentes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e meio ambiente são conhecidos.

- **Classe I – Resíduos Perigosos**

Aqueles que apresentam algum risco ao meio ambiente ou à saúde humana e apresentam algumas destas características: periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;

- **Classe IIA – Não perigosos - Não Inertes**

Resíduos que não oferecem riscos ambientais ou ao ser humano e possuem algumas destas propriedades: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

- **Classe IIB – Não perigosos - Inertes**

Quaisquer resíduos que não ofereçam riscos quando amostrados de forma significativa seguindo as devidas normas da ABNT NBR 10006 e ABNT NBR 10007, e que também

¹ ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos

² ABNT NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos

não apresentem componentes solubilizados na água a concentrações superiores ao padrão de potabilidade.

Outra classificação de resíduos sólidos válida é a citada no Artº13 da Lei N°12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Segundo ela, a especificação pode ser realizada de duas formas: segundo a fonte geradora ou quanto à periculosidade (BRASIL, 2010). A classificação adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi através da origem do resíduo, uso da classe de RSU, a continuação explora-se a especificação orientada pela legislação:

- **Resíduos Sólidos Urbanos**

Corresponde aos resíduos domiciliares e de limpeza urbana;

- **Resíduos da Construção Civil**

Gerados nas construções, reformas, reparos e demolições, bem como na preparação de terrenos para obras. Nos resíduos gerados há presença de material orgânico, produtos químicos, tóxicos e de embalagens, em geral são classificados como de baixa periculosidade, porém o volume gerado é excessivo quando comparado à geração das outras classes;

- **Resíduos Industriais**

Gerados em processos produtivos e instalações industriais, normalmente grande parte destes resíduos são de alta periculosidade e portanto necessitam de tratamento especial devido ao seu alto potencial de impacto ambiental e à saúde.

- **Resíduos Sólidos do Transporte Rodoviário e Ferroviário**

Gerados pelos serviços de transportes, por exemplo: ferragens, resíduos de cozinha, material de escritório, lâmpadas, pilhas, etc, também podem conter resíduos sépticos que, por consequência, elevam o risco patogênico do resíduo.

- **Resíduos de Serviços de Saúde**

Efluente gerado em qualquer serviço de saúde, grande parte dos resíduos é classificado como de alta patogenicidade, e portanto requer a incineração dos mesmos.

- **Resíduos Sólidos de Mineração**

São gerados principalmente dois tipos de resíduos sólidos: estéreis e rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados e são gerados pelas atividades de extração e não possuem nenhum valor econômico. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas as substâncias minerais.

- **Resíduos Sólidos Agrossilvopastoris**

Resíduos de origem orgânica e inorgânica, como por exemplo: dejetos da criação de animais, embalagens de agrotóxicos, fertilizantes, etc.

2.2 Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

O gerenciamento de RSU constitui um conjunto de procedimentos de gestão, planejamento e implementação com o objetivo de dar soluções para todo e qualquer problema causado pelo impacto dos resíduos. Essas soluções podem ser de ordem metodológica ou tecnológica e precisam atender à legislação vigente no país (ABRELPE, 2013b).

Boas práticas de gerenciamento de RSU são resultados de interações entre o Estado e a sociedade, e envolvem medidas que visam minimizar a produção de resíduos e proporcionar coleta, armazenamento, tratamento, transporte e destino final adequados aos resíduos gerados (ABRELPE, 2016).

No Brasil, o gerenciamento de resíduos sólidos é definido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, especificamente os Art.3º e Art.9º da Lei ° 12.305/2010:

"Art.3º Inciso X – Gerenciamento de Resíduos Sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei"(BRASIL, 2010).

"Art. 9º Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental"(BRASIL, 2010).

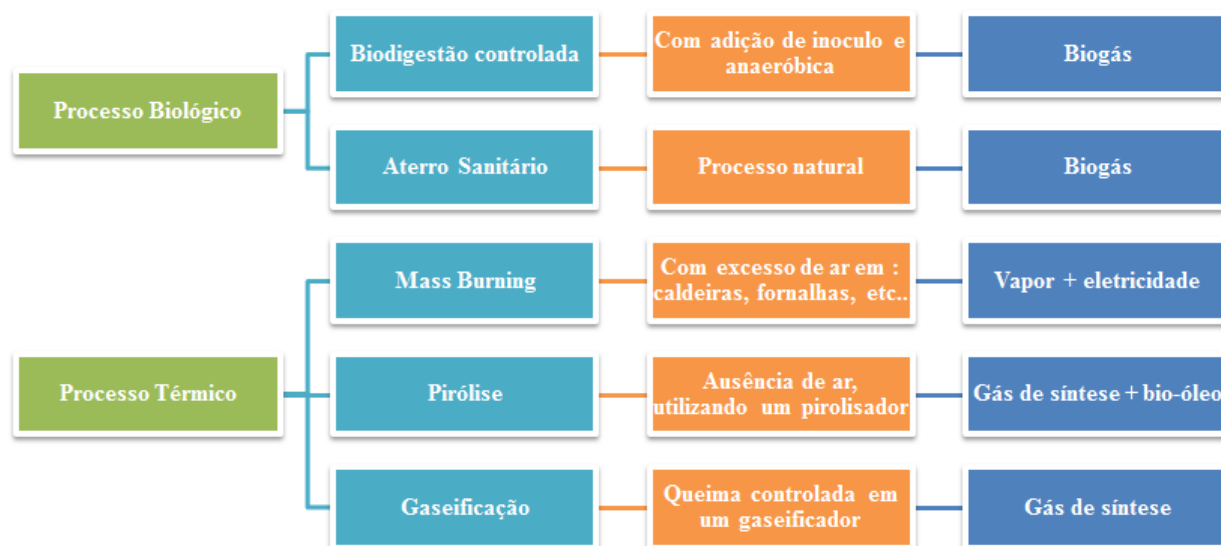
2.3 Recuperação energética de RSU

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, Abrelpe, define o termo "recuperação energética" como um conjunto de métodos e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos resíduos sólidos (ABRELPE, 2012).

As técnicas envolvidas nos processos de recuperação energética, também denominadas de tecnologias *waste to energy*, são divididas em duas rotas: térmica e biológica. A

Figura 1 apresenta um resumo com as principais características de cada uma destas vias tecnológicas.

Figura 1 – Rotas tecnológicas de recuperação energética



Fonte: Adaptado de (ABRELPE, 2012)

Os dois processos biológicos citados na Figura 1 são realizados via a digestão anaeróbica, ou seja a decomposição da fração orgânica presente no RSU na ausência de oxigênio sendo o produto final biogás, a diferença entre os dois métodos é que o primeiro ocorre em biodigestores e pode-se controlar os parâmetros que favorecem a produção de gás, já na segunda rota o processo ocorre de forma "natural". Na próxima seção será abordado de forma mais específica o processo de formação de biogás.

A tecnologia de *Mass Burning* é mais difundida mundialmente e caracteriza-se pela queima direta e controlada do resíduo em caldeiras e fornalhas, com objetivo de gerar vapor ou eletricidade (ABRELPE, 2012). Além dos produtos já mencionados, outra vantagem do uso desta tecnologia é a diminuição do volume de rejeitos depositados nos aterros, já que apenas as cinzas seriam depositadas.

O processo da pirólise é classificado como térmico e pode ser definido como a decomposição da matéria na ausência de oxigênio ou em quantidades limitadas. O tipo de pirólise empregada na recuperação energética de RSU é a rápida, e ocorre em ambientes com temperaturas acima de 500°C e tem como objetivo principalmente a produção de bio-óleo³ (SÁNCHEZ; CAMPO, 2003). O bio-óleo é utilizado como matéria prima para a

³ um composto de alcatrão solúvel e insolúvel e ácidos pirolenhoso (ácido acético, metanol e acetona).

produção de substâncias químicas, que comumente são fabricados a partir de derivados de petróleo (LEME; FERNANDES; LOPES, 2017).

A gaseificação é definida como a conversão da matéria prima em um gás de síntese ⁴, através da oxidação parcial da matéria em reatores com elevadas temperaturas, os principais tipos de reatores utilizados são de leito fixo ou leito fluidizado. As aplicações práticas deste gás variam desde a queima direta para geração de energia até o uso como matéria prima no processo de síntese de amônia e produção de H_2 (SÁNCHEZ; CAMPO, 2003).

2.4 Gás de aterro

Segundo a Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1992), um aterro sanitário é uma técnica de disposição de RSU que baseia-se em conceitos da engenharia para armazenar o maior volume de resíduos na menor área possível, preocupando-se em minimizar impactos ambientais e evitar danos à saúde pública. Ao final de cada jornada de trabalho, ou quando houver a necessidade, os resíduos devem ser cobertos por uma camada de terra e compactados.

Um aterro sanitário deve obrigatoriamente conter as seguintes instalações de apoio: sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de coleta e tratamento de lixiviado ⁵ e de drenagem de gases formados a partir da decomposição da matéria orgânica presente no lixo e também a impermeabilização lateral e inferior (ABNT, 1992). Para exemplificar estes sistemas de apoio, apresenta-se na Figura 2 um esquema de um aterro sanitário.

Além disso, é válida a comparação desta técnica de tratamento a um reator biológico, pois é um sistema fechado com fluxo contínuo que contém basicamente duas entradas: resíduos sólidos e água, proveniente das chuvas, e as duas principais saídas: os gases que compõem o gás de aterro e chorume (BORBA, 2006).

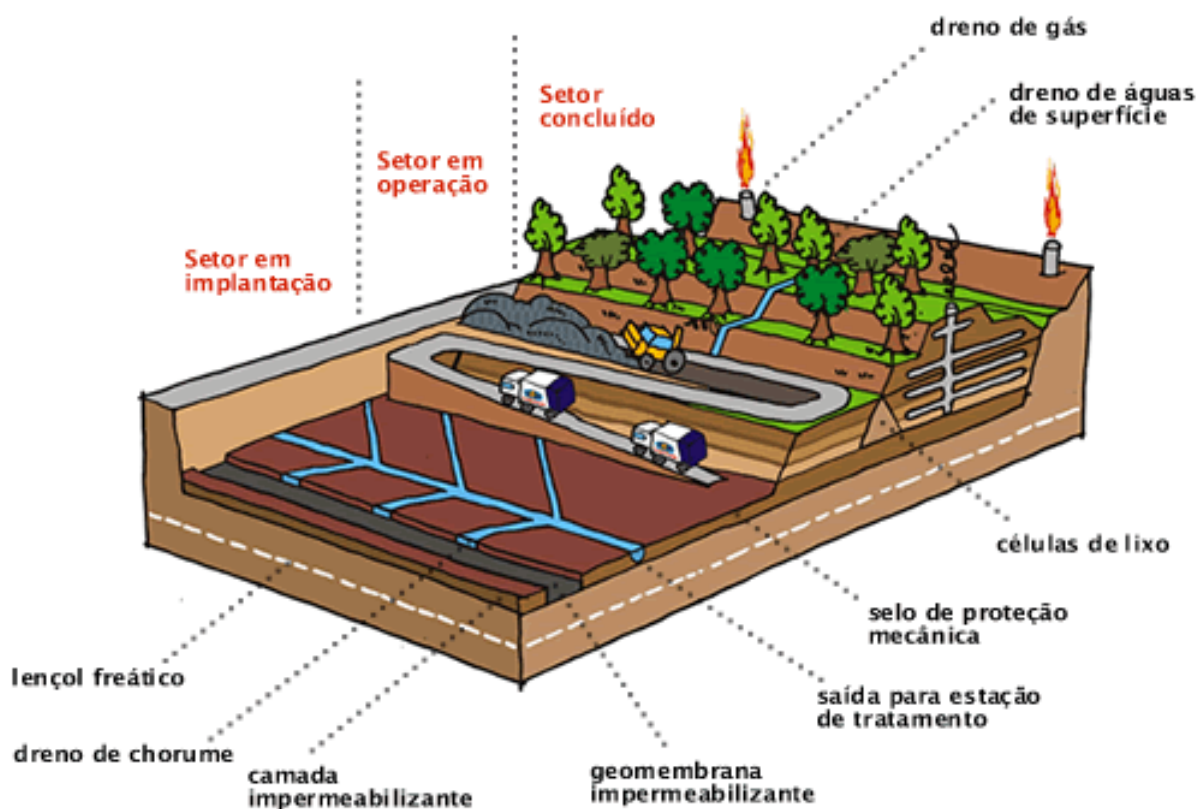
Define-se o gás de aterro como um produto da decomposição anaeróbica de matéria orgânica. Segundo a literatura sua composição é de principalmente metano e dióxido de carbono, e apresenta em menores quantidades monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, ácido sulfídrico, amônia, e há presença de materiais particulados e siloxanos⁶ (PERSSON; JONSSON; WELLINGER, 2006) (HOO; HASHIM; HO, 2018) (TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002).

⁴ composto principalmente de gás hidrogênio e monóxido de carbono.

⁵ lixiviado ou chorume são efluentes líquidos gerados como resultado da percolação de água de chuva ou da umidade natural através dos resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários, tais efluentes podem conter uma grande quantidade de matéria orgânica.

⁶ compostos orgânicos com silício, quando queimados formam óxido de silício uma espécie de cristais brancos arenosos que criam muitos problemas nos motores e nas turbinas a gás.

Figura 2 – Esquema simplificado de um aterro sanitário



Fonte: SEMARH-AL (2018).

Na Tabela 1 apresentam-se as distribuições percentuais típicas dos gases identificados na composição do gás de aterro, é importante salientar que estes valores são susceptíveis a variáveis como composição dos resíduos, metodologia de disposição, condições atmosféricas e infraestrutura do aterro (CENTER, 2017).

Tabela 1 – Gases típicos e suas concentrações identificados no gás de aterro

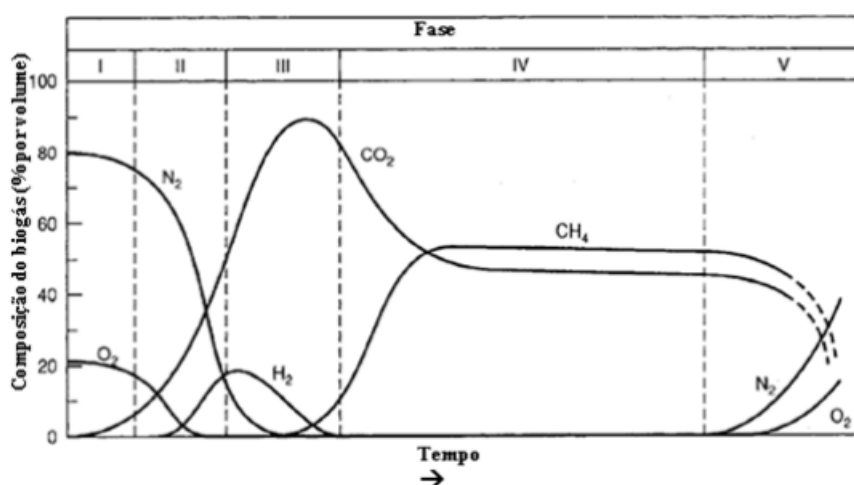
Componente	(CENTER, 2017)	Aterro da Muribeca/PE (MACIEL, 2003)	(PERSSON; JONSSON; WELLINGER, 2006)
CH_4	40-60%	35-65 %	35-65 %
CO_2	35-50 %	15-40 %	15-50 %
N_2	0-10 %	5-40 %	5-40 %
O_2	1-4 %	0-5 %	0-5 %
CO	<0,1%	não avaliado	0 %
H_2S	0-70 ppm	0-100 ppm	0-100 ppm

Fonte: Adaptado de (CENTER, 2017), (MACIEL, 2003) e (PERSSON; JONSSON; WELLINGER, 2006).

O início da produção de gases acontecerá após o intervalo de alguns meses da disposição do RSU, o IPCC (2006) denomina este período como "delay-time" e estipula uma faixa de duração entre 6 e 18 meses. Diversos autores entre eles Tchobanoglous e Kreith

(2002), Pohland (1982) e Renou et al. (2008) conduziram pesquisas na área e constataram que a degradação dos rejeitos ocorre em 5 fases sendo elas: ajuste inicial, transição, ácida, metanogênica e maturação. A duração de cada fase é influenciada principalmente pela composição dos resíduos, presença de oxigênio na fase inicial, a umidade, tamanho das partículas, temperatura, pH, idade dos resíduos, projeto do aterro e o tipo de operação. A Figura 3 apresenta estas 5 fases de produção de gases em função do tempo e em seguida foi realizada uma breve explicação sobre as mesmas.

Figura 3 – Fases de degradação dos resíduos em função do tempo



Fonte: Tchobanoglous e Kreith (2002).

Fase I – Ajuste Inicial

Maciel (2009) cita que o intervalo de tempo desta fase é de pequena duração, variando de algumas horas até uma semana devido ao fato que ela ocorre em condições aeróbias, e portanto, a duração deste período depende diretamente da quantidade de oxigênio presente nos espaços vazios e dissolvido nos resíduos.

Nesta etapa inicial, logo que o resíduo é disposto, inicia-se o consumo do oxigênio presente no interior da célula, resultando na produção de CO_2 , calor e água. Observa-se que não há mudanças no volume de gás do aterro, visto que o consumo de O_2 ocorre na mesma proporção da produção de CO_2 .

Fase II – Transição

Esta fase é caracterizada pela transição do regime aeróbico para anaeróbico, e o ambiente passa a ser redutor, no qual nitratos e sulfatos substituem o oxigênio como receptor de elétrons. Outra característica deste estágio é a diminuição dos níveis de O_2 e N_2 e aumento significativo da produção de CO_2 , e também inicia-se a produção de lixiviado.

Fase III – Ácida

É caracterizada pela formação de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de gás hidrogênio devido à intensificação da atividade bacteriana. Pohland (1982), Renou et al. (2008) e Farquhar e Rovers (1973), dividem esta fase em três processos:

1. **Hidrólise** - As bactérias hidrolíticas e fermentativas hidrolisam os polímeros de alta massa molecular (lipídios, carboidratos e proteínas) os transformando em monômeros (ácidos graxos, açúcares e aminoácidos);
2. **Acidogênese** – Também denominada fermentação ácida, é o processo em que os microrganismos convertem os produtos da hidrólise (monômeros) em compostos de baixa massa molecular, como os acetatos e ácidos graxos voláteis;
3. **Acetogênese** - Nesta fase os acetatos e ácidos graxos produzidos na fase anterior são convertidos em CO_2 , H_2 e acetato, que servirão de matéria prima para a próxima fase.

Fase IV – Metanogênica

É a etapa na qual ocorre a maior parte da formação do metano através do consumo do acetato pelos microrganismos da classe Arquea (Archaea), também observa-se a produção de outros ácidos, no entanto, a taxa de fermentação ácida é consideravelmente reduzida em comparação com a taxa de produção de metano. Renou et al. (2008) relata que 70% do CH_4 produzido é originário da transformação do ácido acético e o restante (30%) é resultado da transformação de CO_2 e H_2 .

Fase V: Maturação

Na fase de maturação acontece o decaimento da produção de gases, em decorrência de que a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Ainda podem ser encontrados nitrogênio e oxigênio no gás de aterro, geralmente isso acontece devido à maneira como ocorre a compactação dos resíduos e o tipo de matéria disposta.

A duração de cada fase varia conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, a disponibilidade de nutrientes, a umidade dos resíduos, a precipitação e o grau de compactação inicial. Renou et al. (2008) estimou que a fase I tem duração de aproximadamente uma semana, a fase II, de uma semana a seis meses, a fase III, de três meses a três anos, a fase IV, de 8 a 40 anos e a fase V pode variar de 1 a 80 anos.

2.5 Modelos matemáticos para a estimativa de produção de gás de aterro

Nesta seção serão apresentadas as principais metodologias que podem ser empregadas para se estimar a quantidade de metano emitido por um aterro sanitário. Os modelos

mais aceitos e que são detalhados a seguir foram os desenvolvidos por : 1) United States Environmental Protection Agency - USEPA, 2) Banco Mundial e do 3) Intergovernmental Painel on Climate Change - IPCC, sendo esta última a técnica aplicada no presente trabalho. As três metodologias utilizam equações cinéticas de primeira ordem e possuem os mesmos parâmetros de entrada:

1. Massa de resíduo depositado no aterro anualmente;
2. Tempo de operação do aterro e/ou após o encerramento;
3. Taxa de geração de metano (k) (ano^{-1}).

A taxa de geração de metano (k) é o parâmetro que indica a velocidade de degradação de uma determinada massa de RSU sob condições anaeróbias. Esta taxa é considerada constante para todo o período de análise e depende do valor do tempo de meia-vida do resíduo, ou seja, o tempo que a matéria orgânica degradável contida nos RSU irá decair pela metade de sua massa inicial (IPCC, 2006).

É importante destacar que o tempo de meia-vida é mensurado a partir de observações empíricas da área de estudo e depende principalmente da taxa de precipitação do localidade do aterro, tipo do resíduo, pH, temperatura e da disponibilidade de nutrientes para o processo anaeróbico (BORBA, 2006).

2.5.1 Modelo USEPA

O modelo denominado *Landfill Gas Emission Model* - (LandGEM) desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* - USEPA, trata-se de uma ferramenta automática para a estimativa de geração de gás de aterro. O software denominado LandGEM é baseado na equação de decaimento de primeira ordem empírica considerando que há uma fração constante de material degradável no aterro por unidade de tempo, conforme apresentado na Equação 1 (ALEXANDER; BURKLIN; SINGLETON, 2005).

$$Q_{(CH_4)_i} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_o \cdot \frac{W_i}{10} \cdot e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

Sendo:

$Q_{(CH_4)_i}$: metano produzido no ano i (m^3/ano);

j : incremento de tempo de 0,1 ano;

i : incremento de tempo de 1 ano;

t : idade dos resíduos dispostos no primeiro ano i (anos)

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

L_o : potencial da geração de metano (m^3/kg);

W : massa de resíduo despejada no ano i (kg).

O programa LandGEM faz inicialmente uma avaliação conservadora para o aterro, estabelecendo valores padrões para L_o e (k), porém para a obtenção de resultados mais precisos recomenda-se que a escolha desses valores seja realizada de acordo com as condições em que está submetido o local analisado (FERNANDES, 2009).

2.5.2 Modelo do Banco Mundial

Denominado como Modelo *Scholl Canyon* e apresentado no "Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe" (MUNDIAL, 2009), este modelo é recomendado pelo Banco Mundial devido a sua simplicidade e, portanto, é o mais utilizado em projetos de recuperação energética em aterros sanitários na América do Sul (ELK, 2007).

Sua modelagem matemática, assim como o software LandGEM, envolve a equação de decaimento de primeira ordem e também baseia-se na premissa de que há uma fração constante de material degradável no aterro sanitário por unidade de tempo. A vazão volumétrica anual de metano é mensurada pela Equação 2:

$$Q_{(CH_4)i} = k.L_o.W_i.e^{-k.t_i} \quad (2)$$

Sendo:

$Q_{(CH_4)i}$: metano produzido no ano i (m^3/ano);

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

L_o : potencial da geração de metano (m^3/kg);

W_i : massa de resíduo despejada no ano i (kg);

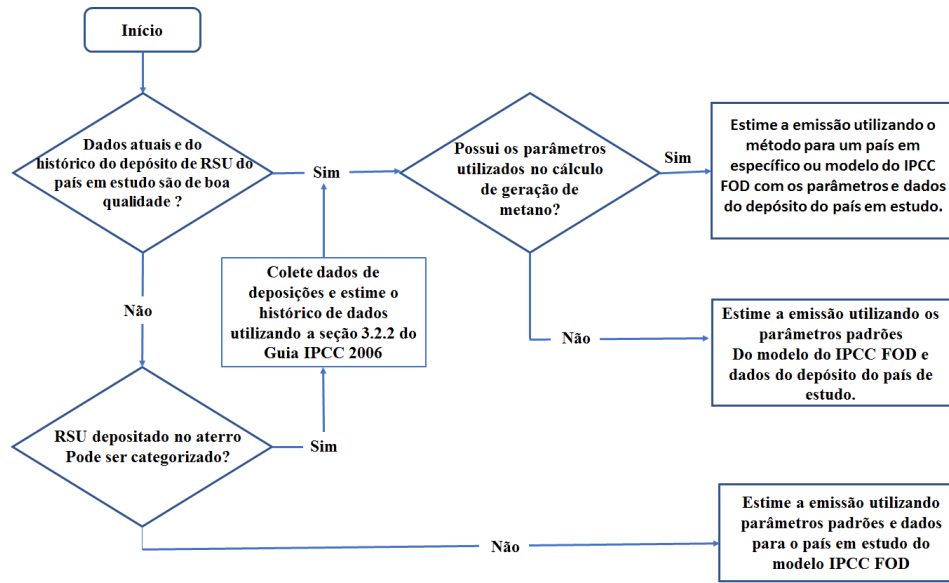
t_i : anos após o fechamento da célula de deposição de RSU.

2.5.3 Modelo IPCC 2006

O modelo cinético de decaimento de primeira ordem (*First Order Decay - FOD*) proposto e apresentado no volume 5 do guia do IPCC 2006, aborda os cálculos necessários para estimar a geração de metano provenientes de aterros. A Figura 4 apresenta um diagrama de tomadas de decisões sugeridas pelo IPCC antes do início dos cálculos.

A base do cálculo desta metodologia é a taxa de geração de metano (k) e a quantidade de Carbono Orgânico Degradável Decomposto ($DDOC_m$), esta parcela é calculada via Equação 3 e corresponde à fração de carbono orgânico na massa de RSU

Figura 4 – Tomada de decisão para a escolha da metodologia de cálculo



Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

que se degradará sob condições anaeróbicas.

$$DDOC_m = \sum_{i=1}^Z (W_i \cdot FR_i \cdot DOC_i \cdot DOC_f \cdot MCF) \quad (3)$$

Sendo:

Z = número de componentes do RSU;

W_i = massa de resíduo i (Gg);

FR_i = fração mássica do material i presente na massa total de RSU (adimensional);

DOC_i = fração de carbono orgânico degradável para o componente i (adimensional);

DOC_f = fração de carbono orgânico que se decompõe sob condições anaeróbicas (adimensional);

MCF = fator de correção de metano (adimensional).

Os parâmetros MCF , DOC_f e DOC_i são valores tabelados e obtidos de acordo com as características do aterro (IPCC, 2006). Vale destacar que a utilização deste fator de correção de metano é necessária visto que há uma fração de resíduos que irá se decompor sob condições aeróbicas nos aterros.

O potencial mássico de metano (CH_{4gT}) gerado é calculado de acordo com a Equação 4 e é usado na Equação 5, seu cálculo utiliza como base a quantidade de carbono consumido pela reação de decomposição anaeróbia e da quantidade de Carbono Orgânico Degradável Decomposto presente na massa de RSU durante o ano (T) de análise,

($DDOCm_{decT}$), que é estimado através da taxa de consumo de $DDOCm$.

$$CH_{4gT} = F_{CH_4} \cdot MW_{ratio} \cdot \sum_{i=1}^Z (DDOCm_{decT})_i \quad (4)$$

Sendo,

CH_{4gT} = massa de metano gerada no ano T (kg);

Z = o número de componentes do RSU;

F_{CH_4} = fração volumétrica de metano no gás de aterro produzido (adimensional);

MW_{ratio} = razão entre a Massa Molar de metano e de carbono (adimensional);

$DDOCm_{decT}$ = a quantidade de carbono degradável que é decomposto no ano T de estudo (kg).

A estimativa da produção do gás de aterro em um determinado ano T (LFG_{aT}) é dada na forma de uma vazão volumétrica média anual em m^3/h e mensurada através da Equação 5, utilizando o valor de CH_{4gT} , calculado na Equação 4.

$$LFG_{aT} = \left(\frac{CH_{4gT}}{\Delta h_{year}} \right) \cdot \left[\frac{1}{\rho_{CH_4}} + \frac{MW_{CO_2}}{MW_{CH_4}} \cdot \frac{1}{\rho_{CO_2}} \cdot \left(\frac{1 - F_{CH_4}}{F_{CH_4}} \right) \right] \quad (5)$$

Sendo:

Δh_{year} = o total de horas em 1 ano (8760h);

MW_{CO_2} a massa molar de CO_2 (g/mol);

MW_{CH_4} a massa molar de CH_4 (g/mol);

ρ_{CO_2} = massa específica do gás carbônico nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), sendo igual à $0,72kg/m^3$;

ρ_{CH_4} = massa específica do metano nas CNTP, sendo igual à $1,25kg/m^3$.

Para efeitos práticos, em projetos de recuperação energética determina-se a vazão volumétrica de gás de aterro que pode ser recuperada por meio do sistema de extração. No entanto, o coeficiente obtido através da Equação 5 refere-se a vazão média de gás gerado pelo aterro no período de um ano, o qual tem perdas significativas principalmente causadas por vazamentos durante a coleta, desta forma torna-se necessário considerar uma eficiência de extração que permita obter a vazão volumétrica utilizável (LFG) como mostrado na Equação 6, onde η_c é a eficiência do sistema de extração de gás de aterro (adimensional).

$$LFG = \eta_c \cdot LFG_{aT} \quad (6)$$

De acordo com IPCC (2006) diversos fatores influenciam este fator de eficiência, como por exemplo a camada de cobertura, percentagem do volume do aterro sanitário no

qual o sistema de extração atua, existência da barreira de impermeabilização, condições de operação (encerrado ou ainda em atividade), etc. Geralmente altos valores de η_c estão relacionado a aterros encerrados, fluxos de gás de aterro reduzidos, sistemas de extração bem projetados e operados, com coberturas mais grossas e impermeáveis. Já valores baixos de eficiência geralmente são associados a aterros que ainda estão em atividade e que apresentam cobertura permeável ou pouco impermeável.

2.6 Potencial Térmico do Gás de Aterro

Conhecendo o potencial da vazão de gás a ser produzido pelo aterro, para a elaboração de projetos de aproveitamento energético é de extrema importância determinar o Poder Calorífico Inferior (PCI) ou Poder Calorífico Superior (PCS) do gás, para isto existem meios experimentais e teóricos, sendo os últimos compostos por métodos empíricos aproximados.

Os métodos experimentais se baseiam em técnicas calorimétricas, no qual PCI ou PCS são determinados por meio de um equipamento que realiza a combustão de uma amostra de gás e monitora e avalia as trocas de calor através da variação de temperatura. De acordo com a literatura existem 3 grupos de calorímetros diferentes: bombas calorimétricas, calorímetros de fluxo e calorímetros com oxidação catalítica (CAMPANI; SCHNEIDER; XAVIER, 2009).

No presente trabalho optou-se pelo uso de um método teórico, devido a impossibilidade da realização de ensaios experimentais, a metodologia escolhida foi à teoria de Dulong que propõe que o PCI de uma mistura combustível é quase igual à soma dos calores de combustão dos elementos que a compõe multiplicados pela sua porcentagem na mistura analisada, a porcentagem utilizada pode ser volumétrica, mássica ou molar (GIVEN; WELDON; ZOELLER, 1986).

Conforme mencionado outrora o gás de aterro é composto basicamente por metano, gás carbônico e outros gases em menores quantidades. Para a quantificação do PCI através da fórmula adaptada de Dulong, Equação 7, considera-se que somente a fração molar de metano (y_{CH_4}) presente no gás irá contribuir para com o calor de combustão, novamente considerou-se que a fração de metano no gás de aterro é de 50%, valor recomendado pelo IPCC (2006).

$$PCI = 890.533,2 * y_{CH_4} (kJ/kmol) \quad (7)$$

2.7 Tecnologias de Conversão de Energia Térmica em Energia Elétrica

A conversão da energia presente no gás de aterro para energia elétrica pode ser entendida como um processo que transforma a energia química contida nas moléculas de gás em trabalho mecânico por meio de um processo de combustão. O trabalho gerado aciona um gerador que o converte em energia elétrica. Dentre as tecnologias de conversão de energia aplicadas ao gás de aterro sanitário, destacam-se : i) o grupo gerador, ii) turbina e microturbinas a gás e iii) turbinas a vapor (ABRELPE, 2016).

O grupo gerador é a tecnologia mais convencional, pois apresenta uma boa faixa de eficiência para plantas de pequena capacidade, com potência instalada de até 3 MW, e também é considerada uma tecnologia consolidada, ou seja, o risco associado ao investimento é menor quando comparada com as demais tecnologias. Além disso, se destaca pela facilidade de operação e manutenção o que reduz significativamente seu custo. A maior desvantagem está relacionada a altos níveis de emissões de CO e NO_x quando comparada as demais tecnologias (BOVE; LUNGHI, 2006). A Tabela 2 reporta a eficiência, consumo e emissões do modelo Caterpillar 3516 SITA, para apresentar uma noção básica do comportamento de um motogerador operando a gás de aterro.

Tabela 2 – Características do GMG - Caterpillar 3516 SITA

Eficiência Elétrica	33%
Consumo de combustível (kJ/kWh)	10 972
Emissão de NO_x (μ g/kJ)	56,6
Emissão de CO (μ g/kJ)	56,6

Fonte: (BOVE; LUNGHI, 2006)

Turbina a gás e as microturbinas são a segunda tecnologia mais empregada na conversão energética do gás de aterro, o uso de turbinas está associado a plantas maiores, com potência instalada superior a 1 MW , enquanto as microturbinas são empregadas em plantas com potência desde 25 a 500kW (PERSSON; JONSSON; WELLINGER, 2006). As principais vantagens da utilização deste tipo de equipamento são os baixos custos de manutenção e operação, alta resistência à corrosão e utilizando um ciclo combinado a eficiência da turbina pode chegar até a 40% (ABREU; FILHO; SOUZA, 2009). A Tabela 3 apresenta algumas características do comportamento de um turbina a gás operando com gás de aterro.

A terceira tecnologia mencionada são as turbinas a vapor. Um detalhe importante é que como a queima do combustível é realizada em caldeiras, quando se trata de recuperação energética em aterros sanitários, as turbinas à vapor podem ter dois combustíveis diferentes, o gás de aterro ou o RSU. A Tabela 4 expõe algumas características inerentes ao comportamento de um turbina a vapor usando como combustível gás de aterro.

Tabela 3 – Características de uma turbina à gás

Eficiência Elétrica	28%
Consumo de combustível (kJ/kWh)	12 872
Emissão de NO_x ($\mu g/kJ$)	15
Emissão de CO ($\mu g/kJ$)	19

Fonte: (BOVE; LUNGHI, 2006)

Tabela 4 – Características de uma turbina à vapor

Eficiência Elétrica	18%
Consumo de combustível (kJ/kWh)	19 202
Emissão de NO_x ($\mu g/kJ$)	16
Emissão de CO ($\mu g/kJ$)	18,9

Fonte: (BOVE; LUNGHI, 2006)

2.7.1 Motogerador

O grupo de motor gerador (GMG) é basicamente constituído por um gerador, acionado por motor de combustão interna (MCI) de ignição por centelha (ciclo Otto) ou por compressão (ciclo Diesel), sendo o combustível utilizado líquido (gasolina ou diesel, por exemplo) ou gasoso (gás natural ou gás de aterro, por exemplo). Os motogeradores são comumente classificados segundo sua aplicação e em dois grupos: motogeradores de emergência e motogeradores de economia, sendo o primeiro com objetivo de suprir faltas de energia e o segundo suprir a demanda elétrica em horários de pico (TILLMANN, 2013) (BRUNETTI, 2012).

Motogeradores alimentados por gás de aterro operam via ciclo Otto e podem alcançar potências da ordem de 1,6 MW, possuindo sistemas de arrefecimento a água, onde a água quente e gases de exaustão podem ser utilizados com o auxílio de trocadores de calor (cogeração) em processos que demandam um coeficiente de carga térmica. O uso da energia térmica aumenta a eficiência do sistema (SOUZA, 2016).

O uso desta tecnologia nos aterros sanitários com o objetivo de geração de eletricidade já é uma realidade (ABRELPE, 2013a). No Brasil, existem diversos empreendimentos em operação ou em fase de construção. A seguir são apresentados alguns exemplos (SOUZA, 2016) (BARRIONUEVO, 2018):

1. No município de Caieiras-SP, está instalada a Termoverde Caieiras, a maior termelétrica movida a biogás de aterro sanitário do Brasil, com potência instalada de 29,5 MW;
2. UTEB (Unidade Termelétrica de Energia Bandeirantes), localizada no aterro Bandeirantes em São Paulo, com uma potência instalada de 22 MW;

3. Aterro São João também localizado em São Paulo a termelétrica tem potência instalada de 24,6 MW (utilizando 16 motores geradores da Caterpillar);
4. O aterro de Santana de Parnaíba gerenciado pela Tecipar, com potência instalada de 4,3 MW;
5. O aterro em Ribeirão Preto, a empresa Ambiente possui uma planta instalada com potência de 1,5 MW no aterro municipal;
6. O aterro em Barueri, gerenciado pela empresa Energ-Biog possui uma planta com potência de de 30 kW;
7. Aterro Sanitário de Canhanduba, localizada no município de Itajaí - SC, geração inicial de 1,4 MW ;
8. No Rio Grande do Sul o aterro da cidade de Minas do Leão, com potencia instalada de 8,4 MW;
9. E no Paraná, somente o município de Cascavel, possui um aterro com um projeto instalado de aproveitamento de biogás, sendo um pequena planta composta por um motogerador com capacidade de produção de 172 kWh.

2.7.1.1 Motor de Combustão Interna

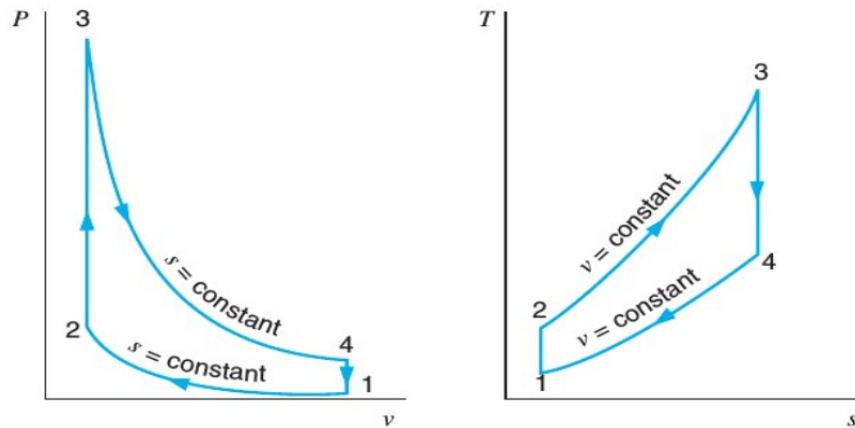
O princípio de funcionamento de um MCI é a conversão da energia contida no combustível em energia mecânica, o processo de transformação da energia ocorre por meio da queima do combustível na câmara de combustão. Tillmann (2013) classifica os motores por meio dos seguintes requisitos:

- utilização: estacionário, veicular, marítimos ou industriais;
- tipo de ignição: centelha ou por compressão;
- movimento do pistão: alternativo ou rotativo;
- por ciclo de trabalho: 2 ou 4 tempos;
- número de cilindros: mono ou policilíndricos;
- disposição dos cilindro: linha, em V, opostos ou radiais;
- e por propriedades de gases de admissão: ciclo Otto ou Diesel.

Conforme citado anteriormente, o grupo de motogeradores a gás de aterro utiliza tecnologia de motores operando via ciclo Otto, têm ciclo de trabalho de 4 tempos e aspiram a mistura ar/combustível para dentro do cilindro que é sucessivamente comprimida pelo

pistão, e posteriormente inflamada por uma centelha de ignição causando a combustão (BOLES; ÇENGEL, 2015). Os diagramas P-v e T-s do ciclo Otto são vistos na Figura 5:

Figura 5 – Diagrama P-v e T-s para ciclo Otto ideal



Fonte: Adaptado de BOLES e ÇENGEL (2015).

Relacionando o diagrama T-s com os 4 tempos do motor pode-se concluir:

- 1: primeiro tempo, ocorre a admissão da mistura ar/combustível com o pistão em movimento descendente;
- 1-2: segundo tempo, compressão isentrópica com o pistão em movimento ascendente. Pouco antes do final do percurso do pistão, ocorre a ignição;
- 2-3: segundo tempo, adição de calor a volume constante por meio da queima do combustível;
- 3-4: terceiro tempo, com o pistão em movimento descendente, ocorre a expansão isentrópica dos gases e transferência de energia ao pistão;
- 4-1: quarto tempo, eliminação de calor a volume constante.

2.7.2 Turbina a Gás

O primeiro registro de turbina à gás (TG) é a patente registrada por Jonh Barber, em 1791, porém o primeiro experimento bem sucedido utilizando este equipamento foi apenas em 1903 por Aegidius Elling. A turbina construída e testada por ele produziu um trabalho de eixo de 8,2 kW (11 hp), utilizando uma câmara de combustão a pressão constante (LORA; NASCIMENTO et al., 2004).

O conjunto da turbina a gás é uma máquina térmica que tem como seus principais componentes: compressor, câmara de combustão e turbina, a qual aproveita diretamente a energia liberada na combustão armazenada nos gases produzidos e que se expandem

sobre as palhetas móveis de um rotor. É importante destacar que as microturbinas à gás partilham dos mesmos princípios de funcionamento que as TG, porém em escalas reduzidas de potência e equipamentos (SARAVANAMUTTOO; ROGERS; COHEN, 1987) (BRUNETTI, 2012).

Diagramas com os ciclos de trabalho das TG's são apresentados nas Figuras 6 e 7, sendo a primeira referente ao ciclo Brayton aberto (ciclo real), e a segunda ao ciclo Brayton fechado (ciclo ideal).

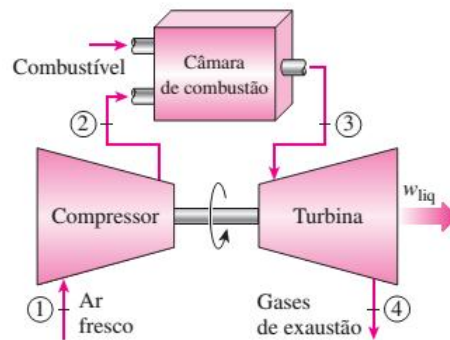
No ciclo aberto, o fluido de trabalho é admitido e comprimido no compressor através de um fluxo contínuo, o ar é encaminhado para a câmara de combustão onde se mescla com o combustível e ocorre a queima, o resultado deste processo são gases com alto valor energético que posteriormente são expandidos na turbina. Estes gases quentes entram nos bocais da turbina, que são passagens formadas pelas palhetas estacionárias, elas têm a função de redirecionar os gases ao encontro das palhetas móveis e a direção do fluxo muda à medida que os gases escoam nos canais das palhetas móveis. A mudança de direção gera uma força sobre as palhetas, que por sua vez move o eixo da turbina, produzindo potência ao compressor e potência mecânica útil (LORA; NASCIMENTO et al., 2004).

No ciclo fechado, o funcionamento é o mesmo que o ciclo aberto, a diferença fundamental é na forma de absorção de calor pelo fluido de trabalho. Neste caso a combustão ocorre fora do ciclo e seus gases de escape trocam calor com o fluido de trabalho em um trocador de calor de contato indireto. O resultado da troca de calor é o aumento das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho que é encaminhado para a turbina. Outra particularidade deste ciclo é a possibilidade de acoplamento de mais trocadores de calor com o objetivo de elevar o rendimento térmico (LORA; NASCIMENTO et al., 2004).

A conversão da energia térmica dos gases quentes (no caso de ciclo aberto) e fluido de trabalho (no caso do ciclo fechado) para trabalho mecânico, ocorre em duas fases:

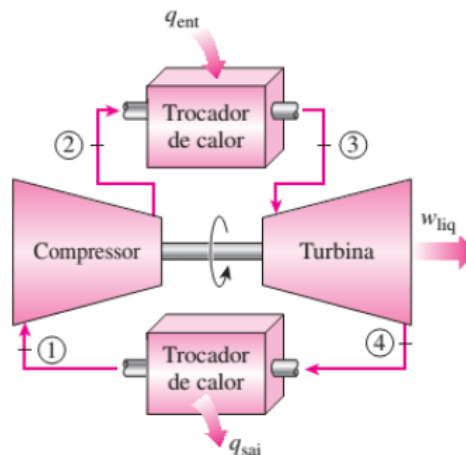
- Primeira fase ocorre no bocal, a diminuição da entalpia resulta no aumento da energia cinética;
- Segunda fase ocorre nas palhetas móveis, a energia cinética é convertida em trabalho mecânico.

Figura 6 – Diagrama do ciclo Brayton aberto de uma turbina a gás



Fonte: (BOLES; ÇENGEL, 2015)

Figura 7 – Diagrama do ciclo Brayton fechado de uma turbina a gás



Fonte: (BOLES; ÇENGEL, 2015).

2.7.3 Turbina a Vapor

A turbina a vapor é um motor térmico de combustão externa rotativo e é o tipo de turbina mais utilizada, devido a altos coeficientes de eficiência, confiabilidade, vida útil e potência unitária. O seu princípio básico de funcionamento é a conversão da energia térmica contida no vapor em trabalho mecânico (BOLES; ÇENGEL, 2015).

A classificação destas turbinas pode ser realizada de acordo com a sua finalidade (acionamento elétrico ou mecânico), com o princípio de funcionamento (ação ou reação) e de acordo o arranjo (um estágio ou múltiplos estágios). Lora, Nascimento et al. (2004) classificam a transformação de energia do vapor em trabalho em duas etapas:

- A primeira etapa consiste na transformação da energia contida no vapor em energia cinética, para isto o vapor é escoado através de um bocal que devido à sua pequena área de passagem aumenta a velocidade do escoamento de fluido, e consequentemente eleva sua energia cinética, porém, diminuindo o coeficiente de energia interna. Como consequência deste processo também ocorrem queda na pressão, queda na

temperatura e aumento no volume específico do vapor;

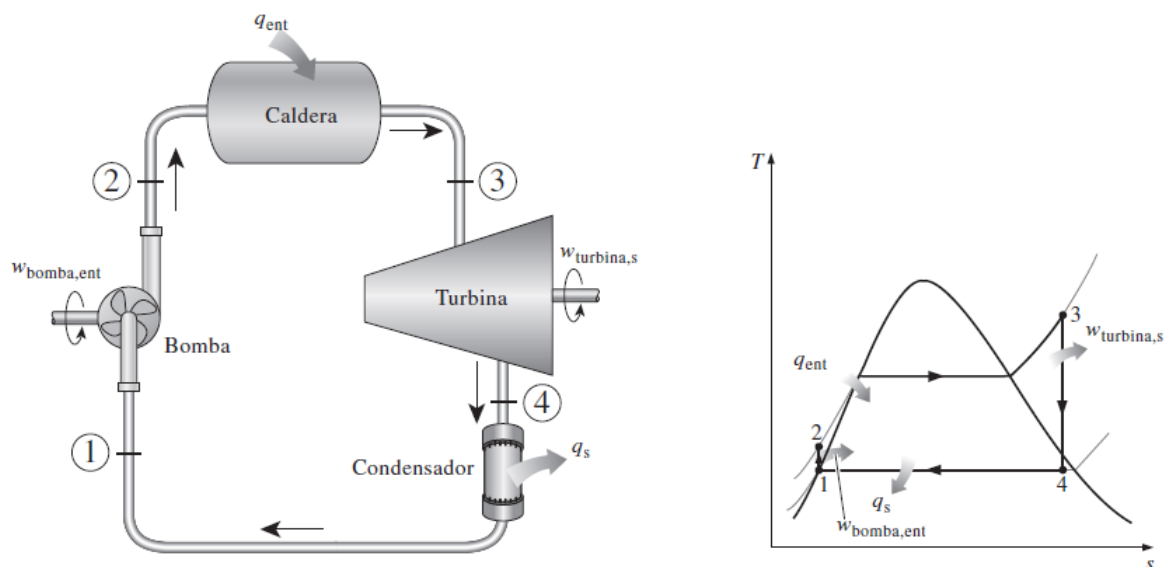
- Na próxima fase, transforma-se a energia cinética obtida no expansor em trabalho mecânico. Esta transformação de energia pode ser obtida de duas maneiras diferentes: segundo o princípio da Ação ou segundo o princípio da Reação.

Turbinas que operam segundo o princípio de ação ou de impulso, baseiam seu funcionamento somente na queda de pressão nos bocais e na queda de entalpia associada. Esta variação de entalpia é convertida em energia de escoamento, aumentando a velocidade do fluido que incidirá sob as palhetas e gerando trabalho mecânico, a pressão se mantém constante nesta última fase de conversão energética.

Nas turbinas de reação, a pressão não se mantém constante durante a passagem de vapor nas palhetas. Neste tipo de turbina quando o fluido escoar através dos bocais apenas ocorre uma expansão parcial do vapor transformando somente uma parte da energia térmica em cinética, logo a pressão assim como a velocidade do escoamento vão diminuindo gradativamente nas pás da turbina.

O ciclo termodinâmico para ciclos de potência a vapor é o Rankine, que pode ser adequado segundo as necessidades do sistema (regenerativo, reaquecimento, com extrações na turbina), mas em geral o ciclo Rankine ideal simples, apresentado na Figura 8, tem as seguintes componentes: bomba, caldeira, turbina e condensador.

Figura 8 – Ciclo Rankine Simples



Fonte: BOLES e ÇENGEL (2015).

Como pode-se observar na Figura 8, os processos envolvidos no funcionamento do ciclo são:

- 1-2: compressão isentrópica da água realizada pela bomba;
- 2-3: adição de calor isobárica na caldeira, a temperatura da água é elevada ao estado de vapor superaquecido;
- 3-4: expansão isentrópica na turbina, há saída de trabalho e diminuição na pressão e na temperatura, e portanto o vapor torna-se saturado;
- 4-1: retirada de calor do vapor a pressão constante através do condensador, até alcançar título igual à 0.

2.8 Balanço de Massa e Energia

Os balanços de massa e energia foram realizados via a aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica. O volume de controle considerado foi cada um dos equipamentos do sistema de conversão de energia.

2.8.1 Balanço de Massa

O balanço de massa é um dos cálculos mais utilizados na análise de processos na engenharia. Para sistemas abertos constitui-se basicamente em uma descrição de fluxos de massa na entrada e saída em um equipamento, seu princípio se baseia na lei de conservação de massa sendo definida como: *a transferência líquida de massa dentro de um volume de controle durante um intervalo de tempo δt é igual à troca líquida (aumento ou diminuição) de massa total dentro do volume de controle durante δt* (BOLES; ÇENGEL, 2015).

$$\sum \dot{m}_{VC_s} - \sum \dot{m}_{VC_e} = \Delta \dot{m}_{VC} \quad (8)$$

Considerando que o regime de operação de todos os equipamentos envolvidos no processo de conversão energética é permanente, a parcela referente à variação de massa no volume de controle ($\Delta \dot{m}_{VC}$) é constante e, portanto:

$$\sum \dot{m}_{VC_{ent}} = \sum \dot{m}_{VC_{sai}} \quad (9)$$

2.8.2 Balanço de Energia

A energia é um conceito fundamental em termodinâmica e um dos mais significativos aspectos da análise em engenharia. Ela pode existir nas seguintes formas macroscópicas: mecânica, cinética, térmica, potencial, elétrica, magnética, química e nuclear, e a soma delas constitui a energia total de um sistema (BOLES; ÇENGEL, 2015).

O balanço de energia por sua vez, é definido como a análise de fluxos energéticos através de um determinado volume de controle. A base teórica utilizada para tal estudo é a primeira lei da termodinâmica, que enuncia que *a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo, ela apenas pode mudar de forma.*

Nas análises que foram realizadas para os sistemas de conversão da energia contida no gás de aterro em eletricidade, o volume de controle utilizado foi cada equipamento que compõe o sistema, considerando-os como um sistema aberto, ou seja os fluxos energéticos que cruzam as fronteiras do volume de controle são: calor, trabalho e massa considerando regime permanente.

Aplicando a primeira lei a um volume de controle genérico, infere-se que:

$$\text{(Energia que o sistema recebe)} - \text{(Energia que o sistema entrega)} = \text{(Variação de Energia dentro do sistema)}$$

Aplicando este conceito ao volume de controle em uma máquina de fluido genérica, representando a entrada de energia no sistema pelo subíndice “e” e saída representada pelo subíndice “s”, e considerando todas as grandezas por unidade de massa, têm-se que:

$$\frac{dE_{sistema}}{dt} = \dot{E}_e - \dot{E}_s \quad [kW] \quad (10)$$

Considerando que as energias em trânsito são: calor, trabalho e fluxo mássico:

- fluxo de calor :

$$\Delta\dot{q} = \dot{q}_e - \dot{q}_s \quad [kW] \quad (11)$$

- fluxo de trabalho :

$$\Delta\dot{w} = \dot{w}_e - \dot{w}_s \quad [kW] \quad (12)$$

- fluxo de massa :

$$\Delta\dot{m}.\theta = \dot{m}_e.\theta - \dot{m}_s.\theta \quad [kW] \quad (13)$$

Sendo:

$$\theta = u + (P.v) + \frac{c^2}{2} + (g.z) \quad (14)$$

Substituindo as equações descritas acima na Equação 10, considerando que $m_e = m_s$, a variação de energia no sistema é dada por:

$$\frac{dE_{sistema}}{dt} = \Delta q + \Delta w + m.[u_s - u_e + P_s.v_s - P_e.v_e + \frac{1}{2}(c_s^2 - c_e^2) + g(z_s - z_e)] \quad (15)$$

Onde,

\dot{q} = é o fluxo de calor recebido ou fornecido pela máquina em kW;

\dot{w} = é o fluxo de trabalho específico realizado ou recebido em kW;

\dot{m} = é o fluxo mássico do fluido em kmol/s;

u = é a energia interna do fluido em J/kmol;

P = é a pressão estática do fluido em Pa;

v = é o volume específico do fluido em $m^3/kmol$;

c = é a velocidade do escoamento em m/s;

g = é a aceleração da gravidade em m/s^2 ;

z = é a cota de referência de um ponto de escoamento em m.

É importante destacar que para cada equipamento que compõe o sistema, aplicou-se a Equação 15 e realizou-se as devidas hipóteses simplificadoras relacionadas com os aspectos de funcionamento.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi dividida em 4 etapas. O primeiro objetivo definido foi a pesquisa e conhecimento da situação do tratamento de resíduos na cidade de Foz do Iguaçu, conhecer a rota tecnológica utilizada atualmente para o tratamento, assim como a estrutura administrativa empregada, por meio de acordos e/ou convênios de cooperação entre a Prefeitura Municipal e a Universidade.

3.1 Primeira Etapa: Estimativa da Produção de Gás de Aterro

A primeira etapa consistiu na pesquisa e aplicação de modelos matemáticos para a quantificação do potencial teórico de produção de gás no aterro sanitário. Após o reconhecimento inicial da área de estudo e revisão bibliográfica de modelos existentes, foi possível escolher o método que melhor se adaptou às condições e dados existentes do aterro. É importante frisar que esta etapa inicial foi realizada durante a execução do projeto de pesquisa desenvolvido na Universidade com o título de "Estudo do potencial de recuperação energética a partir de resíduos sólidos em Foz do Iguaçu", e foi uma das bases para a motivação do presente trabalho. Enfatiza-se que esta fase já está concluída e um artigo divulgando estes resultados foi aceito no 17º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia (ENCIT-2018).

Conforme citado na revisão bibliográfica há disponibilidade de diversas metodologias para o cálculo teórico da quantidade de metano emitida em um aterro sanitário, conforme definido pelo IPCC, os métodos de decaimento de ordem zero, primeira e segunda ordem, são todos baseados em dados empíricos.

Para a aplicação de tais modelos empíricos existe possibilidade da utilização de softwares que permitem estimar a vazão de gás de aterro. Para a seleção da metodologia que foi utilizada durante a realização do projeto de pesquisa, levou em conta os seguintes aspectos:

- Existência dos dados requisitados pelo método;
- Confiabilidade e reconhecimento do método no meio acadêmico;
- Existência de trabalhos com resultados positivos após a aplicação do método.

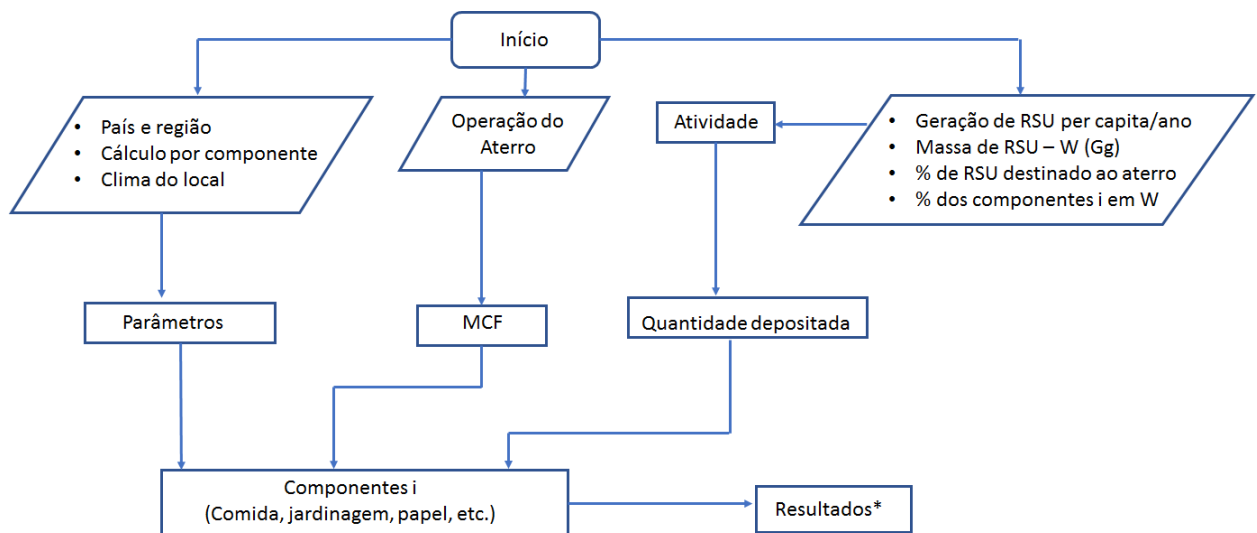
3.1.1 Geração de Gás de Aterro

A avaliação do potencial de geração de gás de aterro foi realizada para um período de produção de 30 anos a partir do início de operação de cada célula, visto que segundo

Maciel (2009) o período de máxima produção de gás dura aproximadamente de 20 a 30 anos.

O IPCC (2006) fornece uma planilha em Excel para auxiliar nos cálculos, que se encontra disponível para download na página do IPCC, a qual é alimentada com os parâmetros que podem ser identificados na Figura 9. O resultado retornado através desta planilha é a massa de metano gerado em Gg (gigagramas), CH_{4gT} , que foi aplicada na Equação 5 e posteriormente na Equação 6, retornando como resultados valores para a vazão média volumétrica anual por hora de gás de aterro produzido que poderá ser extraído do aterro.

Figura 9 – Dinâmica do modelo IPCC 2006.



Nota:

*Emissão de CH_4 em Gg

Nota: Parâmetros são k , DOC_i e DOC_f

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

Os dados de entrada que alimentam a planilha:

1. Região: A área de estudo é a cidade de Foz do Iguaçu (Latitude: 25° 32' 52"S; Longitude: 54° 35' 17"W), localizada no oeste paranaense, o clima considerado para o local é o temperado úmido, com faixa de temperatura média superior a 22°C no verão, e inferior a 18°C no inverno e possui população estimada em 264.044 habitantes (IBGE, 2018).
2. Período de estudo: A análise da geração de metano no aterro foi realizada considerando um período de estudo de 30 anos (2001-2030), a partir do início da operação das atividades no aterro sanitário municipal.

3. Geração de RSU: O volume de RSU em Gg depositado anualmente no aterro, exposto na Figura 13.
4. Composição gravimétrica: indica os percentuais das componentes presentes nos RSU, e é de extrema importância o conhecimento deste dado, pois a geração de metano é calculada separadamente para cada montante dessas classes. Para aplicação da metodologia foi necessária adequação das informações coletadas a cerca da classificação gravimétrica dos resíduos do aterro, apresentadas no Plano Municipal de Saneamento Básico do município e exibidas na Tabela 5. Pois o IPCC (2006) classifica os resíduos forma mais completa, diferenciando os tipos de matéria orgânica em: Food, Garden e Wood, a Tabela 6 apresenta a reclassificação dos dados seguindo o padrão IPCC.

Tabela 5 – Composição Gravimétrica do aterro sanitário de Foz do Iguaçu

Categoria do Resíduo	% Resíduos em Foz do Iguaçu	Descrição
Matéria Orgânica	57,35	Restos alimentares, flores, podas de árvores.
Papel/Papelão	5,26	Caixa, revista, jornal, cartões, papel, pasta, caderno, livro, pratos.
Metal	1,92	Fiação elétrica, agulha, palha de aço etc.
Plástico	9,52	
Vidro	3,72	
Diversos	22,24	Cera de vela, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, cartão de crédito, lápis de cera, embalagem longa vida, embalagens metalizadas, lixas e outros materiais não identificáveis.

Fonte: Adaptado de (PMSB, 2012)

Destaca-se que a metodologia seguida neste estudo gravimétrico foi uma adaptação do método descrito por Pessin et al. (2006), sendo baseadas nas técnicas de quarteamento de amostragem, descritas na NBR 10.007/14.

Neste trabalho julgou-se que toda a porcentagem de matéria orgânica (57,35%) como restos alimentares, *Food*, uma vez que o valor está próximo do sugerido pelo IPCC 2006 de 54% para esta classe, os resíduos de madeira segundo as informações coletadas sobre o regime de operação do aterro são depositadas em outro setor e por consequência zerou-se a porcentagem desta componente. Para a classe de plástico e outros materiais inertes (Plastic and Other Inerts) somou-se as porcentagem de plástico com metal, vidro e diversos, totalizando 37,4%, também próximo do valor sugerido pelo inventário de 31 %. Não há dados da porcentagem de tecido e fralda.

Tabela 6 – Composição percentual do RSU de Foz do Iguaçu seguindo os padrões do IPCC 2006

Categoria Resíduo	% Utilizada
Restos Alimentares	57,35
Papel	5,26
Plástico	37,4
Madeira	0
Têxtil	0
Fraldas	0

Fonte: Elaborado pela Autora, 2017.

5. Parâmetros MCF , k , DOC_i e DOC_f : foram tomados de acordo com as recomendações do IPCC (2006). No Apêndice A apresentam-se as faixas de valores padrões para cada um destes parâmetros. Considerou-se que o aterro sanitário está sendo bem operado e, portanto, o valor do fator de correção de metano – MCF poderá ser tomado como igual a 1. A constante de geração de metano, denotada por k , é um valor tabelado e único para cada componente e sua escolha depende diretamente do clima da área de estudo, neste caso temperado úmido. O fator DOC_f indica que nem todo o carbono orgânico presente nos RSU irá degradar ou que sua degradação será muito lenta, o valor recomendado pelo IPCC (2006) é de 0,5, pois considera-se que a degradação do RSU ocorrerá sob condições anaeróbicas e esta fração depende diretamente de fatores como: temperatura, umidade, pH, composição do RSU. Já os valores de DOC_i , foram tomados via a composição gravimétrica dos resíduos, e considerando RSU úmido, devido à quantidade de matéria orgânica depositada e também devido ao sistema de recirculação de chorume existente no local.
6. “Delay time”: tempo de espera, é correspondente ao período entre a data de início de operação do aterro até início efetivo de produção de gás, segundo o IPCC (2006), o tempo mínimo é de 6 meses.

3.2 Segunda Etapa: Avaliação do Potencial Térmico do Gás de Aterro

De acordo com o apresentado na revisão bibliográfica, identificar o PCI do gás de aterro é uma peça chave para o início da concepção de projetos de recuperação energética. Na seção 3.6 discutiu-se a possibilidade do uso de técnicas experimentais e analíticas e apresentou-se a metodologia que foi seguida neste trabalho.

Não há nenhum método específico desenvolvido para a quantificação do PCI ou PCS de resíduos sólidos urbanos ou de gás de aterro, devido principalmente à alta heterogeneidade dos resíduos (POLI et al., 2015). Portanto, a metodologia analítica

adotada, teve como base a teoria de Dulong e foi adaptada de forma compatível com os dados existentes sobre a amostra de gás de aterro.

3.3 Terceira Etapa: Simulação de Sistemas de Conversão de Energia Térmica em Elétrica

Estabeleceu-se que um dos objetivos deste trabalho era estudar as rotas termoquímicas aplicadas ao gás de aterro e selecionar aquela que melhor se adaptaria às condições do aterro sanitário de Foz do Iguaçu. Conforme supracitado no capítulo referente à revisão bibliográfica, as tecnologias recomendadas são: motogeradores, turbinas e microturbinas a gás e turbinas a vapor.

Para o cumprimento da terceira fase do presente projeto, fez-se necessária a análise dos ciclos térmicos das quatro tecnologias apresentadas, assim como softwares disponíveis no mercado de modelagem e simulação termodinâmica. Além disso, a pesquisa e análise de trabalhos já realizados em aterros foi fundamental para a o correto dimensionamento do sistema.

Como resultado das análises optou-se pela simulação do dimensionamento de dois ciclos, sendo: o funcionamento de MCI de um ciclo Otto e um ciclo Brayton regenerativo aberto em uma microturbina a gás, no próximo capítulo detalhou-se com maior ênfase a modelagem termodinâmica. Os motivos que levaram a esta escolha foram:

- Faixa de potência definida (inferior a 1 MW), a partir do PCI e vazão de gás de aterro disponível;
- Maiores coeficientes de eficiência elétrica;
- Baixa emissão de poluentes, principalmente NO_x , quando comparada às demais tecnologias (CENTER, 2017).

3.4 Quarta Etapa: Balanço Energético

Após a conclusão da modelagem do ciclo termodinâmico no EES, executou-se à aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica em cada um dos dispositivos pertencentes ao sistema dimensionado. O principal objetivo foi a avaliação do rendimento global dos ciclos entre outros parâmetros para fins comparativos. Os parâmetros utilizados para tal avaliação foram:

- Parâmetro 1: "Energia mecânica útil";
- Parâmetro 2: Rendimento térmico;

- Parâmetro 3: Consumo específico de combustível.

Ressalta-se que esta abordagem foi detalhada no capítulo a seguir. Além disso, foram consideradas como as principais hipóteses simplificadoras:

- Regime Permanente;
- O gases serão modelados como ideais;
- Combustão completa.

4 MODELO PARA ANÁLISE TERMODINÂMICA

O modelo termodinâmico utilizado para avaliação dos dois modelos de planta propostos, foram: **Ciclo Brayton Regenerativo Aberto e Ciclo Otto**.

A modelagem consistiu na resolução de um sistema de equações obtidas com base na Primeira Lei da Termodinâmica aplicada a cada um dos volumes de controle considerados. A escolha da modelagem termodinâmica de duas tecnologias de conversão entre as três possibilidades expostas na seção 3.7, foi realizada por meio da análise destes três parâmetros apresentados na Tabela 7 e por considerações realizadas durante a revisão bibliográfica.

Tabela 7 – Comparação dos parâmetros

% Parâmetro	GMG	Turbina e microturbina a gás	Turbina a vapor
Eficiência Elétrica	33%	28%	18 %
Consumo de combustível (kJ/kWh)	10 972	12 872	19 202
Emissão de NO_x ($\mu g/kJ$)	56,6	15	16
Emissão de CO ($\mu g/kJ$)	56,6	19	18,9

Fonte: (BOVE; LUNGHI, 2006)

O grupo motor gerador foi a primeira técnica escolhido, pois se destaca nos dois primeiros requisitos avaliados, consumo de combustível e eficiência elétrica. O sistema dimensionado foi um MCI operando via ciclo Otto.

Entretanto, deve-se recordar que o gás de aterro é um combustível de baixo poder calorífico e grande percentagem de CO_2 e, portanto suas características e eficiência de combustão são reduzidas, uma vez que a presença de CO_2 desencadeia: baixas temperaturas de chama e de taxas de queima (QIN; EGOLFOPOULOS; TSOTSIS, 2001). Uma das maneiras de esquivar-se destes problemas é através da recuperação da energia térmica contida nos gases de combustão, utilizando um ciclo Brayton regenerativo, no qual é possível aquecer os reagentes e, assim, aumentar a temperatura na zona de reação. Portanto, optou-se pelo dimensionamento de um ciclo Brayton regenerativo esperando que a simulação resulte na melhoria das características de combustão e, conseqüentemente no aumento da eficiência de conversão.

O sistema de conversão proposto foi uma planta termoelétrica de pequeno porte

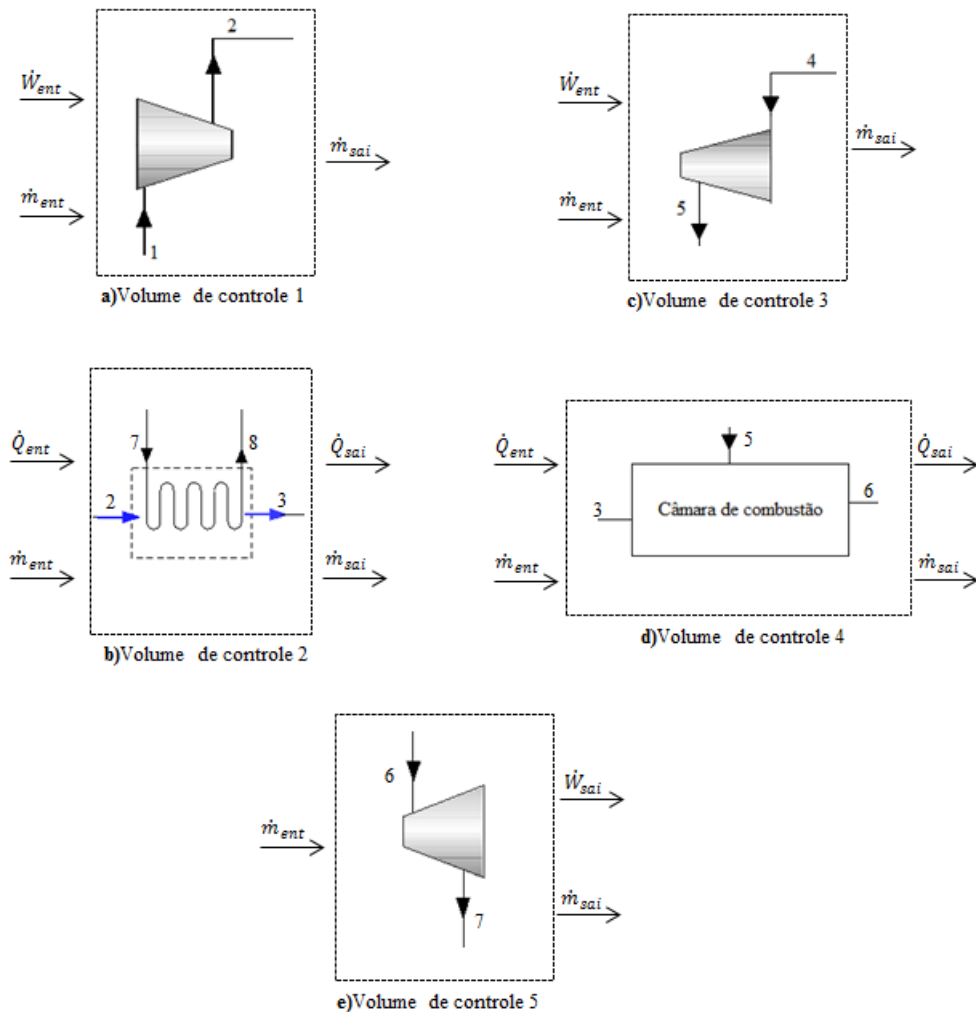
6. Condições de referência de pressão e temperatura:

$$T_o=298,15 \text{ K e } P_o=101,3 \text{ kPa}$$

Destaca-se que ao modelar os gases como ideais, inferiu-se que a pressão de trabalho é baixa (10% da pressão crítica) e a temperatura é alta o suficiente para tornar a massa específica do fluido baixa. Quando a massa específica é considerado baixa, pode-se considerar que a energia interna é somente influenciada pelas mudanças de temperatura, desprezando os efeitos da pressão e volume do gás, isto simplifica consideravelmente a previsão do comportamento dos gases em um ciclo de potência (BOLES; ÇENGEL, 2015).

Para que a premissa do modelo de gás ideal fosse satisfeita, considerou-se que a pressão de trabalho na câmara de combustão, no caso do ciclo Brayton, é equivalente a 10% da pressão crítica, sendo igual a 459,9 kPa, utilizando como base teórica as propriedades críticas do gás de aterro padrão em : $T_{critica} = -82^{\circ}C$ e $P_{critica} = 4,599 \text{ MPa}$ (AMBROSE; TSONOPOULOS, 1995).

Figura 11 – Volumes de controle analisados



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

4.1 Modelagem do Ciclo Brayton Regenerativo

4.1.1 Compressores: Volumes de controle 1 e 3

Os dois compressores adicionados ao ciclo foram utilizados para elevar a pressão desde 103,3 kPa até 459,9 kPa (pressão de operação da câmara de combustão), sendo o primeiro deles responsável pelo aumento de pressão do ar de admissão e o segundo pelo do gás de aterro. Considerou-se que o regime de compressão foi isentrópico e obedeceu à seguinte relação de P e T (BOLES; ÇENGEL, 2015), e as temperaturas de saída (T_2 e T_5) foram calculadas via aplicação das Equações 16 e 17, respectivamente.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}^{\frac{(k_1-1)}{k_1}} \quad (16)$$

$$\frac{T_5}{T_4} = \frac{P_5}{P_4}^{\frac{(k_1-1)}{k_1}} \quad (17)$$

Sendo $k_1 = c_p/c_v$, a razão entre calores específicos a pressão constante e a volume constante (BOLES; ÇENGEL, 2015).

4.1.1.1 Análise energética nos volumes de controle 1 e 3

Para este tipo de equipamento não considera-se troca de calor entre o mesmo e a vizinhança e as duas formas de energia que atravessam as fronteiras do sistema são fluxo de massa e trabalho. Aplicando a lei de conservação de massa têm-se para o volume de controle 1 (VC_1) e para o volume de controle (VC_3):

$$VC_1 : \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (18)$$

$$VC_3 : \quad \dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (19)$$

Aplicando o princípio da conservação de energia juntamente com a considerações já realizadas, a Equação 15 pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$VC_1 : \quad \dot{W}_{c_1} = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1) \quad (20)$$

Onde:

\dot{W}_{c_1} = potência recebida pelo compressor 1 (kW);

\dot{m}_1 = vazão molar de ar no ponto 1 (kmol/s);

$(h_2 - h_1)$ = variação de entalpia entre os pontos 1 e 2 (kJ/kmol);

VC_3 :

$$\dot{W}_{c_2} = \dot{m}_4 \cdot (h_5 - h_4) \quad (21)$$

Onde:

\dot{W}_{c_2} = potência recebida pelo compressor 2 (kW);

\dot{m}_4 = vazão molar de gás de aterro no ponto 4 (kmol/s);

$(h_5 - h_4)$ = variação de entalpia entre os pontos 4 e 5 (kJ/kmol);

4.1.2 Trocador de Calor: Volume de Controle 2

O objetivo do uso de um trocador de calor na planta foi para promover a utilização da energia residual presente nos gases de combustão para o pré-aquecimento do ar de admissão. Na Figura 11(b) verifica-se que a entrada do fluido quente é no ponto 7 e no ponto 8 sua saída, já a entrada de fluido frio ocorre no ponto 2 e a saída no ponto 3.

O ponto de partida para análise deste equipamento foi estimar a quantidade de calor que é trocada entre os fluidos. Os dados disponíveis são apenas as temperaturas de entrada de fluido quente e frio, portanto, a abordagem mais indicada devido estas circunstâncias é o método NUT, que se baseia em um parâmetro adimensional denominado efetividade (ϵ), que indica a razão entre a quantidade real de calor transferido e a quantidade máxima de calor que poderia ser transferido (CENGEL, 2007).

Lora, Nascimento et al. (2004) citam que para trocadores de calor modernos acoplados a turbinas a gás e com a temperatura dos gases de escape inferiores à 900 K, pode-se considerar ϵ igual a 0,9. Portanto, determinou-se a quantidade de calor real transferido entre os fluidos através da Equação 22.

$$\dot{Q}_{\text{real}} = \epsilon \cdot \dot{Q}_{\text{máx}} \quad (22)$$

Segundo Cengel (2007), é possível calcular a quantidade máxima de calor que poderá ser transferida no TC usando o seguinte equacionamento:

$$\dot{Q}_{\text{máx}} = C_{\text{mín}} \cdot (T_{\text{ent},q} - T_{\text{ent},f}) \quad (23)$$

Sendo $T_{\text{ent},q}$ a temperatura de entrada do fluido quente (T_7) e $T_{\text{ent},f}$ a temperatura de entrada do fluido frio (T_2), e $C_{\text{mín}}$ a capacidade mínima de armazenamento de calor pelo fluido, calculada pela Equação 24:

$$C_{\text{mín}} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \quad (24)$$

Sendo:

\dot{m}_{ar} = fluxo de fluido frio, neste caso o ar de admissão;

cp_{ar} = capacidade calorífica do ar.

4.1.2.1 Análise energética do volume de controle 2

Duas massas de fluido cruzam as fronteiras deste volume de controle, o ar denominado fluido frio e a mistura de gases de escape chamada de fluido quente e, no interior do equipamento há troca de calor entre os mesmos. Para a realização do balanço de massa, foram analisadas as duas entradas e saídas de forma separada, sendo a Equação 25 para o fluido frio e a Equação 26 para o fluido quente.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (25)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (26)$$

O balanço de energia foi realizado considerando o intercâmbio de calor entre os fluidos e, que a taxa de transferência de calor recebida pelo fluido frio é igual a taxa de transferência de calor extraída do fluido quente:

$$\dot{Q}_{tc} = \dot{m}_1 \cdot (h_3 - h_2) \quad (27)$$

Em que:

\dot{Q}_{tc} = taxa de transferência de calor no trocador de calor (kW);

\dot{m}_1 = vazão molar de ar no ponto 1 (kmol/s);

$(h_3 - h_2)$ = variação de entalpia entre os pontos 2 e 3 (kJ/kmol).

4.1.3 Câmara de Combustão: Volume de Controle 4

Este equipamento é responsável pela queima do combustível e é acoplado no interior da microturbina com volume já determinado pelo fabricante. Para a queima do gás considerou-se combustão completa, com baixa temperatura de chama, inferior a 1500 K (TURNS, 2013), hipótese que foi posteriormente confirmada pelos cálculos de temperatura de chama adiabática na seção 5.2.3.

Os parâmetros conhecidos são somente referente ao combustível utilizado (vazão molar e composição volumétrica) e estas foram as entradas para desenvolvimento da análise da combustão. Neste estudo de caso, não foi possível quantificar experimentalmente a composição volumétrica do gás de aterro, no entanto, considerou-se uma média aritmética entre os valores apresentados na Tabela 1 para ilustrar a composição do gás que foi usado como combustível nesta simulação (Tabela 8). A vazão de entrada, foi os resultados da

aplicação do método IPCC 2006, apresentados na Figura 16, (que encontra-se na seção 6.2), e no Apêndice B, sendo \dot{m}_{LFG} dados em kmol/s.

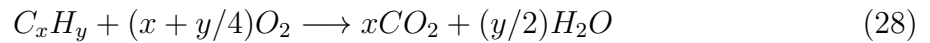
Tabela 8 – Concentrações volumétricas consideradas para gás de aterro utilizado

Componente	%
CH_4	50
CO_2	42
N_2	5
O_2	3

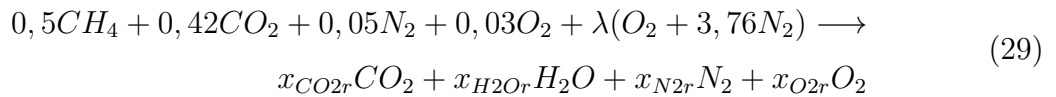
Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

4.1.3.1 Estequiometria da combustão

A reação de oxidação do metano escolhida foi da reação global de hidrocarbonetos, Turns (2013) classifica o modelo como uma aproximação simplificada e útil para problemas de engenharia, porém não descreve detalhes da oxidação do combustível. A expressão global é dada pela Equação 28:



Rearranjando a Equação 28 para o caso da queima do gás de aterro com excesso de ar, lembrando que a fração molar é correspondente à composição volumétrica (BOLES; ÇENGEL, 2015), têm-se que:



Sendo :

$$\lambda = \frac{a - 0,03}{\Phi} \quad (30)$$

Para queima de metano considera-se $a = x + y/4 = 2$. Os valores adotados para a razão de equivalência, Φ , foram determinados via uma análise que será melhor detalhada na discussão de resultados.

Aplicando a conservação de massa das espécies químicas, têm-se:

$$\text{Conservação de C: } 0,5 + 0,42 = x_{CO_2r}$$

$$\text{Conservação de H: } 4 \cdot 0,5 = 2 \cdot x_{H_2Or}$$

$$\text{Conservação de O: } (2 \cdot 0,42) + (2 \cdot 0,03) + (2 \cdot \lambda) = 2 \cdot x_{CO_2r} + x_{H_2Or} + 2 \cdot x_{O_2r}$$

$$\text{Conservação de N: } (2 \cdot 0,05) + (3,76 \cdot \lambda) = 2 \cdot x_{N_2r}$$

4.1.3.2 Relação de equivalência

A relação de equivalência denotada por Φ , indica quantitativamente se a mistura é rica em combustível, $\Phi > 1$, pobre, $\Phi < 1$, ou estequiométrica, $\Phi = 1$. Seguindo a metodologia apresentada por Turns (2013):

$$\Phi = \frac{(A/F)_{est}}{(A/F)_{real}} \quad (31)$$

A relação $(A/F)_{est}$ indica a razão estequiométrica de ar-combustível, e pode ser encontrada a partir de :

$$(A/F)_{est} = \left(\frac{m_a}{m_F} \right)_{est} = 4,76(a - 0,03) \cdot \left(\frac{MW_a}{MW_F} \right) \quad (32)$$

Sendo MW_a e MW_F as massas molares do ar e do combustível, respectivamente. Calculando o valor de $(A/F)_{est}$ e assumindo um valor para Φ é possível determinar a razão real de ar-combustível necessária para que a combustão ocorra e conseqüentemente a vazão molar de ar real:

$$(A/F)_{real} = \frac{(A/F)_{est}}{\Phi} \quad (33)$$

$$\dot{m}_{ar} = (A/F)_{real} \cdot \dot{m}_{LFG} \quad (34)$$

4.1.3.3 Temperatura de chama adiabática

A temperatura no ponto 6 foi determinada via aplicação da hipótese de temperatura adiabática de chama a pressão constante, ou seja, considerando T_6 sendo a maior temperatura obtida no processo de queima do combustível, desconsiderando as perdas de calor. A metodologia seguida será descrita a seguir:

$$H_{reag} = H_{prod} \quad (35)$$

H_{reag} é a soma das entalpias dos reagentes (ar e gás de aterro), e foi calculada pelo somatório apresentado na equação 36:

$$H_{reag} = \sum_{i=1}^Z N_i \cdot \bar{h}_i \quad (36)$$

Sendo:

N_i = número de mols do elemento i;

\bar{h}_i = entalpia do elemento i na temperatura da mistura ar/gás de aterro;

A soma das entalpias dos produtos da combustão (gases de escape), H_{prod} , é calculada através da Equação 37.

$$H_{prod} = \sum_{i=1}^Z N_i \bar{h}_i = \sum_{i=1}^Z N_i [h_{f,i}^{\bar{}} + c\bar{p}_{p,i}(T_6 - 298)] \quad (37)$$

Sendo:

N_i = número de mols do elemento i ;

$h_{f,i}^{\bar{}}$ = entalpia de formação elemento i na temperatura média da mistura de gases;

$c\bar{p}_{p,i}$ = calor específico a pressão constante do elemento i na temperatura média da mistura de gases.

Igualando as Equações 36 e 37, substituindo os devidos coeficientes sobre a composição dos gases e temperaturas no ambiente do software EES (Engineering Equation Solver) e utilizando sua biblioteca de propriedades termodinâmicas, obteve-se as temperaturas no ponto 6.

4.1.3.4 Análise energética no volume de controle 4

Conforme representado na Figura 11(d), observa-se duas entradas e uma saída de massa, portanto o balanço de massa pode ser expresso por:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (38)$$

Admite-se que massa e calor transitarão neste volume de controle 4, portanto a variação da quantidade de energia no volume de controle é igual à energia contida no combustível que será liberada durante a combustão.

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_5 \cdot PCI \quad (39)$$

\dot{Q}_{cc} = taxa de transferência de calor na câmara de combustão (kW);

\dot{m}_5 = vazão molar de gás de aterro no ponto 5 (kmol/s);

PCI = poder calorífico inferior (kJ/kmol).

4.1.4 Microturbina : Volume de Controle 5

A microturbina é responsável pela extração de trabalho mecânico através da expansão dos gases quentes neste equipamento. Considerou-se que o regime de expansão foi isentrópico e obedeceu a seguinte relação de P e T (BOLES; ÇENGEL, 2015):

$$\frac{T_7}{T_6} = \frac{P_7}{P_6}^{\frac{(k_1-1)}{k_1}} \quad (40)$$

Considerando T_7 e P_7 nas condições de referência e, $k_1 = c_p/c_v$ da mistura de gases.

4.1.4.1 Análise energética do volume de controle 5

Durante a expansão da mistura de gases na turbina, fluxo mássico e trabalho são as formas de energia que cruzam as barreiras do volume de controle. O balanço mássico é representado pela Equação 41 e o balanço de energia pela Equação 42.

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (41)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7) \quad (42)$$

em que:

\dot{W}_{turb} = potência extraída da turbina (kW);

\dot{m}_6 = vazão molar dos gases de exaustão no ponto 6 (kmol/s);

$(h_6 - h_7)$ = variação de entalpia entre os pontos 6 e 7 (kJ/kmol);

4.2 Modelagem do Ciclo Otto

O ciclo Otto, conforme explanado na revisão bibliográfica, opera em um ciclo de trabalho de 4 tempos. A modelagem termodinâmica foi realizada para cada um destes tempos.

4.2.1 Primeiro Tempo: Admissão

No primeiro tempo, ocorre a entrada da mistura ar/gás de aterro no cilindro através da válvula de admissão. Nesta fase inicial, determinaram-se as proporções de ar e gás de aterro admitidos no cilindro. A relação de equivalência é obtida via a aplicação da mesma metodologia explicitada na seção 5.1.3.2.

4.2.2 Segundo Tempo: Compressão

A mistura ar e gás de aterro é comprimida isentropicamente. O pistão sai do PMI (ponto morto inferior) ao PMS (ponto morto superior). Admitiu-se que a razão de compressão " r " foi igual à 10, isto quer dizer que o volume da mistura no final da compressão é 10 vezes menor que o volume inicial. A temperatura e pressão (T_2 e P_2) após o processo são calculados via aplicação das Equações 43 e 44 (BOLES; ÇENGEL, 2015).

$$\frac{T_2}{T_1} = r^{(k_1-1)} \quad (43)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = r^{k_1} \quad (44)$$

Sendo $k_1 = c_p/c_v$, a razão entre calores específicos a pressão constante e a volume constante.

4.2.3 Terceiro Tempo: Combustão e expansão

Após a compressão, ocorre a ignição da mistura, elevando a temperatura e pressão com a queima, fazendo com que haja uma expansão do pistão do PMS ao PMI, transmitindo ao eixo de manivelas uma força motriz.

A simulação da queima do gás foi considerada como uma combustão completa e a baixa temperatura de chama. A metodologia utilizada para a análise da combustão foi a apresentada na seção 5.1.3.1, sendo os parâmetros de entrada referentes a mistura ar/gás de aterro que foram definidas no primeiro tempo (vazão molar e composição volumétrica). Assim como na modelagem do ciclo Brayton regenerativo, utilizou-se a hipótese de que a temperatura de chama (T_3) é adiabática, entretanto, neste caso a queima no cilindro pistão é a volume constante. A metodologia usada foi a descrita por Turns (2013):

$$H_{reag} - H_{prod} - R_u \cdot (N_{reag} \cdot T_2 - N_{prod} \cdot T_3) = 0 \quad (45)$$

No qual a soma das entalpias dos reagentes (mistura admitida), denotado por H_{reag} , sendo mensurada pela Equação 46:

$$H_{reag} = \sum_{i=1}^Z N_i \cdot \bar{h}_i \quad (46)$$

Sendo:

N_i = número de mols do elemento i ;

\bar{h}_i = entalpia do elemento i na temperatura da mistura ar/gás de aterro;

A soma das entalpias dos produtos da combustão (gases de escape), H_{prod} , é calculada através da Equação 47.

$$H_{prod} = \sum_{i=1}^Z N_i \cdot \bar{h}_i = \sum_{i=1}^Z N_i \cdot [h_{f,i}^{\circ} + c\bar{v}_{p,i}(T_3 - 298)] \quad (47)$$

Sendo:

N_i = número de mols do elemento i ;

$h_{f,i}^{\circ}$ = entalpia de formação elemento i na temperatura média da mistura de gases;

$c\bar{v}_{p,i}$ = calor específico a volume constante do elemento i na temperatura média da mistura de gases.

Substituindo as Equações 46 e 47 na Equação 45:

$$\sum_{i=1}^Z N_i \cdot \bar{h}_i - \sum_{i=1}^Z N_i \cdot \bar{h}_i = \sum_{i=1}^Z N_i \cdot [h_{f,i}^{\circ} + c\bar{v}_{p,i}(T_3 - 298)] - R_u \cdot (N_{reag} \cdot T_2 - N_{prod} \cdot T_3) = 0 \quad (48)$$

A temperatura e pressão (T_4 e P_4) após o processo de expansão isentrópico são calculados via aplicação das Equações 49 e 50 (BOLES; ÇENGEL, 2015).

$$\frac{T_3}{T_4} = r^{(k-1)} \quad (49)$$

$$\frac{P_3}{P_4} = r^k \quad (50)$$

4.2.4 Quarto Tempo: Descarga

Antes do pistão atingir o PMI durante o 3º tempo, a válvula de escape começa a abrir e os gases passam a ser liberados. Após isso, a válvula de descarga fecha-se e a de admissão abre-se e o ciclo inicia-se novamente.

Analisando isto termodinamicamente, observou-se que está ocorrendo uma liberação de calor a volume constante e modelando o ciclo como ideal, considerou-se que a P_5 seja igual a P_1 , a temperatura neste instante de tempo sendo calculada via aplicação da Equação 51 (BOLES; ÇENGEL, 2015).

$$\frac{T_5}{T_4} = \frac{P_5}{P_4} \cdot \frac{v_5}{v_4} \quad (51)$$

4.2.5 Análise energética do ciclo

O interesse da análise energética do ciclo foi determinar o quanto de trabalho pode ser extraído do MCI, considerando que as formas de energia que cruzam as fronteiras do volume de controle são o fluxo mássico e trabalho. O balanço mássico é representado pela Equação 52 e o balanço de energia pela Equação 53.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{LFG} \quad (52)$$

$$\dot{W}_{MCI} = \dot{m}_1 \cdot (u_3 - u_4) \quad (53)$$

No qual:

\dot{W}_{MCI} = potência extraída do motor de combustão interna (kW);

\dot{m}_1 = vazão molar dos gases de exaustão, que pela lei da conservação de massa é igual à vazão de mistura combustível admitida (kmol/s);

$(u_3 - u_4)$ = variação de energia interna molar entre os instantes de tempo 3 e 4 (kJ/kmol).

As entradas e saídas de energia que ocorreram nos tempos 3 e 4, respectivamente, são calculadas a através das Equações 54 e 55:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_1 \cdot (u_3 - u_2) \quad (54)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_1 \cdot (u_4 - u_5) \quad (55)$$

Sendo:

\dot{Q}_H = Calor recebido através da combustão (kW);

\dot{m}_1 = vazão molar dos gases de exaustão, que pela lei da conservação de massa é igual a vazão de mistura relação de equivalência admitida (kmol/s);

$(u_3 - u_2)$ = variação de energia interna molar entre os instantes de tempo 2 e 3 (kJ/kmol);

\dot{Q}_L = Calor recebido através da combustão (kW);

$(u_4 - u_5)$ = variação de energia interna molar entre os instantes de tempo 4 e 5 (kJ/kmol).

4.3 Parâmetros de Desempenho

O desempenho do ciclo térmico pode ser qualificado utilizando diferentes aspectos referentes ao ciclo (LORA; NASCIMENTO et al., 2004). No presente trabalho optou-se por avaliar o rendimento dos ciclos propostos através do seguintes parâmetros: 'Energia útil mecânica' (Equação 56, rendimento térmico (Equação 57) e o consumo específico de combustível (Equação 58), ambas as equações são válidas para os dois ciclos.

Definiu-se "Energia mecânica útil" como a quantidade de energia, em kWh, que pode ser extraída do sistema considerando que ele trabalhe o ano todo. Como esta condição é impossível de se realizar, pontua-se que este é um critério que foi usado somente para fins comparativos.

$$E = \dot{W}_{\text{útil}} \cdot 8760h \quad (56)$$

$$\eta_{th} = \left(\frac{\dot{W}_{\acute{u}til}}{\dot{Q}_{ent}} \right) \quad (57)$$

Sendo $\dot{W}_{\acute{u}til}$ o trabalho mecânico que pode ser extraído do ciclo e transferido ao gerador elétrico, e \dot{Q}_{ent} a quantidade de calor recebido durante a combustão, ou seja neste caso, o PCI do gás de aterro.

$$SPC = \frac{\dot{m}_{LFG}}{\dot{W}_{\acute{u}til}} \quad (58)$$

Sendo \dot{m}_{LFG} a vazão real de combustível, em kmol/s, e $\dot{W}_{\acute{u}til}$ a potência útil extraída da turbina.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do aterro sanitário de Foz do Iguaçu

O aterro sanitário está localizado na zona noroeste da cidade entre os bairros Porto Belo e Jardim Califórnia, ocupa uma área total de $389.737,44 \text{ m}^2$, sendo que, no mesmo local, são desenvolvidas diferentes atividades de tratamento de resíduos. A área destinada ao acondicionamento dos RSU está dividida em 3 células, conforme pode-se observar na Figura 12. As células 1 e 2 são compostas por 6 camadas cada e têm área de $58.387,15 \text{ m}^2$ e $61.584,01 \text{ m}^2$, respectivamente. O período de operação da primeira compreende de 2001 a 2010 e da segunda, de 2010 a 2017. A terceira célula, tem área de $64.780,63 \text{ m}^2$, iniciou suas atividades em julho de 2017 (PMFI, 2018).

Figura 12 – Vista aérea do aterro sanitário

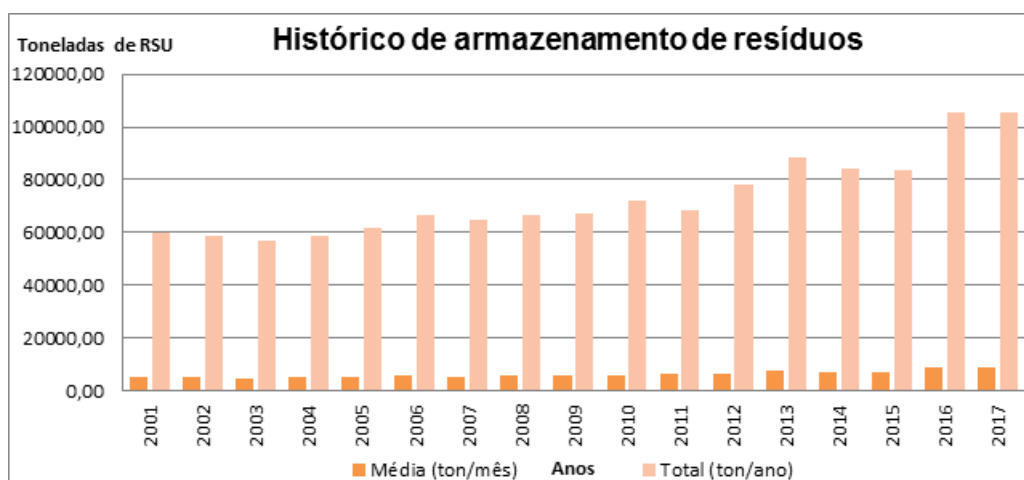


Fonte: Adaptado de Google Earth, 2017.

Segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico divulgado pela Prefeitura Municipal, no ano de 2012, a compactação dos RSU na célula ocorre diariamente e os mesmos são cobertos com uma camada de 0,20 m de espessura de solo. A base é impermeabilizada com plástico filme impermeável e possui um sistema de drenos e coletores internos para a coleta e condução dos líquidos percolados até o sistema de tratamento de

efluentes e drenos verticais para a captura do gás de aterro liberado (PMSB, 2012). Desde o início de sua operação, o aterro é administrado pela empresa privada Vital Engenharia Ambiental S/A e estima-se que o aterro receba aproximadamente 224 toneladas/dia de resíduos sólidos oriundos da Coleta Pública Domiciliar e da Limpeza Urbana (PMFI, 2018). Na Figura 13, apresenta-se o histórico de armazenamento de resíduos para o aterro e na Tabela 5 o resultado do estudo de composição gravimétrica do volume dos RSU, ambos os dados foram disponibilizados Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu.

Figura 13 – Histórico de armazenamento dos RSU.



Fonte: PMSB (2012) e PMFI (2018)

Nota: Para os anos de 2012 e 2016 não haviam dados disponíveis, para possibilitar a aplicação do modelo IPCC 2006, foi necessária a realização de uma estimativa do total dos RSU coletados via a multiplicação da quantidade de habitantes no município pela geração per capita teórica dos RSU. Destaca-se que a operação do aterro iniciou-se em outubro/2001, há somente dados de 3 meses para este ano.

5.2 Geração de Gás de Aterro

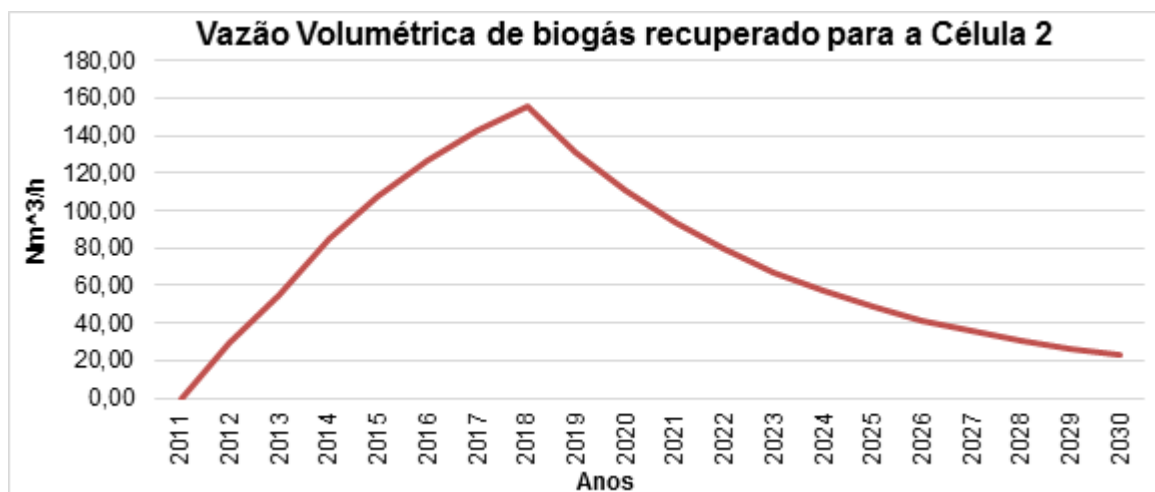
As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados obtidos para as vazões médias de gás de aterro calculadas para as células 1 e 2, respectivamente. Nota-se que o pico de produção de gás para a primeira célula ocorreu em 2011, sendo a vazão média anual igual à $142,18 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e, para a célula 2, o pico acontecerá no ano de 2018 e corresponderá a vazão média anual de $155,98 \text{ Nm}^3/\text{h}$. A Figura 16 ilustra a soma entre os dois gráficos apresentando o potencial total de gás de aterro que poderá ser recuperado do aterro sanitário, nota-se que maior vazão é estimada para o ano de 2019, sendo igual a $200,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Figura 14 – Vazão Volumétrica Anual de gás de aterro Recuperado na Célula 1



Fonte: Elaborado pela Autora.

Figura 15 – Vazão Volumétrica Anual de gás de aterro Recuperado na Célula 2

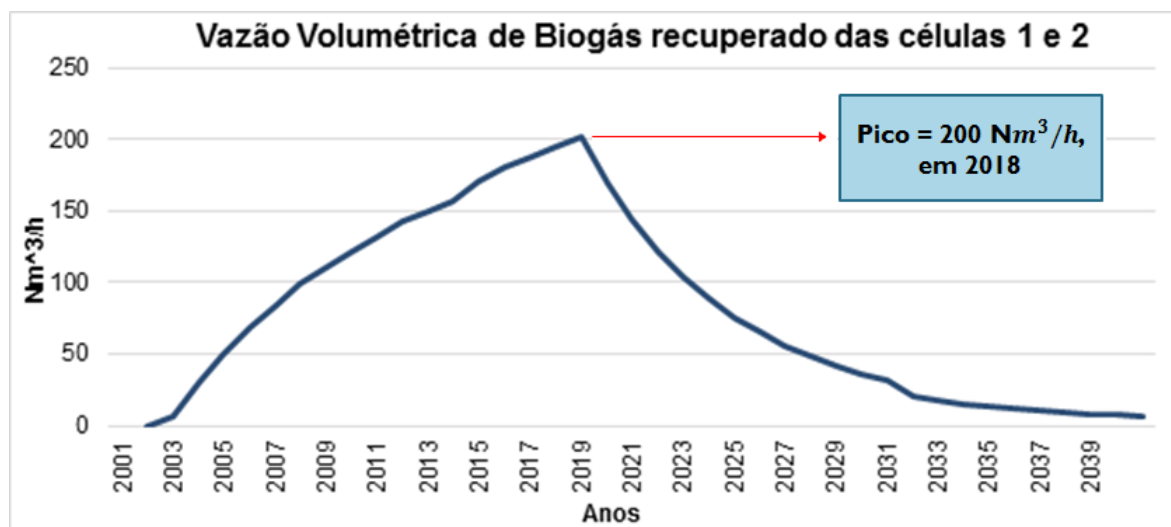


Fonte: Elaborado pela Autora.

5.3 Avaliação do Potencial Térmico do Gás de Aterro

Para determinação do potencial térmico do gás de aterro a partir da equação de Dulong, foi necessário conhecer o percentual volumétrico de metano presente no gás de aterro, utilizando como base teórica os valores recomendados pelo IPCC e os resultados obtidos por outros autores expostos na Tabela 1. Considerou-se que fração volumétrica de metano neste caso igual a 50%. Logo usando a Equação 7, obteve-se que o PCI deste gás de aterro é $445.266,6 \text{ kJ/kmol}$.

Figura 16 – Vazão Volumétrica Anual de gás de aterro Recuperado nas Células 1 e 2



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

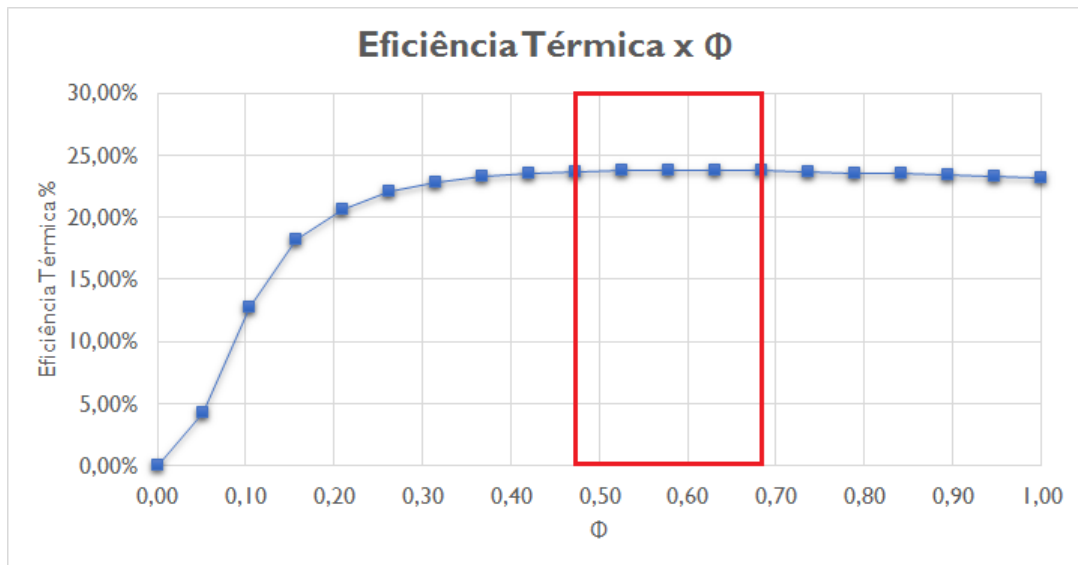
5.4 Análise da combustão

A análise da combustão realizada é mesma utilizada para os dois ciclos, visto que as condições de queima não se alteram, exceto o cálculo da temperatura adiabática de chama. Inserindo as equações descritas nas seções : 5.1.3.1, 5.1.3.2, 5.1.3.3 e 5.2.3 no software EES e utilizando a biblioteca de propriedades termodinâmicas do programa, simulou-se primeiramente um cenário variando o valor da relação de equivalência, de 0 a 1. O objetivo desta análise foi identificar qual faixa de Φ se obtém os maiores coeficientes de eficiência térmica e, seleciona-lá para uma análise mais completa.

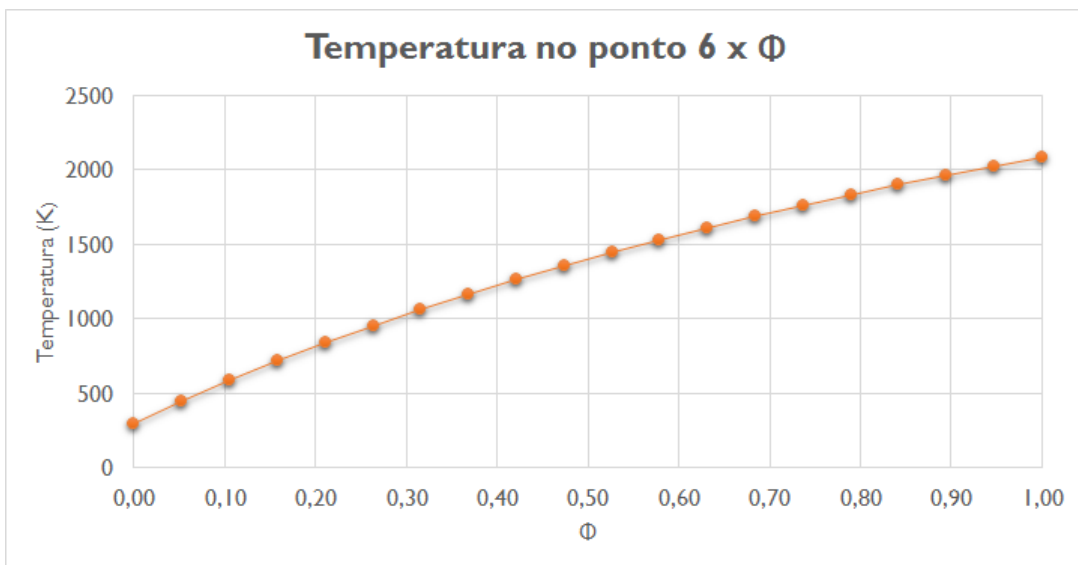
5.4.1 Análise dos resultados para o Ciclo Brayton Regenerativo

As Figuras 17 e 18 apresentam gráficos referentes a análise realizada para o ciclo Brayton regenerativo. A primeira delas é referente a variação de Φ pela eficiência térmica, notou-se que os valores obtidos para a eficiência sofrem uma pequena oscilação, variando de 20% a 25%, para coeficientes de razão de equivalência entre 0,3 a 1. Porém, os maiores índices observados e escolhidos para a análise de Primeira Lei são os destacados em vermelho no gráfico, sendo a eficiência térmica igual a 23,72%, 23,82% e 23,75%, com $\Phi=0,48$, 0,58 e 0,68, respectivamente.

O segundo gráfico apresentado, Figura 18, ilustra o comportamento da máxima temperatura do sistema quando varia-se a razão de equivalência. Verifica-se que quanto maior a quantidade de ar injetado na câmara de combustão, menor a temperatura adiabática de chama. Esta relação inversamente proporcional é registrada devido a presença de nitrogênio no ar, aproximadamente 79% em fração volumétrica, que atua como inerte no processo, mas em razão de suas características térmicas ele acaba consumindo parte da energia liberada durante a combustão.

Figura 17 – Variação de Φ x Eficiência Térmica

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Figura 18 – Variação de Φ x Temperatura adiabática de chama

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Para os três casos selecionados obteve-se os seguintes resultados para os produtos da combustão para cada um dos casos de razão de equivalência analisados:

Caso 1: $\Phi = 0,68$

Tabela 9 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 1

Componente	Fração molar
CO_2	0,1151
H_2O	0,1251
O_2	0,05885
N_2	0,701

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 2: $\Phi = 0,58$

Tabela 10 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 2

Componente	Fração molar
CO_2	0,09992
H_2O	0,1086
O_2	0,07865
N_2	0,7128

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 3: $\Phi = 0,48$

Tabela 11 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 3

Componente	Fração molar
CO_2	0,08422
H_2O	0,09154
O_2	0,09917
N_2	0,7251

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

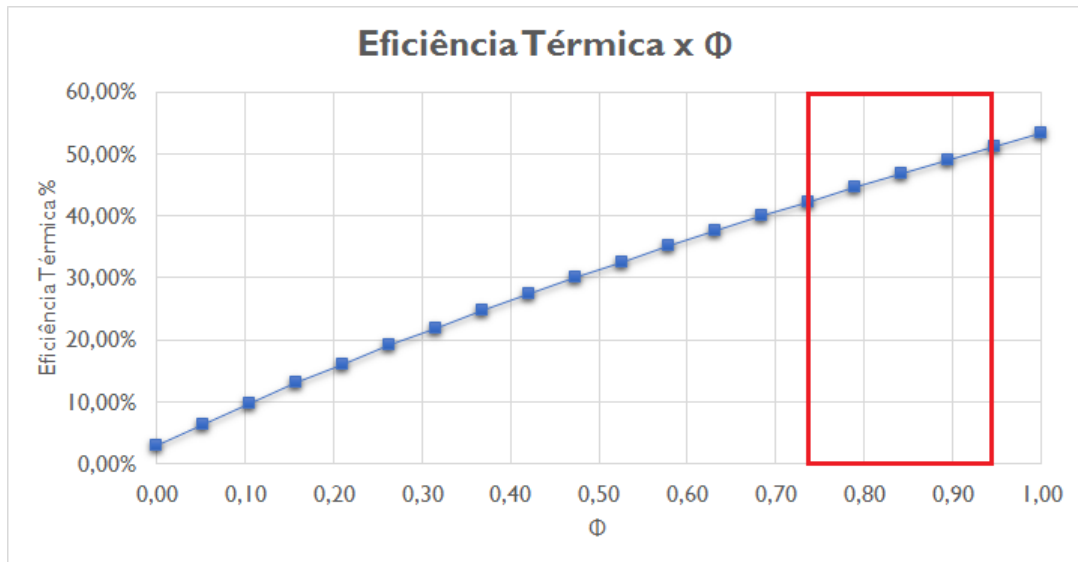
5.4.2 Análise dos resultados para o Ciclo Otto

Do mesmo modo realizado anteriormente e com mesmo objetivo, análise do ciclo Brayton, repetiu-se a simulação e observou-se os comportamentos da eficiência térmica e a temperatura adiabática de chama em relação das variações de 0 a 1 da razão de equivalência.

A Figura 19, apresenta graficamente os resultados obtidos para a eficiência térmica. Nota-se que uma evolução proporcional entre as duas variáveis observadas, ou seja, quanto maior do valor da eficiência, mais próxima de 1 é a razão de equivalência. Para análise de primeira de Lei, selecionou-se a faixa de Φ mais próxima do valor estequiométrico, que está destacada no gráfico. Sendo a eficiência térmica igual a 42,3%, 46,88% e 51,3%, com $\Phi = 0,75$, 0,85 e 0,95, respectivamente.

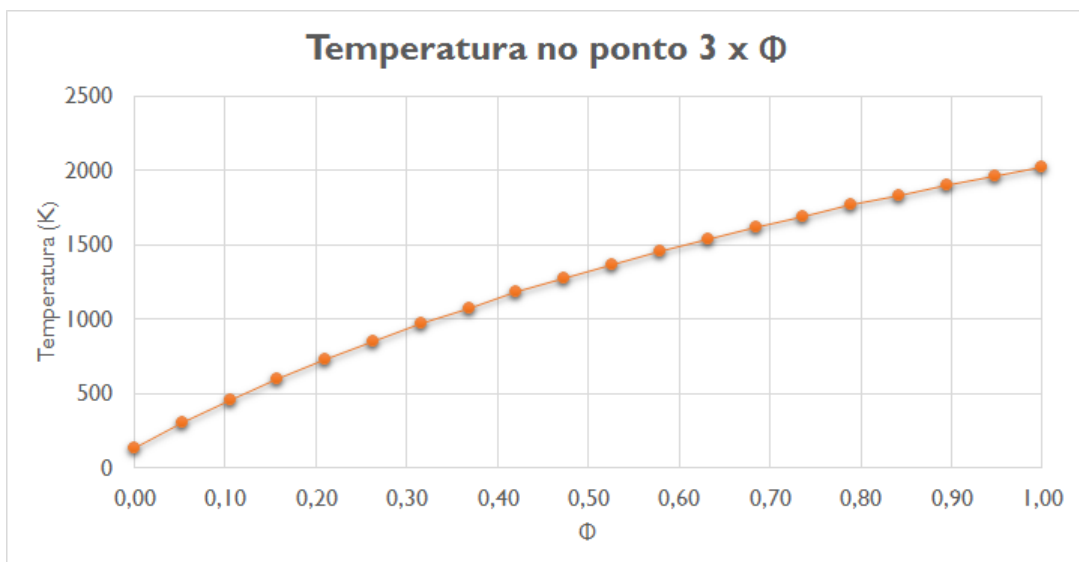
Já a Figura 20, exibe os resultados referentes a análise da temperatura adiabática de chama. Observa-se o mesmo comportamento exibido para análise da combustão na microtubina, quanto maior o Φ , maior temperatura.

Figura 19 – Variação de Φ x Eficiência Térmica



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Figura 20 – Variação de Φ x Temperatura adiabática de chama



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Para os três casos obteve-se os seguintes resultados para os produtos da combustão para cada um dos casos de relação de equivalência:

Caso 1: $\Phi = 0,95$

Tabela 12 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 1

Componente	Frações molares
CO_2	0,1534
H_2O	0,1667
O_2	0,008773
N_2	0,6712

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 2: $\Phi = 0,85$

Tabela 13 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 2

Componente	Frações molares
CO_2	0,1396
H_2O	0,1517
O_2	0,02677
N_2	0,6819

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 3: $\Phi = 0,75$

Tabela 14 – Frações molares dos produtos da combustão - Caso 3

Componente	Frações molares
CO_2	0,1253
H_2O	0,1362
O_2	0,04541
N_2	0,693

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

5.5 Análise Termodinâmica

Todas as propriedades termodinâmicas, assim como também os cálculos requeridos nas análises energética foram realizados com o auxílio do software EES (Engineering Equation Solver). Nos Apêndices C e D se apresenta a rotina computacional elaborada no EES para os ciclos.

As entradas de dados para este modelo foram:

1. As vazões anuais, em kmol/s, de biogás de aterro obtidas por meio da aplicação do método de decaimento de primeira ordem proposto no guia do IPCC 2006 e apresentadas da Figura 16 e no Apêndice B;
2. Composição volumétrica do gás de aterro de aterro (Tabela 8);

3. Razão de equivalência para três casos determinados na seção 6.4, sendo para o ciclo Brayton $\Phi = 0,68$, $\Phi = 0,58$ e $\Phi = 0,48$ e para o ciclo Otto : $\Phi = 0,95$, $\Phi = 0,85$ e $\Phi = 0,75$.

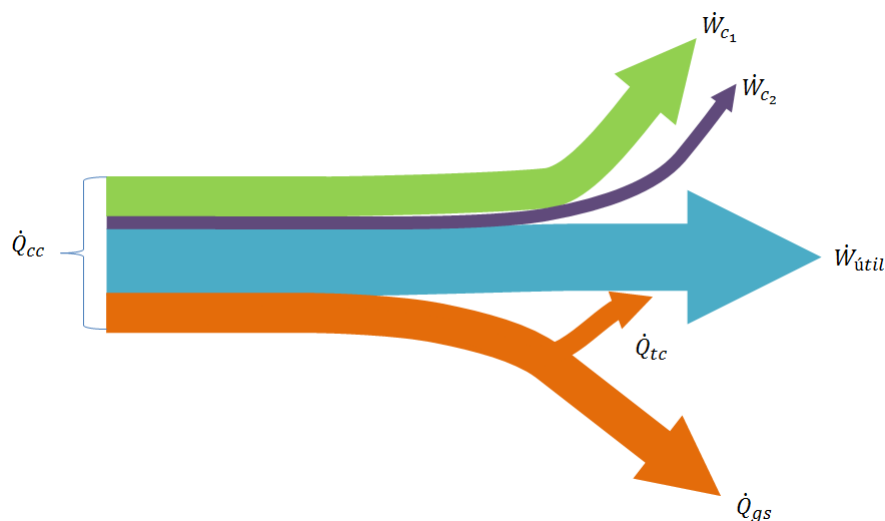
Nos Apêndices E e F apresentam-se as propriedades termodinâmicas calculadas para cada ponto de análise, vazão e caso de razão de equivalência, que serão cruciais para o desenvolvimento das análises posteriores.

Quanto aos valores das propriedades mensuradas em cada ponto de análise, destaque-se que, no caso do ciclo Brayton, as temperaturas referentes à saída do trocador de calor foram calculadas considerando a hipótese de troca adiabática, ou seja, toda a energia perdida pelo fluido quente foi absorvida pelo fluido frio, logo, pode-se inferir que trata-se de temperaturas idealizadas.

As entalpias em alguns pontos (4, 5, 6, 7 e 8 no ciclo Brayton e nos quatro tempos analisados no ciclo Otto) apresentaram sinal negativo devido ao fato de estarem representando liberação de energia, pois a queima do combustível configura em uma reação exotérmica (BOLES; ÇENGEL, 2015). Como o interesse das análises são os balanços de energia que são executados via análise de diferenças de entalpias e entropias, o sinal não influenciará no desenvolvimento do estudo.

5.5.1 Análise Energética e de Desempenho para o ciclo Brayton

A Figura 21 expõe quais são os fluxos energéticos do ciclo através de um diagrama de Sankey, sendo a entrada de energia o calor absorvido através da câmara de combustão, \dot{Q}_{cc} .



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 1: $\Phi = 0,68$

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos para cada ano, para o primeiro caso estudado.

Tabela 15 – Resultados obtidos para o balanço energético por ano em kW - Caso 1:
 $\Phi = 0,68$

Ano	\dot{W}_{c1}	\dot{Q}_{tc}	\dot{W}_{c2}	\dot{Q}_{cc}	\dot{W}_t	$\dot{Q}_{perdido,gs}$	$\dot{W}_{útil}$
2018	73,98	344,40	10,82	976,90	316,8	230,8	232
2019	62,54	291,20	9,15	825,80	267,8	195,1	196,1
2020	52,98	246,70	7,75	699,60	226,9	165,3	166,2
2021	45,01	209,60	6,58	594,30	192,8	140,4	141,2
2022	38,30	178,30	5,60	505,70	164	119,5	120,1
2023	32,67	152,10	4,78	431,40	139,9	101,9	102,5
2024	27,94	130,10	4,09	369,00	119,7	87,18	87,65
2025	23,97	111,60	3,51	316,50	102,7	74,79	75,19
2026	20,63	96,05	3,02	272,40	88,35	64,36	64,7
2027	17,81	82,91	2,60	235,20	76,27	55,56	55,86
2028	15,43	71,83	2,26	203,70	66,07	48,13	48,39
2029	13,41	62,44	1,96	177,10	57,43	41,84	42,06
2030	11,70	54,48	1,71	154,50	50,11	36,5	36,7
2031	7,35	34,21	1,08	97,03	31,47	22,92	23,05
2032	6,41	29,82	0,94	84,59	27,43	19,98	20,09
2033	5,61	26,10	0,82	74,02	24,01	17,49	17,58
2034	4,92	22,93	0,72	65,02	21,09	15,36	15,44
2035	4,34	20,22	0,64	57,34	18,6	13,55	13,62
2036	3,84	17,89	0,56	50,74	16,46	11,99	12,05
2037	3,42	15,91	0,50	45,11	14,63	10,66	10,71
2038	3,05	14,18	0,45	40,23	13,05	9,504	9,555
2039	2,73	12,70	0,40	36,02	11,68	8,511	8,556
2040	2,45	11,42	0,36	32,38	10,5	7,65	7,691

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 2: $\Phi = 0,58$

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos para cada ano.

Tabela 16 – Resultados obtidos para o balanço energético por ano em kW - Caso 2:
 $\Phi = 0,58$

Ano	\dot{W}_{c1}	\dot{Q}_{tc}	\dot{W}_{c2}	\dot{Q}_{cc}	\dot{W}_t	$\dot{Q}_{perdido,gs}$	$\dot{W}_{\acute{u}til}$
2018	86,73	337,70	10,82	976,90	330,20	211,40	232,70
2019	73,32	285,50	9,15	825,80	279,10	178,70	196,70
2020	62,11	241,90	7,75	699,60	236,50	151,40	166,60
2021	52,77	205,50	6,58	594,30	200,90	128,60	141,50
2022	44,90	174,80	5,60	505,70	170,90	109,40	120,40
2023	38,30	149,10	4,78	431,40	145,80	93,33	102,70
2024	32,76	127,60	4,09	369,00	124,70	79,84	87,88
2025	28,11	109,40	3,51	316,50	107,00	68,49	75,39
2026	24,19	94,18	3,02	272,40	92,08	58,94	64,88
2027	20,88	81,30	2,60	235,20	79,49	50,88	56,01
2028	18,09	70,43	2,26	203,70	68,86	44,08	48,52
2029	15,72	61,22	1,96	177,10	59,86	38,31	42,17
2030	13,72	53,41	1,71	154,50	52,22	33,43	36,80
2031	8,62	33,55	1,08	97,03	32,80	21,00	23,11
2032	7,51	29,24	0,94	84,59	28,59	18,30	20,15
2033	6,57	25,59	0,82	74,02	25,02	16,02	17,63
2034	5,77	22,48	0,72	65,02	21,98	14,07	15,49
2035	5,09	19,82	0,64	57,34	19,38	12,41	13,66
2036	4,51	17,54	0,56	50,74	17,15	10,98	12,09
2037	4,01	15,60	0,50	45,11	15,25	9,76	10,74
2038	3,57	13,91	0,45	40,23	13,60	8,70	9,58
2039	3,20	12,45	0,40	36,02	12,18	7,79	8,58
2040	2,88	11,19	0,36	32,38	10,95	7,01	7,71

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 3: $\Phi = 0,48$

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para cada ano.

Tabela 17 – Resultados obtidos para o balanço energético por ano em kW - Caso 3:
 $\Phi = 0,48$

Ano	\dot{W}_{c_1}	\dot{Q}_{tc}	\dot{W}_{c_2}	\dot{Q}_{cc}	\dot{W}_t	$\dot{Q}_{perdido,gs}$	$\dot{W}_{útil}$
2018	86,73	337,70	10,82	976,90	330,20	211,40	232,70
2019	73,32	285,50	9,15	825,80	279,10	178,70	196,70
2020	62,11	241,90	7,75	699,60	236,50	151,40	166,60
2021	52,77	205,50	6,58	594,30	200,90	128,60	141,50
2022	44,90	174,80	5,60	505,70	170,90	109,40	120,40
2023	38,30	149,10	4,78	431,40	145,80	93,33	102,70
2024	32,76	127,60	4,09	369,00	124,70	79,84	87,88
2025	28,11	109,40	3,51	316,50	107,00	68,49	75,39
2026	24,19	94,18	3,02	272,40	92,08	58,94	64,88
2027	20,88	81,30	2,60	235,20	79,49	50,88	56,01
2028	18,09	70,43	2,26	203,70	68,86	44,08	48,52
2029	15,72	61,22	1,96	177,10	59,86	38,31	42,17
2030	13,72	53,41	1,71	154,50	52,22	33,43	36,80
2031	8,62	33,55	1,08	97,03	32,80	21,00	23,11
2032	7,51	29,24	0,94	84,59	28,59	18,30	20,15
2033	6,57	25,59	0,82	74,02	25,02	16,02	17,63
2034	5,77	22,48	0,72	65,02	21,98	14,07	15,49
2035	5,09	19,82	0,64	57,34	19,38	12,41	13,66
2036	4,51	17,54	0,56	50,74	17,15	10,98	12,09
2037	4,01	15,60	0,50	45,11	15,25	9,76	10,74
2038	3,57	13,91	0,45	40,23	13,60	8,70	9,58
2039	3,20	12,45	0,40	36,02	12,18	7,79	8,58
2040	2,88	11,19	0,36	32,38	10,95	7,01	7,71

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Analisando os três cenários simulados de queima com diferentes coeficientes de excesso de ar, observou-se que :

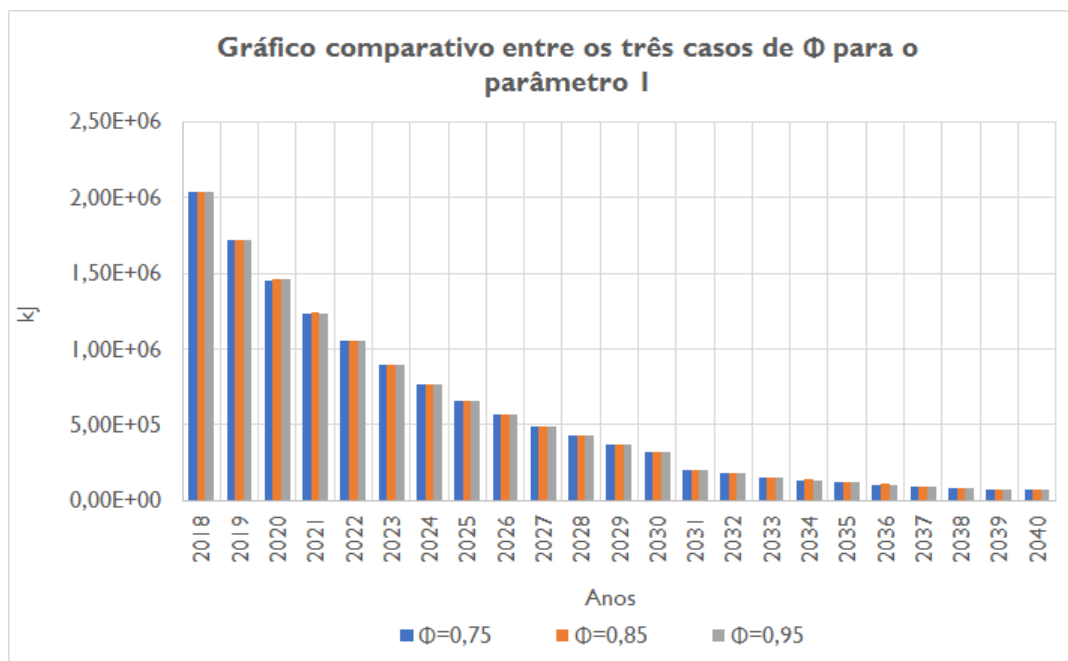
- para todos os casos, a quantidade de energia liberada pela queima do gás é a mesma, variando apenas anualmente, pois é dada em função do PCI e da vazão de

combustível;

- também para os três casos, o trabalho de compressão requerido pelo segundo compressor é o mesmo, pois intercorrem nas mesmas condições (pressão, temperatura, vazão de fluido);
- o cenário que apresenta as maiores perdas associadas aos gases de escape é aquele com menor excesso de ar, $\Phi = 0,68$. Em média suas perdas foram 17,5% e 8,42% maiores que nos casos de $\Phi=0,48$ e $\Phi=0,58$, respectivamente. Portanto, pode-se concluir que para o casos em razão de equivalência é mais próxima de 1, as perdas associadas são cada vez maiores, pois a queima do combustível ocorre em um ambiente com temperaturas mais altas de chama;
- os trabalhos de compressão solicitados pelo compressor de admissão de ar aumentou gradativamente, conforme aumentou-se o coeficiente de excesso de ar.

A análise de desempenho do ciclo foi realizada mediante a avaliação de três parâmetros, sendo o primeiro a "Energia útil mecânica", requisito utilizado somente para fins comparativos. A Figura 22, apresenta os resultados obtidos para os três casos de Φ .

Figura 22 – Gráfico comparativo entre os resultados obtidos para o parâmetro 1 para os três casos de Φ para o ciclo Brayton



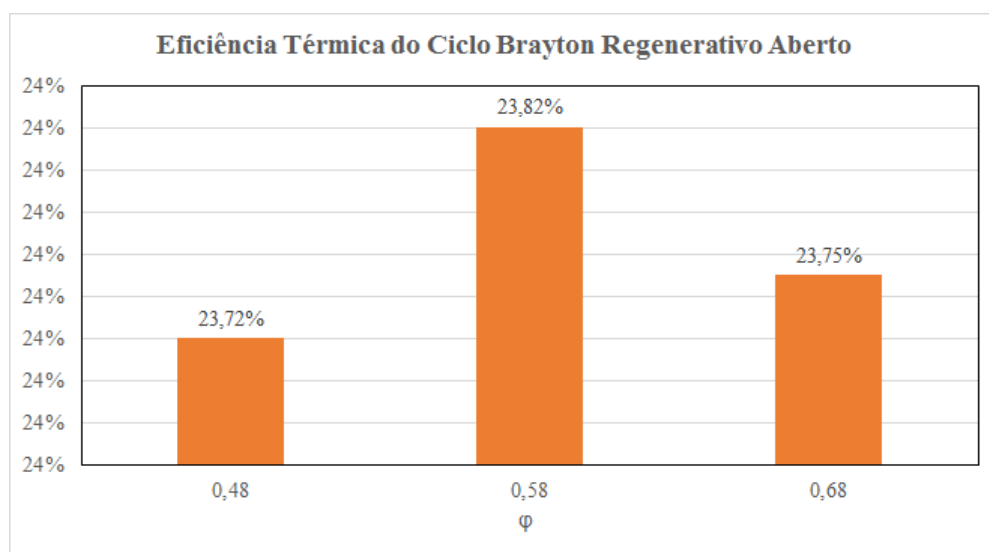
Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Ao comparar os três casos analisados, notou-se que a diferença entre os valores obtidos é quase imperceptível. Porém, ao analisar os dados de forma minuciosa, constatou-se que o caso em que a razão de equivalência é igual a 0,58, obteve em seus resultados uma pequena vantagem de 0,35% e 0,28% sob os casos no qual $\Phi = 0,48$ e $\Phi = 0,68$, respectivamente. Ao analisar o total acumulado ao longo desses 22 anos de simulação (2018 à 2040), também observou-se que o caso no qual $\Phi = 0,58$, possui maior total acumulado, sendo 0,33% e 0,26% maior que nos casos de $\Phi = 0,48$ e $\Phi = 0,68$, respectivamente.

O segundo critério avaliado irá comparar-se os resultados obtidos para a eficiência do ciclo Brayton, exibidos na Figura 23 e calculados via a Equação 57, apresentada na seção 5.3, para cada um dos casos de razão de equivalência.

Observou-se que quando o $\Phi = 0,58$, têm-se um ponto de inflexão que indica que o aumento de excesso de ar na câmara de combustão não é mais vantajoso, pois, a partir deste ponto o excesso de nitrogênio incluído na reação de combustão passa a "roubar" muito mais calor, do que o aumento que é fornecido, causado por uma combustão pobre.

Figura 23 – Comparação entre os resultados obtidos para a eficiência térmica do ciclo Brayton regenerativo

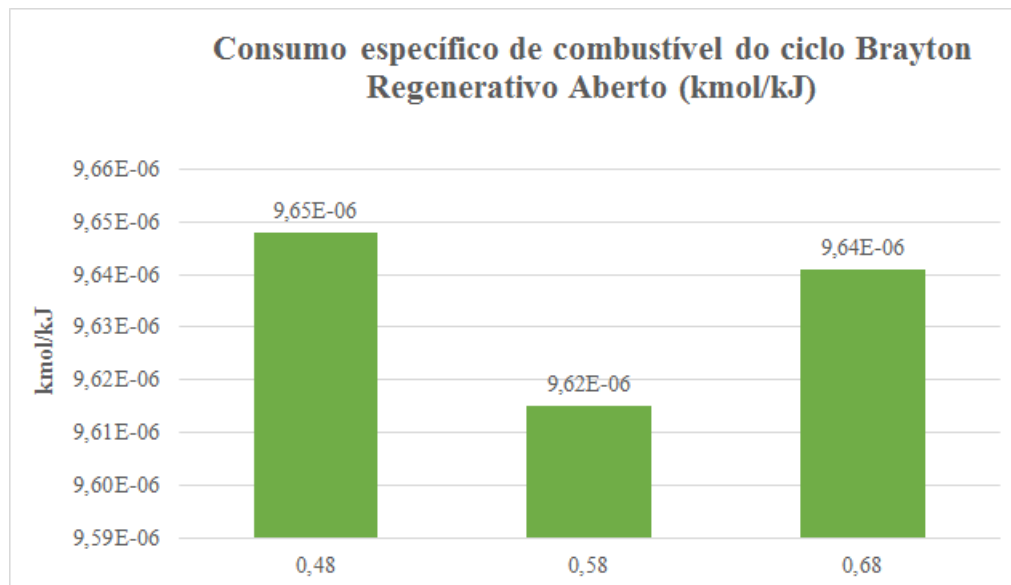


Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

O terceiro e último critério avaliado foi consumo específico de combustível, com este dado é possível visualizar o quanto de combustível é necessário para produzir 1 kJ de potência útil na saída da turbina. Uma vez que os valores obtidos para cada ano analisado foram muito próximos, optou-se por utilizar uma média para fins avaliativos.

Nos resultados obtidos por este parâmetro também é possível notar os efeitos deste ponto de inflexão citado acima. No caso em que o sistema é mais eficiente, $\Phi = 0,58$, o consumo específico de combustível é 0,34% e 0,27% menor que nos casos de $\Phi = 0,48$ e $\Phi = 0,68$, respectivamente.

Figura 24 – Comparação entre os resultados obtidos para o consumo específico de combustível



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Diante das considerações explanadas, constatou-se que o cenário mais vantajoso foi aquele com $\Phi=0,58$.

Quanto à indicação de faixa de potência para escolha de uma microturbina, analisando apenas o o cenário mais vantajoso, com $\Phi=0,58$, conclui-se que a melhor opção para a faixa de potência média ativa é de 68,45 kW. Este valor foi tomado observando o somatório dos valores calculados no parâmetro 1, no qual é possível ter uma noção do máximo de energia mecânica que pode ser extraída do eixo da microturbina, e dividindo esse valor pelo período de tempo observado em horas, chegou-se a este valor de potência média. Destaca-se que esta análise não contempla o eventual aumento de geração de gás em consequência do início da operação da terceira célula de deposição de resíduos no ano de 2017.

Realizou-se um cálculo simples com o objetivo de estimar a geração de eletricidade diária da planta, por meio da Equação 59 pode-se determinar o potencial técnico de produção de eletricidade (PTCE), dado em kWh/dia, sendo Pot a potência aparente da planta, $\cos \phi$ o fator de potência e HO a quantidade de horas que a planta estará operando.

$$PTCE = Pot.HO.\cos\phi \quad (59)$$

Tendo em vista que a potência ativa da planta está estimada em 68,45 kW e, considerando o fator de potência igual à 0,8, a potência aparente é igual à 85,53 kVa. Sendo $HO = 10$ horas diárias, concluiu-se que a quantidade de gás disponível é capaz de abastecer um sistema com potência instalada de 85,53 kVA, produzindo 596,12 kWh/dia e

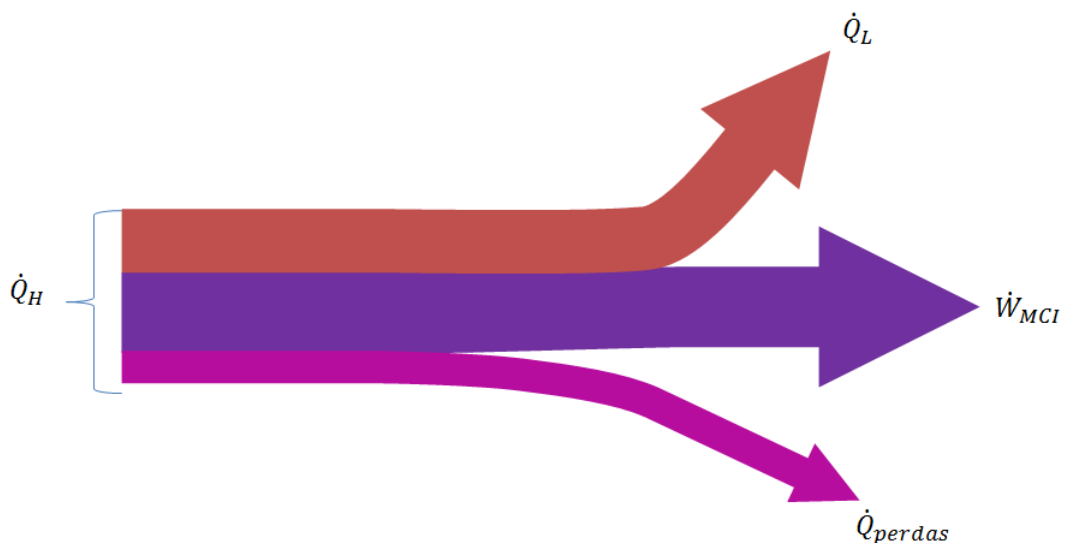
suprindo a necessidade energética de 113 residências, considerando que o consumo médio de eletricidade para a classe residencial é de 157 kWh/mês (EPE, 2018).

5.5.2 Análise Energética e de Desempenho para o ciclo Otto

Neste caso a análise foi elaborada considerando apenas uma superfície de controle, o motor de combustão interna. Os fluxos energéticos envolvidos durante o ciclo do motor são exibidos na Figura 25.

A entrada de energia é denotada por \dot{Q}_H e calculada via aplicação da Equação 54, ocorre durante o tempo três no qual há liberação de energia proveniente da combustão do gás de aterro. As saídas de energia são: \dot{Q}_L quantidade de energia rejeitada na forma de calor durante a exaustão dos gases, Equação 55, \dot{W}_{MCI} trabalho mecânico extraído, Equação 53, e \dot{Q}_{perdas} representa a parcela de energia perdida na forma de perda de calor para as vizinhas do volume de controle.

Figura 25 – Diagrama de Sankey para os fluxos energéticos no ciclo Otto



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 1: $\Phi = 0,95$

O primeiro caso analisado considera excesso de ar igual à 5,26%, a Tabela 18 apresenta os resultados obtidos para cada ano.

Tabela 18 – Resultados obtidos para o balanço energético no ciclo Otto por ano em kW -
Caso 1: $\Phi = 0,95$

Ano	\dot{Q}_H	\dot{Q}_L	\dot{Q}_{perdas}	\dot{W}_{MCI}
2018	2054,00	405,60	1145,50	502,90
2019	1737,00	342,90	969,00	425,10
2020	1471,00	290,50	820,40	360,10
2021	1250,00	246,80	697,30	305,90
2022	1063,00	210,00	592,70	260,30
2023	907,20	179,10	506,10	222,00
2024	776,00	153,20	432,90	189,90
2025	665,70	131,40	371,30	163,00
2026	572,90	113,10	319,60	140,20
2027	494,60	97,64	275,96	121,00
2028	428,40	84,59	238,91	104,90
2029	372,40	73,53	207,72	91,15
2030	324,90	64,15	181,22	79,53
2031	204,10	40,29	113,86	49,95
2032	177,90	35,12	99,24	43,54
2033	155,70	30,73	86,87	38,10
2034	136,70	27,00	76,23	33,47
2035	120,60	23,81	67,28	29,51
2036	106,70	21,07	59,51	26,12
2037	94,87	18,73	52,92	23,22
2038	84,60	16,70	47,19	20,71
2039	75,76	14,96	42,26	18,54
2040	68,10	13,44	37,99	16,67

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 2: $\Phi = 0,85$

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para cada ano, considerando excesso de ar igual à 17,65%.

Tabela 19 – Resultados obtidos para o balanço energético no ciclo Otto por ano em kW -
Caso 2: $\Phi = 0,85$

Ano	\dot{Q}_H	\dot{Q}_L	\dot{Q}_{perdas}	\dot{W}_{MCI}
2018	2304,00	393,90	1389,20	520,90
2019	1948,00	332,90	1174,80	440,30
2020	1650,00	282,10	994,90	373,00
2021	1402,00	239,60	845,50	316,90
2022	1193,00	203,90	719,40	269,70
2023	1018,00	173,90	614,10	230,00
2024	870,50	148,80	524,90	196,80
2025	746,70	127,60	450,30	168,80
2026	642,60	109,80	387,50	145,30
2027	554,70	94,81	334,49	125,40
2028	480,60	82,13	289,87	108,60
2029	417,70	71,39	251,88	94,43
2030	364,50	62,29	219,82	82,39
2031	228,90	39,12	138,04	51,74
2032	199,50	34,10	120,29	45,11
2033	174,60	29,84	105,29	39,47
2034	153,40	26,22	92,51	34,67
2035	135,30	23,12	81,60	30,58
2036	119,70	20,46	72,18	27,06
2037	106,40	18,19	64,16	24,05
2038	94,90	16,22	57,23	21,45
2039	84,98	14,52	51,25	19,21
2040	76,38	13,06	46,05	17,27

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Caso 3: $\Phi = 0,75$

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos para cada ano, considerando excesso de ar igual à 33,33%.

Tabela 20 – Resultados obtidos para o balanço energético no ciclo Otto por ano em kW -
Caso 3: $\Phi = 0,75$

Ano	\dot{Q}_H	\dot{Q}_L	\dot{Q}_{perdas}	\dot{W}_{MCI}
2018	2620,50	379,81	1698,80	541,89
2019	2215,18	321,06	1436,04	458,08
2020	1876,64	271,99	1216,57	388,07
2021	1594,32	231,08	1033,55	329,69
2022	1356,52	196,61	879,39	280,52
2023	1157,14	167,71	750,14	239,29
2024	989,86	143,47	641,70	204,69
2025	849,17	123,08	550,50	175,60
2026	730,74	105,91	473,72	151,11
2027	630,82	91,43	408,94	130,45
2028	546,47	79,20	354,26	113,01
2029	475,02	68,85	307,94	98,23
2030	414,45	60,07	268,68	85,71
2031	260,29	37,73	168,74	53,83
2032	226,91	32,89	147,10	46,92
2033	198,56	28,78	128,72	41,06
2034	174,43	25,28	113,08	36,07
2035	153,81	22,29	99,71	31,81
2036	136,12	19,73	88,24	28,15
2037	121,01	17,54	78,45	25,02
2038	107,91	15,64	69,96	22,32
2039	96,63	14,01	62,64	19,98
2040	86,86	12,59	56,31	17,96

Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Analisando os três cenários simulados de queima com diferentes coeficientes de excesso de ar para o ciclo Otto, infere-se que :

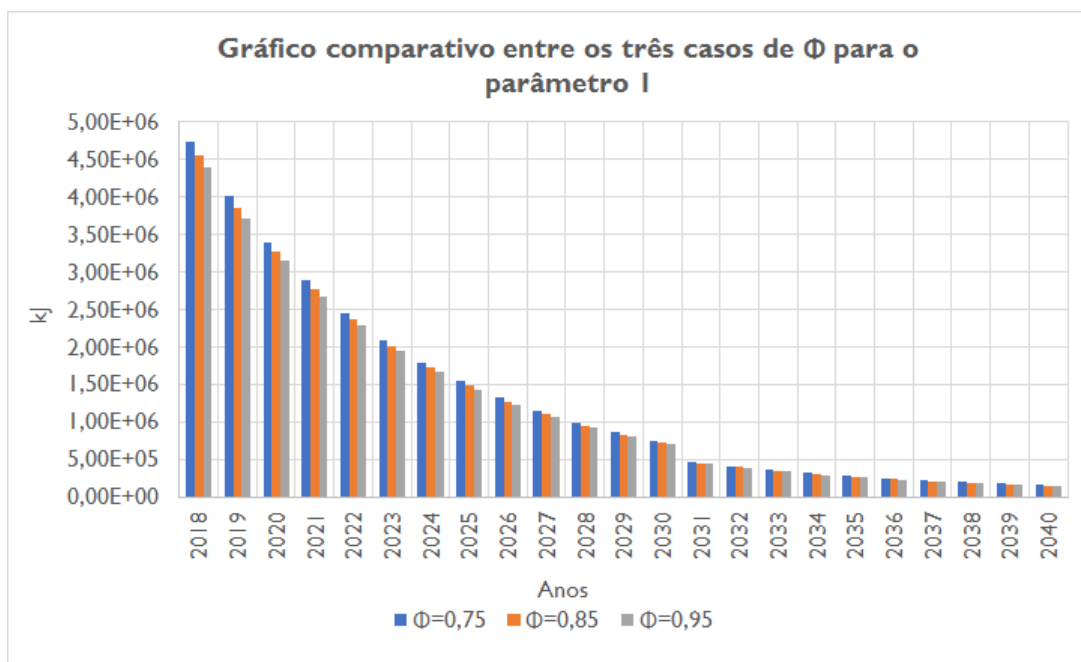
- comparando inicialmente os valores de trabalho útil para os três casos, observa-se

que o cenário com maior excesso de ar foi aquele que se destacou. Comparando os valores obtidos para a média entre os anos de 2018 a 2040, verificou-se que o trabalho extraído na simulação de queima com $\Phi=0,75$ foi 7,21% e 3,87% maior que nos casos de $\Phi=0,95$ e $\Phi=0,85$, respectivamente;

- o cenário que apresentou as menores perdas associadas aos gases de escape (\dot{Q}_L) é o terceiro caso de razão de equivalência estudado, sendo $\Phi=0,75$. Suas perdas foram 3,70% e 6,80% menores que nos casos de $\Phi=0,85$ e $\Phi=0,95$, respectivamente;
- as maiores taxas médias de calor recebido, (\dot{Q}_H) foram observados no caso de $\Phi = 0,75$, sendo as taxas de calor recebido 22,61% e 12,06% maiores que nos casos de $\Phi=0,95$ e $\Phi=0,85$, respectivamente.

A análise de desempenho deste ciclo foi avaliada seguindo os mesmos parâmetros considerados para o estudo realizado anteriormente para o ciclo Brayton. Na Figura 26 expõe-se os resultados da energia mecânica útil, em kJ, pode ser extraída do motor de combustão interna no período de um ano, lembrando que este parâmetro é somente para fins de comparação. E na Figura 27, exibem-se os resultados obtidos de eficiência térmica, calculados através da Equação 57, e na Figura 28, os resultados para o consumo específico de combustível.

Figura 26 – Gráfico comparativo entre os resultados obtidos para o parâmetro 1 para os três casos de Φ para o ciclo Otto

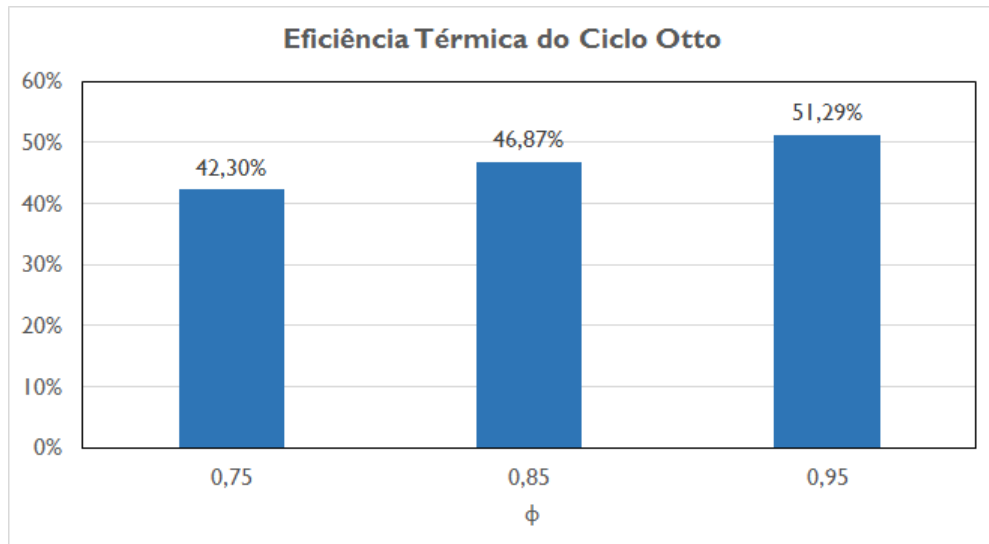


Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Realizando as mesmas observações realizados durante a análise do ciclo anterior, neste caso contactou-se que o terceiro cenário de queima com $\Phi=0,75$ foi aquele que se

destacou, porém também a partir do ano de 2030 a diferença entre os resultados tende a diminuir. Comparando o acumulado total no período analisado, o maior somatório foi correspondente ao terceiro cenário de queima.

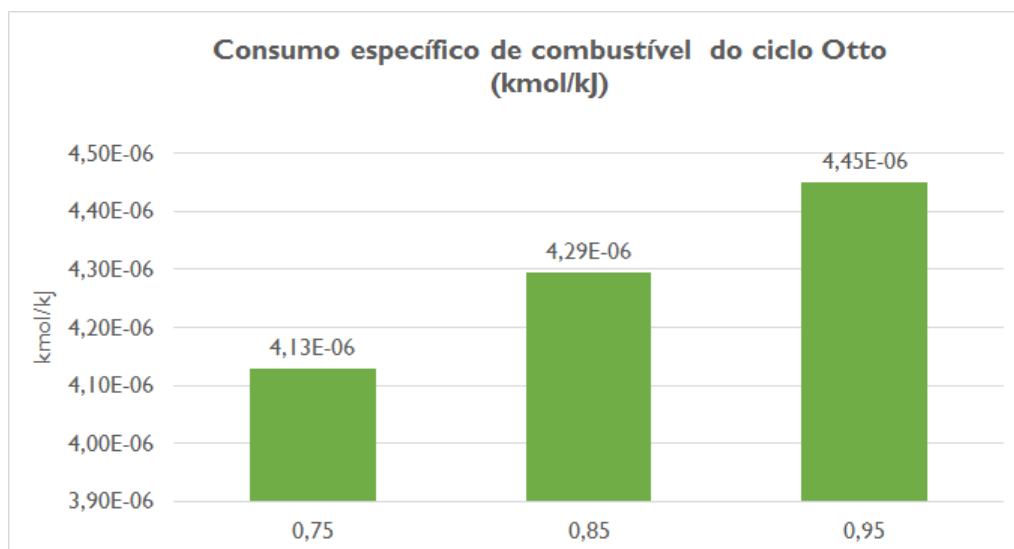
Figura 27 – Comparação entre os resultados obtidos para a eficiência térmica do ciclo Otto



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Quanto a análise da eficiência, observou-se que quanto menor Φ , uma maior quantidade de ar é injetada no MCI e, conseqüentemente diminuiu a máxima temperatura de chama, fazendo com que a eficiência térmica diminua.

Figura 28 – Comparação entre os resultados obtidos para o consumo de combustível do ciclo Otto



Fonte: Elaborado pela Autora, 2018.

Observou-se que quanto maior o valor de Φ , a combustão é mais rica em combustível, e portanto, verificou-se maior consumo de gás de aterro.

Assim como no caso do ciclo analisado anteriormente constatou-se que o cenário mais vantajoso foi aquele com $\Phi = 0,75$. A indicação para a escolha de faixa de potência instalada para este caso foi realizada também considerando vida útil da planta de 20 anos e o somatório do valores obtidos para o parâmetro 1 divididos pelo período de tempo. Sendo assim a potência ativa média indicada é de 160 kW, do mesmo modo destaca-se que um eventual aumento de gás de aterro não está contemplado nesta análise.

Uma vez estimada uma potência ativa média, foi possível através da Equação 59, calcular uma previsão de produção técnica de eletricidade diária para planta. Sendo a potência ativa da planta igual a 160 kW, considerando a quantidade de horas operando HO= 10 horas e o fator de potência igual a 0,8. Conclui-se que o sistema dimensionado é capaz de ter potência instalada igual a 200 kVa produzindo 1393,2 kWh/dia e suprimindo a necessidade energética de 266 residências, considerando que o consumo médio de eletricidade para a classe residencial é de 157 kWh/mês (EPE, 2018).

5.6 Comparação entre os ciclos dimensionados

Comparando os dois sistemas dimensionados, e utilizando a Tabela 21 como base, constatou-se que a melhor opção de tecnologia a ser aplicada é o GMG, com razão de equivalência igual a 0,75. Além disso, deve-se ponderar outro ponto positivo relativo a esta tecnologia que é um método convencional, e que já está consolidado no mercado.

Tabela 21 – Tabela comparativa entre os dois ciclos dimensionados

Parâmetro	Ciclo Otto	Ciclo Brayton Regenerativo
Eficiência Térmica	42,30%	23,82%
Consumo de combustível (kmol/kJ)	4,13E-06	9,62E-06
Potência instalada recomendada (kVa)	200	85,53
PTCE (kWh/dia)	1.393,2	596,12
Quantidade de residências supridas	266	113

Fonte: Elaborada pela Autora, 2018.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo inicial investigar as condições de produção de gás no aterro sanitário de Foz do Iguaçu, visando reconhecer taxas de geração de biogás e estudar a viabilidade de recuperação energética, aplicando o modelo de decaimento de primeira ordem (First Order Decay – FOD) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change) – IPCC 2006. O modelo ainda não foi devidamente validado com dados experimentais, portanto se entende como uma primeira aproximação da ordem de grandeza dos volumes de biogás gerado pelo aterro.

As estimativas apresentadas basearam-se a partir de dados de coleta de 2001, ano de início de operação do aterro sanitário, e realizaram-se projeções para 30 anos partir do início de operação de cada célula. Para a primeira célula, a fase de maior produção de biogás foi observada no ano de 2011, sendo correspondente a $142,18 \text{ Nm}^3/h$ e, para a segunda o pico ocorreu em 2018, com vazão média anual de $155,98 \text{ Nm}^3/h$. Analisando o somatório entre as duas células, a maior vazão ocorre no ano de 2018, sendo igual a $197,07 \text{ Nm}^3/h$, potencial suficiente para recomendar a instalação de um sistema de aproveitamento de gás.

Entre as tecnologias de conversão do potencial térmico do biogás para eletricidade, escolheu-se simular dois cenários de dimensionamento e, simular diferentes cenários de queima variando a razão de equivalência. Os sistemas dimensionados foram: uma microturbina a gás motivada principalmente pela possibilidade de maximização do poder calorífico do gás com a aplicação de um ciclo Brayton regenerativo e o de motogerador, motivado principalmente por ser uma tecnologia já estabelecida no mercado e com altos índices de eficiência.

Comparando os dois sistemas dimensionados, concluiu-se que a tecnologia que se sobressaiu nos requisitos avaliados foi o motogerador utilizando razão de equivalência igual a 0,75. Para este caso o sistema dimensionado deveria ter a potência instalada de 200 kVa, gerando diariamente 1393,2 kWh/ dia, considerando 10 horas de operação da planta e fator de potência igual à 0,8. Este potencial de geração, consegue suprir a necessidade energética de aproximadamente 266 residências, sendo que o consumo médio de eletricidade para a classe residencial é de 157 kWh/mês (EPE, 2018).

Destaca-se que a avaliação realizada neste trabalho foi de caráter teórico e baseando-se somente na análise energética, portanto não pode-se afirmar que a tecnologia indicada, o motogerador, é a melhor sem considerar aspectos econômicos e ambientais.

Recomenda-se, para trabalhos posteriores, a maior exploração dos efeitos da variação de excesso de ar nas taxas de eficiência de ambos os ciclos, para o caso do ciclo Brayton

propor a adição de *chillers* de adsorção no sistema de admissão e estudar os efeitos que o resfriamento do ar de admissão proporcionaria à eficiência e, finalmente elaborar uma análise econômica e ambiental para atestar a viabilidade da planta de conversão recomendada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, A. B. de N. T. Nbr 10004. *Resíduos Sólidos—Classificação*, 2004. Citado na página 20.
- ABNT, N. 8419: 1992 versão corrigida: 1996. *Apresentação de projetos de aterros*, 1992. Citado na página 24.
- ABRELPE. Caderno informativo recuperação energética. In: *Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*. São Paulo, Brazil: [s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- ABRELPE. Atlas brasileiro de emissões de gee e potencial energético na destinação de resíduos sólidos. *Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 34.
- ABRELPE. Resíduos sólidos: Manual de boas práticas de planejamento. In: *Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*. São Paulo, Brazil: [s.n.], 2013. Citado na página 22.
- ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no brasil. In: *Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais*. São Paulo, Brazil: [s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 16, 22 e 33.
- ABREU, F. V.; FILHO, M. A. F. C.; SOUZA, M. C. L. Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa—um estudo de viabilidade técnica e econômica. In: *IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM)*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 33.
- ALEXANDER, A.; BURKLIN, C.; SINGLETON, A. *Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide*. [S.l.]: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2005. Citado na página 28.
- AMBROSE, D.; TSONOPOULOS, C. Vapor-liquid critical properties of elements and compounds. 2. normal alkanes. *Journal of Chemical and Engineering Data*, ACS Publications, v. 40, n. 3, p. 531–546, 1995. Citado na página 51.
- BARRIONUEVO, E. C. Case 5. valorização energética em aterros sanitários. *Material apresentado durante o Fórum Sul Brasileiro de Biogás e Biometano*, 2018. Citado na página 34.
- BOLES, M.; ÇENGEL, Y. Termodinâmica. 8ª edição. *New York: Mc Graw Hill Education*, 2015. Citado 11 vezes nas páginas 36, 38, 39, 40, 51, 52, 55, 57, 58, 60 e 71.
- BORBA, S. M. P. *Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.
- BOVE, R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 47, n. 11, p. 1391–1401, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 49.

- BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Política Nacional de Resíduos Sólidos*, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 16, 21 e 22.
- BRUNETTI, F. Motores de combustão interna. *São Paulo: Blucher*, v. 2013, n. 2, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.
- CAMPANI, D. B.; SCHNEIDER, P. S.; XAVIER, F. M. Determinação do poder calorífico do biogás gerado em aterros sanitários. In: *3º Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos de AIDIS, Buenos Aires, Argentina*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 32.
- CENGEL, Y. A. *Transferência de calor e massa*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2007. Citado na página 53.
- CENTER, S. G. Basic data on biogas. *Available Online, Accessed January*, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 47.
- ELK, A. G. H. P. V. *Redução de emissões na disposição final*. [S.l.]: IBAM, 2007. Citado na página 29.
- EPE. Balanço energético nacional 2017. Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 16.
- EPE. Resenha mensal do mercado de energia elétrica. *Empresa de Pesquisa Energética, ano XI*, n. 124, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 78, 84 e 85.
- FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. Gas production during refuse decomposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, Springer, v. 2, n. 4, p. 483–495, 1973. Citado na página 27.
- FERNANDES, J. G. Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental. *Escola de engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFGM, Belo Horizonte*, 2009. Citado na página 29.
- GIVEN, P. H.; WELDON, D.; ZOELLER, J. H. Calculation of calorific values of coals from ultimate analyses: theoretical basis and geochemical implications. *Fuel*, Elsevier, v. 65, n. 6, p. 849–854, 1986. Citado na página 32.
- HOO, P. Y.; HASHIM, H.; HO, W. S. Opportunities and challenges: Landfill gas to biomethane injection into natural gas distribution grid through pipeline. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 175, p. 409–419, 2018. Citado na página 24.
- IBGE. *Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação*. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.. 22 Feb. 2018 <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 44.
- IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2006. 26 Apr. 2017 <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>>. Citado 9 vezes nas páginas 25, 28, 30, 31, 32, 44, 46, 91 e 92.
- LEME, G. R.; FERNANDES, D. M.; LOPES, C. L. Utilização da pirólise para o tratamento de resíduos no Brasil. In: *Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 8, n. 8. Citado na página 24.
- LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. d. et al. Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. *Rio de Janeiro: Interciência*, v. 2, p. 1296, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 36, 37, 38, 53 e 61.

- MACIEL, F. J. Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da muribeca/pe. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, 2003. Citado na página 25.
- MACIEL, F. J. Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 44.
- MUNDIAL, B. *Manual para a preparação de gás de aterro sanitário para projetos de energia na América Latina e Caribe*. 2009. Citado na página 29.
- NORMATIVA, N. R. 482, 17 de abril de 2012. *Estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências*, 2012. Citado na página 17.
- PERSSON, M.; JONSSON, O.; WELLINGER, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. In: *IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 33.
- PESSIN, N. et al. Composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso, município de canela - rs. In: AIDIS. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 30. [S.l.], 2006. p. 1–6. Citado na página 45.
- PMFI. Dados pmfi. *Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Foz do Iguaçu*, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 17, 63 e 64.
- PMSB. *Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Foz do Iguaçu. Módulo 4: Gerenciamento de Resíduos Sólidos*. Foz do Iguaçu, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 64.
- POHLAND, F. G. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills*. [S.l.], 1982. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- POLI, D. d. C. R. et al. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, v. 8, n. 8, p. 9–31, 2015. Citado na página 46.
- QIN, W.; EGOLFOPOULOS, F.; TSOTSIS, T. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation. *Chemical Engineering Journal*, Elsevier, v. 82, n. 1-3, p. 157–172, 2001. Citado na página 49.
- RENOU, S. et al. Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 150, n. 3, p. 468–493, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- SÁNCHEZ, C. G.; CAMPO, E. d. Tecnologia da gaseificação. *Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas–UNICAMP*. Campinas, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- SARAVANAMUTTOO, H. I. H.; ROGERS, G. F. C.; COHEN, H. *Gas turbine theory*. [S.l.]: Pearson Education, 1987. Citado na página 37.

SEMARH-AL, S. de Estado do Meio Ambiente e dos R. H. *Resíduos Sólidos Alagoas*. 2018. Disponível em: <http://www.residuossolidos.al.gov.br/>. Acesso em: junho de 2018. Citado na página 25.

SOUZA, S. N. M. *Manual de Geração de energia elétrica a partir de biogás no meio rural*. Cascavel, 2016. Citado na página 34.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. *Handbook of Solid Waste Management McGraw-Hill*. New York, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.

TILLMANN, C. A. d. C. Motores de combustão interna e seus sistemas. *Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

TURNES, S. R. *Introdução à Combustão-: Conceitos e Aplicações*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 54, 55, 56 e 59.

APÊNDICE A – TABELA COM OS PARÂMETROS RECOMENDADOS PELO IPCC 2006

Tabela 22 – Valores de MCF recomendados pelo IPCC 2006

Classificação do aterro segundo o tipo de operação	Características principais de operação	MCF
Bem operada - Anaeróbico	Compactação e nivelamento dos resíduos diariamente e além da adição de uma camada de cobertura	1
Bem operada - Semi Anaeróbico	Possuir uma dessas características que permitem a entrada de ar: material de cobertura permeável, sistema de coleta de lixiviado ou de gás ineficiente, sistema de ventilação ou bacia de regulação	0,8
Mal operada - Profunda ou com alta umidade	Um aterro é considerado profundo quando tem maior que 5 m de profundidade de resíduos aterrados e com fonte de água próximas (rios, riachos, ect.)	0,5
Mal operada - Rasa	Um aterro é considerado raso quando a profundidade de resíduos aterrados é menor que 5 m	0,4
Sem categoria	Aterro que não se enquadram em nenhuma das classes anteriores	0,6

Fonte: Adaptado de (IPCC, 2006)

Tabela 23 – Valores de k para o clima temperado úmido

Classe de resíduo	Faixa padrão	Valor utilizado
Restos Alimentares	0,1–0,2	0,185
Papel	0,05–0,07	0,06
Madeira	0,02–0,04	0,03
Têxtil	0,05–0,07	0,06
Fraldas	0,05–0,07	0,06

Fonte: Adaptado de (IPCC, 2006)

Tabela 24 – Valores de DOC_i por resíduo

Classe de resíduo	Faixa padrão	Valor utilizado
Restos Alimentares	0,08-0,20	0,15
Papel	0,36-0,45	0,4
Madeira	0,39-0,46	0,43
Têxtil	0,20-0,40	0,24
Fraldas	0,18-0,32	0,24

Fonte: Adaptado de (IPCC, 2006)

APÊNDICE B – ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR ANO

Tabela 25 – Estimativa de Geração de Biogás por ano

Ano	Geração de CH_{4gT} (Gg)			LFG (Nm^3/h)		
	Célula 1	Célula 2	Total	Célula 1	Célula 2	Total
2001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2002	0,08	0,00	0,08	6,45	0,00	6,45
2003	0,37	0,00	0,37	30,70	0,00	30,70
2004	0,61	0,00	0,61	50,25	0,00	50,25
2005	0,82	0,00	0,82	67,60	0,00	67,60
2006	1,02	0,00	1,02	83,52	0,00	83,52
2007	1,21	0,00	1,21	98,88	0,00	98,88
2008	1,36	0,00	1,36	111,06	0,00	111,06
2009	1,49	0,00	1,49	122,12	0,00	122,12
2010	1,61	0,00	1,61	131,80	0,00	131,80
2011	1,74	0,00	1,74	142,18	0,00	142,18
2012	1,46	0,36	1,82	119,91	29,34	149,25
2013	1,24	0,68	1,92	101,30	55,70	157,00
2014	1,05	1,04	2,08	85,73	84,81	170,54
2015	0,89	1,31	2,20	72,71	107,56	180,27
2016	0,75	1,54	2,30	61,80	126,45	188,25
2017	0,64	1,74	2,38	52,65	142,42	195,07
2018	0,55	1,90	2,45	44,97	155,93	200,90
2019	0,47	1,60	2,07	38,52	131,36	169,88
2020	0,40	1,35	1,76	33,09	110,84	143,93
2021	0,35	1,14	1,49	28,52	93,69	122,21
2022	0,30	0,97	1,27	24,66	79,34	104,00
2023	0,26	0,82	1,08	21,39	67,33	88,73
2024	0,23	0,70	0,93	18,63	57,27	75,90
2025	0,20	0,60	0,79	16,28	48,83	65,11
2026	0,17	0,51	0,68	14,28	41,75	56,03
2027	0,15	0,44	0,59	12,58	35,79	48,37
2028	0,14	0,38	0,51	11,12	30,78	41,90
2029	0,12	0,32	0,44	9,87	26,55	36,42

continua na próxima página

Tabela 25 – Estimativa de Geração de Biogás por ano

Ano	Geração de CH_{4gT} (Gg)			LFG (Nm^3/h)		
	Célula 1	Célula 2	Total	Célula 1	Célula 2	Total
2030	0,11	0,28	0,39	8,79	22,98	31,77
2031	0,00	0,24	0,24	0,00	19,96	19,96
2032	0,00	0,21	0,21	0,00	17,40	17,40
2033	0,00	0,19	0,19	0,00	15,22	15,22
2034	0,00	0,16	0,16	0,00	13,37	13,37
2035	0,00	0,14	0,14	0,00	11,79	11,79
2036	0,00	0,13	0,13	0,00	10,44	10,44
2037	0,00	0,11	0,11	0,00	9,28	9,28
2038	0,00	0,10	0,10	0,00	8,27	8,27
2039	0,00	0,09	0,09	0,00	7,41	7,41
2040	0,00	0,08	0,08	0,00	6,66	6,66

**APÊNDICE C – ROTINA COMPUTACIONAL
DESENVOLVIDA NO EES - CICLO BRAYTON
REGENERATIVO**

{Ciclo BRAYTON COM REGENERAÇÃO para combustão completa de GÁS DE ATERRO (GdA) de composição molar conhecida}

{GARCIA, M.F., GARCIA-ACEVEDO, L.E. VIABILIDADE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO GÁS ATERRO FOZ DO IGUAÇU, 2018}

{ENGENHARIA DE ENERGIA/Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura - CITI/ ILATIT/ Universidade Federal da Integração Latino-Americana -UNILA}

{Fração molar dos componentes considerados para o biogás - é válido dizer que a fração volumétrica é a fração molar dos componentes em uma mistura ideal (Çengel, cap 13, pag 691)}

y_ch4= 0,5
y_co2=0,42
y_o2=0,03
y_n2=0,05

Verificador_0= y_n2+y_o2+y_co2+y_ch4

"Número de mols dos componentes do biogás, considerando como base de cálculo 1 mol de combustível"

N_total=1 [mol]
N_CH4=y_ch4/N_total "Número de mols de CH4"
N_CO2=y_co2/N_total "Número de mols de CO2"
N_O2=y_o2/N_total "Número de mols de O2"
N_N2=y_n2/N_total "Número de mols de N2"

"Condições iniciais"

P[1]= 101,3 [kPa]

T[1]= 298,15 [K]

"Propriedades dos componentes nas condições de referencia"

MW_ch4=MolarMass(CH4)
MW_co2=MolarMass(CO2)
MW_o2=MolarMass(O2)
MW_n2=MolarMass(N2)
MW_h2o=MolarMass(H2O)

rho_CH4=Density(CH4;T=T[1];P=P[1])
rho_CO2=Density(CO2;T=T[1];P=P[1])
rho_O2=Density(O2;T=T[1];P=P[1])
rho_N2=Density(N2;T=T[1];P=P[1])
rho_H2O=Density(H2O;T=T[1];P=P[1])

"Cálculo da massa molar do LFG (TURNS, 2013. pa.18 eq. 2, 12a)"

MW_biogás=y_ch4*MW_ch4+y_co2*MW_co2+y_o2*MW_o2+y_n2*MW_n2

"fração volumétrica de ar"

y_o2.ar=0,21
y_n2.ar=0,79

$$MW_{ar}=y_{o2}.ar*MW_{o2}+y_{n2}.ar*MW_{n2}$$

"Massa molar do ar"

"fração mássica de ar"

$$x_{o2}.ar=y_{o2}.ar*(MW_{o2}/MW_{ar})$$

$$x_{n2}.ar=y_{n2}.ar*(MW_{n2}/MW_{ar})$$

{Densidade do ar}

$$\rho_{ar}=x_{o2}.ar*\rho_{O2}+x_{n2}.ar*\rho_{N2}$$

{Fração mássica dos componentes considerados para o biogás}

$$x_{ch4}=y_{ch4}*(MW_{ch4}/MW_{biogás})$$

$$x_{co2}=y_{co2}*(MW_{co2}/MW_{biogás})$$

$$x_{o2}=y_{o2}*(MW_{o2}/MW_{biogás})$$

$$x_{n2}=y_{n2}*(MW_{n2}/MW_{biogás})$$

$$\text{Verificador}_1 = x_{n2}+x_{o2}+x_{co2}+x_{ch4}$$

{Densidade do biogás}

$$\rho_{biogás}=y_{ch4}*\rho_{CH4}+y_{co2}*\rho_{CO2}+y_{o2}*\rho_{O2}+y_{n2}*\rho_{N2}$$

{Relação Ar/combustível - considerando base molar, ou seja, a queima de 1 mol de combustível}

$$m_{dot_{biogás}} = 0,000509671"$$

"[kmol/s]"

$$\Phi=0,68$$

"variável"

$$\lambda=1/\Phi$$

$$a = y_{ch4}*(1 + 4/4)$$

"a é calculado a partir da quantidade de átomos de C e H presentes no hidrocarboneto, é independente do número de mols do hidrocarboneto, pois é um cálculo considerando 1 mol de mistura de combustível - Turns; Brunetti"

$$FA_{est} = (1/(a*(1+3,76)))$$

$$FA = FA_{est}*\Phi$$

$$NM_{ar} = 1/(FA_{est}*\Phi)$$

$$m_{dot_{ar}} = m_{dot_{biogás}}/FA$$

$$N_{reagentes} = 1 + NM_{ar}$$

$$A_{real} = a/\Phi$$

"proporção ar/combustível"

$$y_{GdA} = N_{total}/N_{reagentes}$$

$$y_{air} = NM_{ar}/N_{reagentes}$$

{Produtos da Combustão}

"há presença de CO2 na composição do biogás, um gás não queimado, portanto pode-se considerar que ele não reage com nenhuma outra espécie"

$$x_{ch4}*CH_4 + x_{co2}*CO_2 + x_{o2}*O_2 + x_{n2}*N_2 + NM_{ar}*(O_2 + 3,76*N_2) = x_{co2}.gs*CO_2 + x_{h2}o.gs*H_2O + x_{o2}.gs*O_2 + x_{n2}.gs*N_2"$$

$$N_{CO2.gs} = y_{co2} + y_{ch4}$$

$$N_{H2O.gs} = (4 * y_{ch4}) / 2$$

$$N_{O2.gs} = (A_{real} - a)$$

$$N_{N2.gs} = (NM_{ar} / 1,26) + y_{n2}$$

$$N_{produtos} = N_{CO2.gs} + N_{H2O.gs} + N_{O2.gs} + N_{N2.gs}$$

{Fração molar de gases de combustão}

$$N_{gs} = N_{CO2.gs} + N_{H2O.gs} + N_{O2.gs} + N_{N2.gs}$$

$$y_{co2.gs} = N_{CO2.gs} / N_{gs}$$

$$y_{h2o.gs} = N_{H2O.gs} / N_{gs}$$

$$y_{o2.gs} = N_{O2.gs} / N_{gs}$$

$$y_{n2.gs} = N_{N2.gs} / N_{gs}$$

$$\text{Verificador}_2 = y_{co2.gs} + y_{h2o.gs} + y_{o2.gs} + y_{n2.gs}$$

{Fração mássica de gases de combustão}

$$MW_{gs} = y_{co2.gs} * MW_{co2} + y_{h2o.gs} * MW_{h2o} + y_{o2.gs} * MW_{o2} + y_{n2.gs} * MW_{n2}$$

$$x_{co2.gs} = y_{co2.gs} * (MW_{co2} / MW_{gs})$$

$$x_{h2o.gs} = y_{h2o.gs} * (MW_{h2o} / MW_{gs})$$

$$x_{o2.gs} = y_{o2.gs} * (MW_{o2} / MW_{gs})$$

$$x_{n2.gs} = y_{n2.gs} * (MW_{n2} / MW_{gs})$$

$$\text{Verificador}_3 = x_{co2.gs} + x_{h2o.gs} + x_{n2.gs} + x_{o2.gs}$$

$$\rho_{gs} = x_{co2.gs} * \rho_{CO2} + x_{h2o.gs} * \rho_{H2O} + x_{n2.gs} * \rho_{N2} + x_{o2.gs} * \rho_{O2}$$

$$R_{gs} = R \# / MW_{gs}$$

{Dados de entrada de vazão (em base volumétrica)}

$$m_{dot}[4] = m_{dot_biogás}$$

$$m_{dot}[1] = m_{dot_ar}$$

{Balanço de massa}

$$m_{dot}[2] = m_{dot}[1]$$

$$m_{dot}[3] = m_{dot}[2]$$

$$m_{dot}[5] = m_{dot}[4]$$

$$m_{dot}[6] = m_{dot}[3] + m_{dot}[5]$$

$$m_{dot}[7] = m_{dot}[6]$$

$$m_{dot}[8] = m_{dot}[7]$$

{Cálculo de PCI}

$$PCI = (35689,52 / \rho_{biogás}) * y_{ch4} \quad \text{"[kJ/kmol]"}$$

"Ponto 1- Entrada do compressor 1 "

$$h[1] = \text{Enthalpy}(\text{Air}; T = T[1])$$

$$s[1] = \text{Entropy}(\text{Air}; T = T[1]; P = P[1])$$

$$v[1] = \text{Volume}(\text{Air}; T = T[1]; P = P[1])$$

cp[1]=Cp(Air;T=T[1])
cv[1]=Cv(Air;T=T[1])

{Ponto 2- Saída do Compressor 1 e entrada no TC}

P[2]= 459,9 [kPa]
R_12= P[2]/P[1]
k=cp[1]/cv[1]
T[2]=T[1]*(R_12^((k-1)/k))

h[2]=Enthalpy(Air;T=T[2])
s[2]=Entropy(Air;T=T[2];P=P[2])
v[2]=Volume(Air;T=T[2];P=P[2])
cp[2]=Cp(Air;T=T[2])
cv[2]=Cv(Air;T=T[2])

{TROCADOR DE CALOR}

"Ponto 7 é entrada do fluido quente e no ponto 8 sua saída, a entrada de fluido frio é no ponto 2 e saída é o ponto 3"

"Irá se verificar a quantidade máxima de calor que poderá ser transferido no TC"

T_qEnt=T[7]
Tf_Ent=T[2]
C_min=m_dot[2]*cp[2]
Q_max=C_min*(T_qEnt-Tf_Ent)

"considerando a efetividade do TC como 0,9 (Lora e Nascimento,2004), irá calcular-se o calor real transferido no trocador"

Epsilon_tc=0,9
Q_real_tc=Q_max*Epsilon_tc

{Ponto 3 - Saída do TC e entrada de ar na câmara de combustão}

P[3]=P[2]

T[3]= (Q_real_tc/(m_dot[2]*cp[2]))+T[2]

h[3]=Enthalpy(Air;T=T[3])
s[3]=Entropy(Air;T=T[3];P=P[3])
v[3]=Volume(Air;T=T[3];P=P[3])
cp[3]=Cp(Air;T=T[3])
cv[3]=Cv(Air;T=T[3])

{Ponto 4- Entrada do biogás do compressor 2 }

P[4]=101,3 [kPa]

T[4]=298,15[K]

h_CH4[4]=Enthalpy(CH4;T=T[4])
s_CH4[4]=Entropy(CH4;T=T[4];P=P[4])
v_CH4[4]=Volume(CH4;T=T[4];P=P[4])
cp_CH4[4]=Cp(CH4;T=T[4])
cv_CH4[4]=Cv(CH4;T=T[4])

$h_{CO2[4]} = \text{Enthalpy}(\text{CO2}; T=T[4])$
 $s_{CO2[4]} = \text{Entropy}(\text{CO2}; T=T[4]; P=P[4])$
 $v_{CO2[4]} = \text{Volume}(\text{CO2}; T=T[4]; P=P[4])$
 $cp_{CO2[4]} = \text{Cp}(\text{CO2}; T=T[4])$
 $cv_{CO2[4]} = \text{Cv}(\text{CO2}; T=T[4])$

$h_{O2[4]} = \text{Enthalpy}(\text{O2}; T=T[4])$
 $s_{O2[4]} = \text{Entropy}(\text{O2}; T=T[4]; P=P[4])$
 $v_{O2[4]} = \text{Volume}(\text{O2}; T=T[4]; P=P[4])$
 $cp_{O2[4]} = \text{Cp}(\text{O2}; T=T[4])$
 $cv_{O2[4]} = \text{Cv}(\text{O2}; T=T[4])$

$h_{N2[4]} = \text{Enthalpy}(\text{N2}; T=T[4])$
 $s_{N2[4]} = \text{Entropy}(\text{N2}; T=T[4]; P=P[4])$
 $v_{N2[4]} = \text{Volume}(\text{N2}; T=T[4]; P=P[4])$
 $cp_{N2[4]} = \text{Cp}(\text{N2}; T=T[4])$
 $cv_{N2[4]} = \text{Cv}(\text{N2}; T=T[4])$

$h[4] = y_{ch4} * h_{CH4[4]} + y_{co2} * h_{CO2[4]} + y_{o2} * h_{O2[4]} + y_{n2} * h_{N2[4]}$
 $s[4] = y_{ch4} * s_{CH4[4]} + y_{co2} * s_{CO2[4]} + y_{o2} * s_{O2[4]} + y_{n2} * s_{N2[4]}$
 $v[4] = y_{ch4} * v_{CH4[4]} + y_{co2} * v_{CO2[4]} + y_{o2} * v_{O2[4]} + y_{n2} * v_{N2[4]}$
 $cp[4] = y_{ch4} * cp_{CH4[4]} + y_{co2} * cp_{CO2[4]} + y_{o2} * cp_{O2[4]} + y_{n2} * cp_{N2[4]}$
 $cv[4] = y_{ch4} * cv_{CH4[4]} + y_{co2} * cv_{CO2[4]} + y_{o2} * cv_{O2[4]} + y_{n2} * cv_{N2[4]}$

{Ponto 5 -Saída do biogás do compressor 2 entrada na câmara de combustão}

$P[5] = 459,9 \text{ [kPa]}$
 $R_{45} = P[5]/P[4]$
 $k[4] = cp[4]/cv[4]$
 $T[5] = T[4] * (R_{45}^{((k[4]-1)/k[4])})$ "compressão isentropica"

$h_{CH4[5]} = \text{Enthalpy}(\text{CH4}; T=T[5])$
 $s_{CH4[5]} = \text{Entropy}(\text{CH4}; T=T[5]; P=P[5])$
 $v_{CH4[5]} = \text{Volume}(\text{CH4}; T=T[5]; P=P[5])$
 $cp_{CH4[5]} = \text{Cp}(\text{CH4}; T=T[5])$
 $cv_{CH4[5]} = \text{Cv}(\text{CH4}; T=T[5])$

$h_{CO2[5]} = \text{Enthalpy}(\text{CO2}; T=T[5])$
 $s_{CO2[5]} = \text{Entropy}(\text{CO2}; T=T[5]; P=P[5])$
 $v_{CO2[5]} = \text{Volume}(\text{CO2}; T=T[5]; P=P[5])$
 $cp_{CO2[5]} = \text{Cp}(\text{CO2}; T=T[5])$
 $cv_{CO2[5]} = \text{Cv}(\text{CO2}; T=T[5])$

$h_{O2[5]} = \text{Enthalpy}(\text{O2}; T=T[5])$
 $s_{O2[5]} = \text{Entropy}(\text{O2}; T=T[5]; P=P[5])$
 $v_{O2[5]} = \text{Volume}(\text{O2}; T=T[5]; P=P[5])$
 $cp_{O2[5]} = \text{Cp}(\text{O2}; T=T[5])$
 $cv_{O2[5]} = \text{Cv}(\text{O2}; T=T[5])$

$h_{N2[5]} = \text{Enthalpy}(\text{N2}; T=T[5])$
 $s_{N2[5]} = \text{Entropy}(\text{N2}; T=T[5]; P=P[5])$
 $v_{N2[5]} = \text{Volume}(\text{N2}; T=T[5]; P=P[5])$
 $cp_{N2[5]} = \text{Cp}(\text{N2}; T=T[5])$
 $cv_{N2[5]} = \text{Cv}(\text{N2}; T=T[5])$

$h[5]=y_{ch4} \cdot h_{CH4}[5]+y_{co2} \cdot h_{CO2}[5]+y_{o2} \cdot h_{O2}[5]+y_{n2} \cdot h_{N2}[5]$
 $s[5]=y_{ch4} \cdot s_{CH4}[5]+y_{co2} \cdot s_{CO2}[5]+y_{o2} \cdot s_{O2}[5]+y_{n2} \cdot s_{N2}[5]$
 $v[5]=y_{ch4} \cdot v_{CH4}[5]+y_{co2} \cdot v_{CO2}[5]+y_{o2} \cdot v_{O2}[5]+y_{n2} \cdot v_{N2}[5]$
 $cp[5]=y_{ch4} \cdot cp_{CH4}[5]+y_{co2} \cdot cp_{CO2}[5]+y_{o2} \cdot cp_{O2}[5]+y_{n2} \cdot cp_{N2}[5]$
 $cv[5]=y_{ch4} \cdot cv_{CH4}[5]+y_{co2} \cdot cv_{CO2}[5]+y_{o2} \cdot cv_{O2}[5]+y_{n2} \cdot cv_{N2}[5]$

{Ponto 6 - Saída da câmara de combustão e entrada dos gases de combustão na Turbina}

$P[6]=P[5]$ {recebimento de calor isobárico}

{A temperatura no ponto 6, será calculada via hipótese da temperatura de chama adiabática
 (Turns,2013, p.34)}
 {H_reag=H_prod}

$\{H_{reag}=(N_{CH4}/1000) \cdot Enthalpy(CH4;T=298)+(N_{CO2}/1000) \cdot Enthalpy(CO2;T=298)+((N_{O2}+NM_{ar})/1000) \cdot Enthalpy(O2;T=298)+((N_{N2}+(NM_{ar} \cdot 3,76))/1000) \cdot Enthalpy(N2;T=298)$

$H_{prod}=(N_{CO2.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(CO2;T=298)+Cp(CO2;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))+$
 $(N_{H2O.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(H2O;T=298)+Cp(H2O;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))+$
 $(N_{O2.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(O2;T=298)+Cp(O2;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))+$
 $(N_{N2.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(N2;T=298)+Cp(N2;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))$

$(N_{CH4}/1000) \cdot Enthalpy(CH4;T=298)+(N_{CO2}/1000) \cdot Enthalpy(CO2;T=298)+((N_{O2}+NM_{ar})/1000) \cdot Enthalpy(O2;T=298)+$
 $((N_{N2}+(NM_{ar} \cdot 3,76))/1000) \cdot Enthalpy(N2;T=298)=(N_{CO2.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(CO2;T=298)+Cp(CO2;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))+$
 $(N_{H2O.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(H2O;T=298)+Cp(H2O;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))+$
 $(N_{O2.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(O2;T=298)+Cp(O2;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))+$
 $(N_{N2.gs}/1000) \cdot (Enthalpy(N2;T=298)+Cp(N2;T=(298+T)/2) \cdot (T-298))$

$T[6]=T$

$h_{CO2}[6]=Enthalpy(CO2;T=T[6])$
 $s_{CO2}[6]=Entropy(CO2;T=T[6];P=P[6])$
 $v_{CO2}[6]=Volume(CO2;T=T[6];P=P[6])$
 $cp_{CO2}[6]=Cp(CO2;T=T[6])$
 $cv_{CO2}[6]=Cv(CO2;T=T[6])$

$h_{H2O}[6]=Enthalpy(H2O;T=T[6])$
 $s_{H2O}[6]=Entropy(H2O;T=T[6];P=P[6])$
 $v_{H2O}[6]=Volume(H2O;T=T[6];P=P[6])$
 $cp_{H2O}[6]=Cp(H2O;T=T[6])$
 $cv_{H2O}[6]=Cv(H2O;T=T[6])$

$h_{O2}[6]=Enthalpy(O2;T=T[6])$
 $S_{O2}[6]=Entropy(O2;T=T[6];P=P[6])$
 $v_{O2}[6]=Volume(O2;T=T[6];P=P[6])$
 $cp_{O2}[6]=Cp(O2;T=T[6])$
 $cv_{O2}[6]=Cv(O2;T=T[6])$

$h_{N2}[6]=Enthalpy(N2;T=T[6])$
 $S_{N2}[6]=Entropy(N2;T=T[6];P=P[6])$
 $v_{N2}[6]=Volume(N2;T=T[6];P=P[6])$
 $cp_{N2}[6]=Cp(N2;T=T[6])$
 $cv_{N2}[6]=Cv(N2;T=T[6])$

$h[6]=y_{co2}.gs*h_{CO2[6]}+y_{h2o}.gs*h_{H2O[6]}+y_{n2}.gs*h_{N2[6]}+y_{o2}.gs*h_{O2[6]}$
 $s[6]=y_{co2}.gs*s_{CO2[6]}+y_{h2o}.gs*s_{H2O[6]}+y_{n2}.gs*s_{N2[6]}+y_{o2}.gs*s_{O2[6]}$
 $v[6]=y_{co2}.gs*v_{CO2[6]}+y_{h2o}.gs*v_{H2O[6]}+y_{n2}.gs*v_{N2[6]}+y_{o2}.gs*v_{O2[6]}$
 $cp[6]=y_{co2}.gs*cp_{CO2[6]}+y_{h2o}.gs*cp_{H2O[6]}+y_{n2}.gs*cp_{N2[6]}+y_{o2}.gs*cp_{O2[6]}$
 $cv[6]=y_{co2}.gs*cv_{CO2[6]}+y_{h2o}.gs*cv_{H2O[6]}+y_{n2}.gs*cv_{N2[6]}+y_{o2}.gs*cv_{O2[6]}$

{Ponto 7 - Saída da microturbina e entrada dos gases de combustão no TC}

"Expansão isentrópica"

{s[6]=s[7]}

$P[7]=P[1]$

$k[6]=cp[6]/cv[6]$
 $T7/T[6]=(P[7]/P[6])^{((k[6]-1)/k[6])}$

$T[7]=T7$

$h_{CO2[7]}=Enthalpy(CO2;T=T[7])$
 $s_{CO2[7]}=Entropy(CO2;T=T[7];P=P[7])$
 $v_{CO2[7]}=Volume(CO2;T=T[7];P=P[7])$
 $cp_{CO2[7]}=Cp(CO2;T=T[7])$
 $cv_{CO2[7]}=Cv(CO2;T=T[7])$

$h_{H2O[7]}=Enthalpy(H2O;T=T[7])$
 $s_{H2O[7]}=Entropy(H2O;T=T[7];P=P[7])$
 $v_{H2O[7]}=Volume(H2O;T=T[7];P=P[7])$
 $cp_{H2O[7]}=Cp(H2O;T=T[7])$
 $cv_{H2O[7]}=Cv(H2O;T=T[7])$

$h_{O2[7]}=Enthalpy(O2;T=T[7])$
 $s_{O2[7]}=Entropy(O2;T=T[7];P=P[7])$
 $v_{O2[7]}=Volume(O2;T=T[7];P=P[7])$
 $cp_{O2[7]}=Cp(O2;T=T[7])$
 $cv_{O2[7]}=Cv(O2;T=T[7])$

$h_{N2[7]}=Enthalpy(N2;T=T[7])$
 $s_{N2[7]}=Entropy(N2;T=T[7];P=P[7])$
 $v_{N2[7]}=Volume(N2;T=T[7];P=P[7])$
 $cp_{N2[7]}=Cp(N2;T=T[7])$
 $cv_{N2[7]}=Cv(N2;T=T[7])$

$h[7]=y_{co2}.gs*h_{CO2[7]}+y_{h2o}.gs*h_{H2O[7]}+y_{n2}.gs*h_{N2[7]}+y_{o2}.gs*h_{O2[7]}$
 $s[7]=y_{co2}.gs*s_{CO2[7]}+y_{h2o}.gs*s_{H2O[7]}+y_{n2}.gs*s_{N2[7]}+y_{o2}.gs*s_{O2[7]}$
 $v[7]=y_{co2}.gs*v_{CO2[7]}+y_{h2o}.gs*v_{H2O[7]}+y_{n2}.gs*v_{N2[7]}+y_{o2}.gs*v_{O2[7]}$
 $cp[7]=y_{co2}.gs*cp_{CO2[7]}+y_{h2o}.gs*cp_{H2O[7]}+y_{n2}.gs*cp_{N2[7]}+y_{o2}.gs*cp_{O2[7]}$
 $cv[7]=y_{co2}.gs*cv_{CO2[7]}+y_{h2o}.gs*cv_{H2O[7]}+y_{n2}.gs*cv_{N2[7]}+y_{o2}.gs*cv_{O2[7]}$

{Ponto 8 - Saída dos gases de combustão no TC}

$P[8]=P[7]$

$-T[8]= (Q_{real_tc}/(m_{dot}[7]*cp[7]))-T[7]$

$h_{CO2[8]} = \text{Enthalpy}(\text{CO2}; T=T[8])$
 $s_{CO2[8]} = \text{Entropy}(\text{CO2}; T=T[8]; P=P[8])$
 $v_{CO2[8]} = \text{Volume}(\text{CO2}; T=T[8]; P=P[8])$

$h_{H2O[8]} = \text{Enthalpy}(\text{H2O}; T=T[8])$
 $s_{H2O[8]} = \text{Entropy}(\text{H2O}; T=T[8]; P=P[8])$
 $v_{H2O[8]} = \text{Volume}(\text{H2O}; T=T[8]; P=P[8])$

$h_{O2[8]} = \text{Enthalpy}(\text{O2}; T=T[8])$
 $s_{O2[8]} = \text{Entropy}(\text{O2}; T=T[8]; P=P[8])$
 $v_{O2[8]} = \text{Volume}(\text{O2}; T=T[8]; P=P[8])$

$h_{N2[8]} = \text{Enthalpy}(\text{N2}; T=T[8])$
 $s_{N2[8]} = \text{Entropy}(\text{N2}; T=T[8]; P=P[8])$
 $v_{N2[8]} = \text{Volume}(\text{N2}; T=T[8]; P=P[8])$

$h[8] = y_{co2}.gs * h_{CO2[8]} + y_{h2o}.gs * h_{H2O[8]} + y_{n2}.gs * h_{N2[8]} + y_{o2}.gs * h_{O2[8]}$
 $s[8] = y_{co2}.gs * s_{CO2[8]} + y_{h2o}.gs * s_{H2O[8]} + y_{n2}.gs * s_{N2[8]} + y_{o2}.gs * s_{O2[8]}$
 $v[8] = y_{co2}.gs * v_{CO2[8]} + y_{h2o}.gs * v_{H2O[8]} + y_{n2}.gs * v_{N2[8]} + y_{o2}.gs * v_{O2[8]}$

{Balanço de Energia}

{Balanço de Energia no Compressor 1}

$$W_{c1} = m_{dot}[1] * (h[2] - h[1])$$

{Balanço de Energia no Compressor 2}

$$W_{c2} = m_{dot}[4] * (h[5] - h[4])$$

{Balanço de Energia no Trocador de Calor}

$$Q_{entTC} = m_{dot}[2] * (h[3] - h[2]) \quad \text{{calor regenerado}}$$

{Balanço de Energia na Câmara de Combustão}

$$Q_{entCC} = m_{dot}[4] * PCI$$

{Balanço de Energia na Turbina}

$$W_{turbina} = m_{dot}[6] * (h[6] - h[7])$$

$$W_{util} = W_{turbina} - W_{c1} - W_{c2}$$

$$Q_{perdido_gs} = Q_{entCC} - W_{turbina} - W_{c2} - W_{c1} - Q_{entTC}$$

{-----Cálculos adicionais de desempenho-----}

$$SFC = m_{dot_biogás} / W_{util} \quad \text{{Consumo específico de combustível}}$$

$$\text{Eta}_{th} = W_{util} / Q_{entCC}$$

**APÊNDICE D – ROTINA COMPUTACIONAL
DESENVOLVIDA NO EES - CICLO OTTO**

{Ciclo OTTO para combustão completa de GÁS DE ATERRO (GdA) de composição molar conhecida}

{GARCIA, M.F., GARCIA-ACEVEDO, L.E. VIABILIDADE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO GÁS ATERRO FOZ DO IGUAÇU, 2018}

{ENGENHARIA DE ENERGIA/Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura - CITI/ILATIT/ Universidade Federal da Integração Latino-Americana -UNILA}

{Fração molar dos componentes considerados para o biogás - é válido dizer que a fração volumétrica é a fração molar dos componentes em uma mistura ideal (Çengel, cap 13, pag 691)}

y_ch4= 0,5
y_co2=0,42
y_o2=0,03
y_n2=0,05

Verificador_0= y_n2+y_o2+y_co2+y_ch4

"Número de mols dos componentes do biogás, considerando como base de cálculo 1 mol de combustível"

N_total=1 [mol]
N_CH4=y_ch4/N_total "Número de mols de CH4"
N_CO2=y_co2/N_total "Número de mols de CO2"
N_O2=y_o2/N_total "Número de mols de O2"
N_N2=y_n2/N_total "Número de mols de N2"

"Condições iniciais"

P[1]= 101,3 [kPa]

T[1]= 298,15 [K]

"Propriedades dos componentes nas condições de referencia"

MW_ch4=MolarMass(CH4)
MW_co2=MolarMass(CO2)
MW_o2=MolarMass(O2)
MW_n2=MolarMass(N2)
MW_h2o=MolarMass(H2O)

rho_CH4=Density(CH4;T=T[1];P=P[1])
rho_CO2=Density(CO2;T=T[1];P=P[1])
rho_O2=Density(O2;T=T[1];P=P[1])
rho_N2=Density(N2;T=T[1];P=P[1])
rho_H2O=Density(H2O;T=T[1];P=P[1])

"Cálculo da massa molar do LFG (TURNS, 2013. pa.18 eq. 2,12a)"

MW_biogás=y_ch4*MW_ch4+y_co2*MW_co2+y_o2*MW_o2+y_n2*MW_n2

"fração volumétrica de ar"

y_o2.ar=0,21
y_n2.ar=0,79

MW_ar=y_o2.ar*MW_o2+y_n2.ar*MW_n2 "Massa molar do ar"

"fração mássica de ar"

$$x_{o2.ar} = y_{o2.ar} * (MW_{o2} / MW_{ar})$$

$$x_{n2.ar} = y_{o2.ar} * (MW_{n2} / MW_{ar})$$

{Densidade do ar}

$$\rho_{ar} = x_{o2.ar} * \rho_{O2} + x_{n2.ar} * \rho_{N2}$$

{Fração mássica dos componentes considerados para o biogás}

$$x_{ch4} = y_{ch4} * (MW_{ch4} / MW_{biogás})$$

$$x_{co2} = y_{co2} * (MW_{co2} / MW_{biogás})$$

$$x_{o2} = y_{o2} * (MW_{o2} / MW_{biogás})$$

$$x_{n2} = y_{n2} * (MW_{n2} / MW_{biogás})$$

$$\text{Verificador}_1 = x_{n2} + x_{o2} + x_{co2} + x_{ch4}$$

{Densidade do biogás}

$$\rho_{biogás} = y_{ch4} * \rho_{CH4} + y_{co2} * \rho_{CO2} + y_{o2} * \rho_{O2} + y_{n2} * \rho_{N2}$$

{Relação Ar/combustível - considerando base molar, ou seja, a queima de 1 mol de combustível}

$$m_{dot_biogás} = 0,000509671"$$

"[kmol/s]"

$$\Phi = 0,95$$

"variável"

$$\Lambda = 1/\Phi$$

$$a = y_{ch4} * (1 + 4/4)$$

"a é calculado a partir da quantidade de átomos de C e H presentes no hidrocarboneto, é independente do número de mols do hidrocarboneto, pois é um cálculo considerando 1 mol de mistura de combustível - Turns; Brunetti"

$$FA_{est} = (1 / (a * (1 + 3,76)))$$

$$FA = FA_{est} * \Phi$$

$$NM_{ar} = 1 / (FA_{est} * \Phi)$$

$$m_{dot_ar} = m_{dot_biogás} / FA$$

$$N_{reagentes} = 1 + NM_{ar}$$

$$A_{real} = a / \Phi$$

"proporção ar/combustível"

$$y_{GdA} = N_{total} / N_{reagentes}$$

$$y_{air} = NM_{ar} / N_{reagentes}$$

{Produtos da Combustão}

"há presença de CO2 na composição do biogás, um gás não queimado, portanto pode-se considerar que ele não reage com nenhuma outra espécie"

$$x_{ch4} * CH_4 + x_{co2} * CO_2 + x_{o2} * O_2 + x_{n2} * N_2 + NM_{ar} * (O_2 + 3,76 * N_2) = x_{co2.gs} * CO_2 + x_{h2o.gs} * H_2O + x_{o2.gs} * O_2 + x_{n2.gs} * N_2"$$

$$N_{CO2.gs} = y_{co2} + y_{ch4}$$

$$N_{H2O.gs} = (4 * y_{ch4}) / 2$$

$$N_{O2.gs} = (A_{real} - a)$$

$$N_{N2.gs} = (NM_{ar}/1,26) + y_{n2}$$

$$N_{produtos} = N_{CO2.gs} + N_{H2O.gs} + N_{O2.gs} + N_{N2.gs}$$

{Fração molar de gases de combustão}

$$N_{gs} = N_{CO2.gs} + N_{H2O.gs} + N_{O2.gs} + N_{N2.gs}$$

$$y_{co2.gs} = N_{CO2.gs}/N_{gs}$$

$$y_{h2o.gs} = N_{H2O.gs}/N_{gs}$$

$$y_{o2.gs} = N_{O2.gs}/N_{gs}$$

$$y_{n2.gs} = N_{N2.gs}/N_{gs}$$

$$\text{Verificador}_2 = y_{co2.gs} + y_{h2o.gs} + y_{o2.gs} + y_{n2.gs}$$

{Fração mássica de gases de combustão}

$$MW_{gs} = y_{co2.gs} * MW_{co2} + y_{h2o.gs} * MW_{h2o} + y_{o2.gs} * MW_{o2} + y_{n2.gs} * MW_{n2}$$

$$x_{co2.gs} = y_{co2.gs} * (MW_{co2}/MW_{gs})$$

$$x_{h2o.gs} = y_{h2o.gs} * (MW_{h2o}/MW_{gs})$$

$$x_{o2.gs} = y_{o2.gs} * (MW_{o2}/MW_{gs})$$

$$x_{n2.gs} = y_{n2.gs} * (MW_{n2}/MW_{gs})$$

$$\text{Verificador}_3 = x_{co2.gs} + x_{h2o.gs} + x_{n2.gs} + x_{o2.gs}$$

$$\rho_{gs} = x_{co2.gs} * \rho_{CO2} + x_{h2o.gs} * \rho_{H2O} + x_{n2.gs} * \rho_{N2} + x_{o2.gs} * \rho_{O2}$$

$$R_{gs} = R\#/MW_{gs}$$

{Cálculo de PCI}

$$PCI = 890533,2 * y_{ch4} \text{ " [kJ/kmol]"}$$

"Ponto 1"

"Primeiro tempo, ocorre a admissão da mistura ar/combustível com o pistão em movimento descendente - Entrada do MCI "

$$m_{dot}[1] = m_{dot}_{biogás} + m_{dot}_{ar}$$

"Propriedades do ar de admissão"

$$h_{air}[1] = \text{Enthalpy}(\text{Air}; T=T[1])$$

$$s_{air}[1] = \text{Entropy}(\text{Air}; T=T[1]; P=P[1])$$

$$u_{air}[1] = \text{IntEnergy}(\text{Air}; T=T[1])$$

$$v_{air}[1] = \text{Volume}(\text{Air}; T=T[1]; P=P[1])$$

$$cp_{air}[1] = Cp(\text{Air}; T=T[1])$$

$$cv_{air}[1] = Cv(\text{Air}; T=T[1])$$

"Propriedades do gás de aterro"

$$h_{CH4}[1] = \text{Enthalpy}(\text{CH4}; T=T[1])$$

$$s_{CH4}[1] = \text{Entropy}(\text{CH4}; T=T[1]; P=P[1])$$

$$u_{CH4}[1] = \text{IntEnergy}(\text{CH4}; T=T[1])$$

$$v_{CH4}[1] = \text{Volume}(\text{CH4}; T=T[1]; P=P[1])$$

$$cp_{CH4}[1] = Cp(\text{CH4}; T=T[1])$$

$$cv_{CH4}[1] = Cv(\text{CH4}; T=T[1])$$

$$h_{CO2}[1] = \text{Enthalpy}(\text{CO2}; T=T[1])$$

$$s_{CO2}[1] = \text{Entropy}(\text{CO2}; T=T[1]; P=P[1])$$

$$u_{CO2}[1] = \text{IntEnergy}(\text{CO2}; T=T[1])$$

v_CO2[1]=Volume(CO2;T=T[1];P=P[1])
cp_CO2[1]=Cp(CO2;T=T[1])
cv_CO2[1]=Cv(CO2;T=T[1])

h_O2[1]=Enthalpy(O2;T=T[1])
s_O2[1]=Entropy(O2;T=T[1];P=P[1])
u_O2[1]=IntEnergy(O2;T=T[1])
v_O2[1]=Volume(O2;T=T[1];P=P[1])
cp_O2[1]=Cp(O2;T=T[1])
cv_O2[1]=Cv(O2;T=T[1])

h_N2[1]=Enthalpy(N2;T=T[1])
s_N2[1]=Entropy(N2;T=T[1];P=P[1])
u_N2[1]=IntEnergy(N2;T=T[1])
v_N2[1]=Volume(N2;T=T[1];P=P[1])
cp_N2[1]=Cp(N2;T=T[1])
cv_N2[1]=Cv(N2;T=T[1])

h_GdA[1]=y_ch4*h_CH4[1]+y_co2*h_CO2[1]+y_o2*h_O2[1]+y_n2*h_N2[1]
s_GdA[1]=y_ch4*s_CH4[1]+y_co2*s_CO2[1]+y_o2*s_O2[1]+y_n2*s_N2[1]
u_GdA[1]=y_ch4*u_CH4[1]+y_co2*u_CO2[1]+y_o2*u_O2[1]+y_n2*u_N2[1]
v_GdA[1]=y_ch4*v_CH4[1]+y_co2*v_CO2[1]+y_o2*v_O2[1]+y_n2*v_N2[1]
cp_GdA[1]=y_ch4*cp_CH4[1]+y_co2*cp_CO2[1]+y_o2*cp_O2[1]+y_n2*cp_N2[1]
cv_GdA[1]=y_ch4*cv_CH4[1]+y_co2*cv_CO2[1]+y_o2*cv_O2[1]+y_n2*cv_N2[1]

"Propriedades da mistura admitida"

h[1]=h_air[1]+h_GdA[1]
s[1]=s_air[1]+s_GdA[1]
u[1]=u_air[1]+u_GdA[1]
v[1]=v_air[1]+v_GdA[1]
cp[1]=cp_air[1]+cp_GdA[1]
cv[1]=cv_air[1]+cv_GdA[1]

"Ponto 2"

"1-2, compressão isentrópica com o pistão em movimento ascendente pouco antes do final do percurso do pistão, ocorre a ignição"

s[2]=s[1]
r= 10 "razão de compressão"
k=cp[1]/cv[1]
T[2]/T[1]=(r)^(k-1)
P[2]/P[1]=r^k

"Propriedades do ar de admissão"

h_air[2]=Enthalpy(Air;T=T[2])
s_air[2]=Entropy(Air;T=T[2];P=P[2])
u_air[2]=IntEnergy(Air;T=T[2])
v_air[2]=Volume(Air;T=T[2];P=P[2])
cp_air[2]=Cp(Air;T=T[2])
cv_air[2]=Cv(Air;T=T[2])

"Propriedades do gás de aterro"

h_CH4[2]=Enthalpy(CH4;T=T[2])
s_CH4[2]=Entropy(CH4;T=T[2];P=P[2])
u_CH4[2]=IntEnergy(CH4;T=T[2])
v_CH4[2]=Volume(CH4;T=T[2];P=P[2])
cp_CH4[2]=Cp(CH4;T=T[2])
cv_CH4[2]=Cv(CH4;T=T[2])

$h_{CO2[2]} = \text{Enthalpy}(CO2; T=T[2])$
 $s_{CO2[2]} = \text{Entropy}(CO2; T=T[2]; P=P[2])$
 $u_{CO2[2]} = \text{IntEnergy}(CO2; T=T[2])$
 $v_{CO2[2]} = \text{Volume}(CO2; T=T[2]; P=P[2])$
 $cp_{CO2[2]} = Cp(CO2; T=T[2])$
 $cv_{CO2[2]} = Cv(CO2; T=T[2])$

$h_{O2[2]} = \text{Enthalpy}(O2; T=T[2])$
 $s_{O2[2]} = \text{Entropy}(O2; T=T[2]; P=P[2])$
 $u_{O2[2]} = \text{IntEnergy}(O2; T=T[2])$
 $v_{O2[2]} = \text{Volume}(O2; T=T[2]; P=P[2])$
 $cp_{O2[2]} = Cp(O2; T=T[2])$
 $cv_{O2[2]} = Cv(O2; T=T[2])$

$h_{N2[2]} = \text{Enthalpy}(N2; T=T[2])$
 $s_{N2[2]} = \text{Entropy}(N2; T=T[2]; P=P[2])$
 $u_{N2[2]} = \text{IntEnergy}(N2; T=T[2])$
 $v_{N2[2]} = \text{Volume}(N2; T=T[2]; P=P[2])$
 $cp_{N2[2]} = Cp(N2; T=T[2])$
 $cv_{N2[2]} = Cv(N2; T=T[2])$

$h_{GdA[2]} = y_{ch4} * h_{CH4[2]} + y_{co2} * h_{CO2[2]} + y_{o2} * h_{O2[2]} + y_{n2} * h_{N2[2]}$
 $s_{GdA[2]} = y_{ch4} * s_{CH4[2]} + y_{co2} * s_{CO2[2]} + y_{o2} * s_{O2[2]} + y_{n2} * s_{N2[2]}$
 $u_{GdA[2]} = y_{ch4} * u_{CH4[2]} + y_{co2} * u_{CO2[2]} + y_{o2} * u_{O2[2]} + y_{n2} * u_{N2[2]}$
 $v_{GdA[2]} = y_{ch4} * v_{CH4[2]} + y_{co2} * v_{CO2[2]} + y_{o2} * v_{O2[2]} + y_{n2} * v_{N2[2]}$
 $cp_{GdA[2]} = y_{ch4} * cp_{CH4[2]} + y_{co2} * cp_{CO2[2]} + y_{o2} * cp_{O2[2]} + y_{n2} * cp_{N2[2]}$
 $cv_{GdA[2]} = y_{ch4} * cv_{CH4[2]} + y_{co2} * cv_{CO2[2]} + y_{o2} * cv_{O2[2]} + y_{n2} * cv_{N2[2]}$

"Propriedades da mistura admitida"

$h[2] = y_{air} * h_{air[2]} + y_{GdA} * h_{GdA[2]}$
 $h[2] = y_{ch4} * h_{CH4[2]} + y_{co2} * h_{CO2[2]}$
 $u[2] = y_{air} * u_{air[2]} + y_{GdA} * u_{GdA[2]}$
 $v[2] = y_{air} * v_{air[2]} + y_{GdA} * v_{GdA[2]}$
 $cp[2] = y_{air} * cp_{air[2]} + y_{GdA} * cp_{GdA[2]}$
 $cv[2] = y_{air} * cv_{air[2]} + y_{GdA} * cv_{GdA[2]}$

"Rev RMHartmann"

"Ponto 3"

"2-3 : adiç3o de calor a volume constante por meio da queima do combustivel"

$v[3] = v[2]$

{A temperatura no ponto 3, ser3 calculada via hip3tese da temperatura de chama adiab3tica (Turns,2013, p.34)}
{H_reag=H_prod}

$\{H_{reag} = (N_{CH4}/1000) * \text{Enthalpy}(CH4; T=298) + (N_{CO2}/1000) * \text{Enthalpy}(CO2; T=298) + ((N_{O2} + NM_{ar})/1000) * \text{Enthalpy}(O2; T=298) + ((N_{N2} + (NM_{ar} * 3,76))/1000) * \text{Enthalpy}(N2; T=298)\}$

$H_{prod} = (N_{CO2.gs}/1000) * (\text{Enthalpy}(CO2; T=298) + Cp(CO2; T=(298+T)/2) * (T-298)) + (N_{H2O.gs}/1000) * (\text{Enthalpy}(H2O; T=298) + Cp(H2O; T=(298+T)/2) * (T-298)) + (N_{O2.gs}/1000) * (\text{Enthalpy}(O2; T=298) + Cp(O2; T=(298+T)/2) * (T-298)) + (N_{N2.gs}/1000) * (\text{Enthalpy}(N2; T=298) + Cp(N2; T=(298+T)/2) * (T-298))\}$

$\{(N_{CH4}/1000) * \text{Enthalpy}(CH4; T=298) + (N_{CO2}/1000) * \text{Enthalpy}(CO2; T=298) + ((N_{O2} + NM_{ar})/1000) * \text{Enthalpy}(O2; T=298) + ((N_{N2} + (NM_{ar} * 3,76))/1000) * \text{Enthalpy}(N2; T=298) = (N_{CO2.gs}/1000) * (\text{Enthalpy}(CO2; T=298) + Cp(CO2; T=(298+T)/2) * (T-298)) + (N_{H2O.gs}/1000) * (\text{Enthalpy}(H2O; T=298) + Cp(H2O; T=(298+T)/2) * (T-298))\}$

$$298))+(N_O2.gs/1000)*(Enthalpy(O2;T=298)+Cp(O2;T=(298+T)/2)*(T-298))+(N_N2.gs/1000)*(Enthalpy(N2;T=298)+Cp(N2;T=(298+T)/2)*(T-298))"$$

$$(N_CH4/1000)*Enthalpy(CH4;T=298)+(N_CO2/1000)*Enthalpy(CO2;T=298)+((NM_ar/4,76)/1000)*Enthalpy(O2;T=298)+((NM_ar/4,76)/1000)*Enthalpy(N2;T=298)=(N_CO2.gs/1000)*(Enthalpy(CO2;T=298)+Cp(CO2;T=(298+T)/2)*(T-298))+(N_H2O.gs/1000)*(Enthalpy(H2O;T=298)+Cp(H2O;T=(298+T)/2)*(T-298))+(N_O2.gs/1000)*(Enthalpy(O2;T=298)+Cp(O2;T=(298+T)/2)*(T-298))+(N_N2.gs/1000)*(Enthalpy(N2;T=298)+Cp(N2;T=(298+T)/2)*(T-298))$$

$$T[3]=T$$

$$R_u=8,31415$$

"J/mol-K"

$$"P[3]=R_u*T[3]/v[3]"$$

$$P[3]=P[2]*(T[3]/T[2])*(v[2]/v[3])$$

"produto da queima é os gases de escape; água, dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio"

$$h_CO2[3]=Enthalpy(CO2;T=T[3])$$

$$s_CO2[3]=Entropy(CO2;T=T[3];P=P[3])$$

$$u_CO2[3]=IntEnergy(CO2;T=T[3])$$

$$v_CO2[3]=Volume(CO2;T=T[3];P=P[3])$$

$$cp_CO2[3]=Cp(CO2;T=T[3])$$

$$cv_CO2[3]=Cv(CO2;T=T[3])$$

$$h_H2O[3]=Enthalpy(H2O;T=T[3])$$

$$s_H2O[3]=Entropy(H2O;T=T[3];P=P[3])$$

$$u_H2O[3]=IntEnergy(H2O;T=T[3])$$

$$v_H2O[3]=Volume(H2O;T=T[3];P=P[3])$$

$$cp_H2O[3]=Cp(H2O;T=T[3])$$

$$cv_H2O[3]=Cv(H2O;T=T[3])$$

$$h_O2[3]=Enthalpy(O2;T=T[3])$$

$$S_O2[3]=Entropy(O2;T=T[3];P=P[3])$$

$$u_O2[3]=IntEnergy(O2;T=T[3])$$

$$v_O2[3]=Volume(O2;T=T[3];P=P[3])$$

$$cp_O2[3]=Cp(O2;T=T[3])$$

$$cv_O2[3]=Cv(O2;T=T[3])$$

$$h_N2[3]=Enthalpy(N2;T=T[3])$$

$$S_N2[3]=Entropy(N2;T=T[3];P=P[3])$$

$$u_N2[3]=IntEnergy(N2;T=T[3])$$

$$v_N2[3]=Volume(N2;T=T[3];P=P[3])$$

$$cp_N2[3]=Cp(N2;T=T[3])$$

$$cv_N2[3]=Cv(N2;T=T[3])$$

$$h[3]=y_co2.gs*h_CO2[3]+y_h2o.gs*h_H2O[3]+y_n2.gs*h_N2[3]+y_o2.gs*h_O2[3]$$

$$s[3]=y_co2.gs*s_CO2[3]+y_h2o.gs*s_H2O[3]+y_n2.gs*s_N2[3]+y_o2.gs*s_O2[3]$$

$$u[3]=y_co2.gs*u_CO2[3]+y_h2o.gs*u_H2O[3]+y_n2.gs*u_N2[3]+y_o2.gs*u_O2[3]$$

$$"v[3]=y_co2.gs*v_CO2[3]+y_h2o.gs*v_H2O[3]+y_n2.gs*s_N2[3]+y_o2.gs*s_O2[3]"$$

$$cp[3]=y_co2.gs*cp_CO2[3]+y_h2o.gs*cp_H2O[3]+y_n2.gs*cp_N2[3]+y_o2.gs*cp_O2[3]$$

$$cv[3]=y_co2.gs*cv_CO2[3]+y_h2o.gs*cv_H2O[3]+y_n2.gs*cv_N2[3]+y_o2.gs*cv_O2[3]$$

"Ponto 4"

"3-4: com o pistão em movimento descendente, ocorre a expansão isentrópica dos gases e transferência de energia ao pistão"

$$s[3]=s[4]$$

$$k_4=cp[3]/cv[3]$$

$$T[4]/T[3]=(1/r)^{(k_4-1)}$$

$$P[4]/P[3]=(1/r)^{(k_4)}$$

"Propriedades dos gases de escape"

$$h_{CO2}[4]=Enthalpy(CO2;T=T[4])$$

$$s_{CO2}[4]=Entropy(CO2;T=T[4];P=P[4])$$

$$u_{CO2}[4]=IntEnergy(CO2;T=T[4])$$

$$v_{CO2}[4]=Volume(CO2;T=T[4];P=P[4])$$

$$cp_{CO2}[4]=Cp(CO2;T=T[4])$$

$$cv_{CO2}[4]=Cv(CO2;T=T[4])$$

$$h_{H2O}[4]=Enthalpy(H2O;T=T[4])$$

$$s_{H2O}[4]=Entropy(H2O;T=T[4];P=P[4])$$

$$u_{H2O}[4]=IntEnergy(H2O;T=T[4])$$

$$v_{H2O}[4]=Volume(H2O;T=T[4];P=P[4])$$

$$cp_{H2O}[4]=Cp(H2O;T=T[4])$$

$$cv_{H2O}[4]=Cv(H2O;T=T[4])$$

$$h_{O2}[4]=Enthalpy(O2;T=T[4])$$

$$S_{O2}[4]=Entropy(O2;T=T[4];P=P[4])$$

$$u_{O2}[4]=IntEnergy(O2;T=T[4])$$

$$v_{O2}[4]=Volume(O2;T=T[4];P=P[4])$$

$$cp_{O2}[4]=Cp(O2;T=T[4])$$

$$cv_{O2}[4]=Cv(O2;T=T[4])$$

$$h_{N2}[4]=Enthalpy(N2;T=T[4])$$

$$S_{N2}[4]=Entropy(N2;T=T[4];P=P[4])$$

$$u_{N2}[4]=IntEnergy(N2;T=T[4])$$

$$v_{N2}[4]=Volume(N2;T=T[4];P=P[4])$$

$$cp_{N2}[4]=Cp(N2;T=T[4])$$

$$cv_{N2}[4]=Cv(N2;T=T[4])$$

$$h[4]=y_{co2}.gs*h_{CO2}[4]+y_{h2o}.gs*h_{H2O}[4]+y_{n2}.gs*h_{N2}[4]+y_{o2}.gs*h_{O2}[4]$$

$$s[4]=y_{co2}.gs*s_{CO2}[4]+y_{h2o}.gs*s_{H2O}[4]+y_{n2}.gs*s_{N2}[4]+y_{o2}.gs*s_{O2}[4]$$

$$u[4]=y_{co2}.gs*u_{CO2}[4]+y_{h2o}.gs*u_{H2O}[4]+y_{n2}.gs*u_{N2}[4]+y_{o2}.gs*u_{O2}[4]$$

$$v[4]=y_{co2}.gs*v_{CO2}[4]+y_{h2o}.gs*v_{H2O}[4]+y_{n2}.gs*s_{N2}[4]+y_{o2}.gs*s_{O2}[4]$$

$$cp[4]=y_{co2}.gs*cp_{CO2}[4]+y_{h2o}.gs*cp_{H2O}[4]+y_{n2}.gs*cp_{N2}[4]+y_{o2}.gs*cp_{O2}[4]$$

$$cv[4]=y_{co2}.gs*cv_{CO2}[4]+y_{h2o}.gs*cv_{H2O}[4]+y_{n2}.gs*cv_{N2}[4]+y_{o2}.gs*cv_{O2}[4]$$

"Ponto 5"

"4-1: eliminação de calor a volume constante."

$$v[4]=v[5]$$

$$P[5]=P[1]$$

$$T[5]=T[4]*(P[5]/P[4])*(v[5]/v[4])$$

"Propriedades dos gases de escape"

$$h_{CO2}[5]=Enthalpy(CO2;T=T[5])$$

$$s_{CO2}[5]=Entropy(CO2;T=T[5];P=P[5])$$

$$u_{CO2}[5]=IntEnergy(CO2;T=T[5])$$

$$v_{CO2}[5]=Volume(CO2;T=T[5];P=P[5])$$

$$cp_{CO2}[5]=Cp(CO2;T=T[5])$$

$$cv_{CO2}[5]=Cv(CO2;T=T[5])$$

$$h_{H2O}[5]=Enthalpy(H2O;T=T[5])$$

$$s_{H2O}[5]=Entropy(H2O;T=T[5];P=P[5])$$

$$u_{H2O}[5]=IntEnergy(H2O;T=T[5])$$

v_H2O[5]=Volume(H2O;T=T[5];P=P[5])
cp_H2O[5]=Cp(H2O;T=T[5])
cv_H2O[5]=Cv(H2O;T=T[5])

h_O2[5]=Enthalpy(O2;T=T[5])
S_O2[5]=Entropy(O2;T=T[5];P=P[5])
u_O2[5]=IntEnergy(O2;T=T[5])
v_O2[5]=Volume(O2;T=T[5];P=P[5])
cp_O2[5]=Cp(O2;T=T[5])
cv_O2[5]=Cv(O2;T=T[5])

h_N2[5]=Enthalpy(N2;T=T[5])
s_N2[5]=Entropy(N2;T=T[5];P=P[5])
u_N2[5]=IntEnergy(N2;T=T[5])
v_N2[5]=Volume(N2;T=T[5];P=P[4])
cp_N2[5]=Cp(N2;T=T[5])
cv_N2[5]=Cv(N2;T=T[5])

h[5]=y_co2.gs*h_CO2[5]+y_h2o.gs*h_H2O[5]+y_n2.gs*h_N2[5]+y_o2.gs*h_O2[5]
s[5]=y_co2.gs*s_CO2[5]+y_h2o.gs*s_H2O[5]+y_n2.gs*s_N2[5]+y_o2.gs*s_O2[5]
u[5]=y_co2.gs*u_CO2[5]+y_h2o.gs*u_H2O[5]+y_n2.gs*u_N2[5]+y_o2.gs*u_O2[5]
"v[5]=y_co2.gs*v_CO2[5]+y_h2o.gs*v_H2O[5]+y_n2.gs*s_N2[5]+y_o2.gs*s_O2[5]"
cp[5]=y_co2.gs*cp_CO2[5]+y_h2o.gs*cp_H2O[4]+y_n2.gs*cp_N2[4]+y_o2.gs*cp_O2[5]
cv[5]=y_co2.gs*cv_CO2[5]+y_h2o.gs*cv_H2O[5]+y_n2.gs*cv_N2[5]+y_o2.gs*cv_O2[5]

{Balanço de Energia}

{Balanço de Energia no MCI}

Q_H= m_dot[1]*(h[3]-h[2])
"Q_H= (N_produtos*h[3]-N_reagentes*h[2])"

Q_L= m_dot[1]*(h[4]-h[5])
"Q_L= N_produtos*(h[4]-h[5])"

"W_liq=Q_H-Q_L"

"W_liq = m_dot[1]*((P[3]*v[3]^k_4)/(k_4+1))*(v[4]^(k_4+1) - v[3]^(k_4+1))"
W_liq = m_dot[1]*((P[3]*v[3]^k)/(-k+1))*(v[4]^(-k+1) - v[3]^(-k+1))
"Rev RMHartmann"

"Q_perdas=W_liq-W_util"

Q_perdas=Q_L
"Rev RMHartmann"

{-----Cálculos adicionais de desempenho-----}

SFC=m_dot_biogás/W_liq {Consumo específico de combustível}

Eta1=(W_liq/Q_H) {Eficiência térmica ciclo otto}
Eta = W_liq/Q_H

**APÊNDICE E – PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS PARA O CICLO BRAYTON
REGENERATIVO CALCULADAS NOS PONTOS DE
ANÁLISE POR ANO**

Tabela 26 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 1: $\Phi = 0,68$

Ponto de Análise	$P(kPa)$	$T(K)$	$h(kJ/kmol)$	$s(kJ/kmol.K)$
1	101,3	298,2	8649	165
2	459,9	459,4	13373	165,1
3	459,9	1151	35369	193,9
4	101,3	298,2	-202562	198,6
5	459,9	423,5	-197726	199,5
6	459,9	1683	-25870	241,5
7	101,3	1228	-43574	241,9
8	101,3	754,1	-60734	224,3

Tabela 27 – Vazões molares nos pontos de análise por ano (kmol/s) - Caso 1 : $\Phi = 0,68$

Ano	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5	\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8
2018	0,01566	0,01566	0,01566	0,002237	0,002237	0,01789	0,01789	0,01789
2019	0,01324	0,01324	0,01324	0,001891	0,001891	0,01513	0,01513	0,01513
2020	0,01122	0,01122	0,01122	0,001602	0,001602	0,01282	0,01282	0,01282
2021	0,009524	0,009524	0,009524	0,001361	0,001361	0,01088	0,01088	0,01088
2022	0,008105	0,008105	0,008105	0,001158	0,001158	0,009263	0,009263	0,009263
2023	0,006915	0,006915	0,006915	0,000988	0,000988	0,007903	0,007903	0,007903
2024	0,005915	0,005915	0,005915	0,000845	0,000845	0,00676	0,00676	0,00676
2025	0,005074	0,005074	0,005074	0,000725	0,000725	0,005799	0,005799	0,005799
2026	0,004367	0,004367	0,004367	0,000624	0,000624	0,00499	0,00499	0,00499
2027	0,00377	0,00377	0,00377	0,000539	0,000539	0,004308	0,004308	0,004308
2028	0,003265	0,003265	0,003265	0,000467	0,000467	0,003732	0,003732	0,003732
2029	0,002838	0,002838	0,002838	0,000406	0,000406	0,003244	0,003244	0,003244
2030	0,002476	0,002476	0,002476	0,000354	0,000354	0,00283	0,00283	0,00283
2031	0,001556	0,001556	0,001556	0,000222	0,000222	0,001778	0,001778	0,001778
2032	0,001356	0,001356	0,001356	0,000194	0,000194	0,00155	0,00155	0,00155
2033	0,001186	0,001186	0,001186	0,00017	0,00017	0,001356	0,001356	0,001356
2034	0,001042	0,001042	0,001042	0,000149	0,000149	0,001191	0,001191	0,001191
2035	0,0009189	0,000919	0,000919	0,000131	0,000131	0,00105	0,00105	0,00105
2036	0,0008134	0,000813	0,000813	0,000116	0,000116	0,00093	0,00093	0,00093
2037	0,0007228	0,000723	0,000723	0,000103	0,000103	0,000826	0,000826	0,000826

Continua na próxima página

Tabela 27 – Continuação da página anterior

Ano	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5	\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8
2038	0,0006448	0,000645	0,000645	9,21E-05	9,21E-05	0,000737	0,000737	0,000737
2039	0,0005775	0,000578	0,000578	8,25E-05	8,25E-05	0,000666	0,000666	0,000666
2040	0,000519	0,000519	0,000519	7,42E-05	7,42E-05	0,000593	0,000593	0,000593

Tabela 28 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 2: $\Phi = 0,58$

Ponto de Análise	$P(kPa)$	$T(K)$	$h(kJ/kmol)$	$s(kJ/kmol.K)$
1	101,3	298,20	8649	165
2	459,9	459,40	13373	165,1
3	459,9	1044,00	31769	190,7
4	101,3	298,20	-202562	198,6
5	459,9	423,50	-197726	199,5
6	459,9	1533,00	-22348	237,3
7	101,3	1109,00	-38381	237,6
8	101,3	687,50	-53178	220,9

Tabela 29 – Vazões molares nos pontos de análise por ano - Caso 2: $\Phi = 0,58$

Ano	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5	\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8
2018	0,01836	0,01836	0,01836	0,002237	0,002237	0,02059	0,02059	0,02059
2019	0,01552	0,01552	0,01552	0,001891	0,001891	0,01741	0,01741	0,01741
2020	0,01315	0,01315	0,01315	0,001602	0,001602	0,01475	0,01475	0,01475
2021	0,01117	0,01117	0,01117	0,001361	0,001361	0,01253	0,01253	0,01253
2022	0,009503	0,009503	0,009503	0,001158	0,001158	0,01066	0,01066	0,01066
2023	0,008107	0,008107	0,008107	0,000988	0,000988	0,009095	0,009095	0,009095
2024	0,006935	0,006935	0,006935	0,000845	0,000845	0,00778	0,00778	0,00778
2025	0,005949	0,005949	0,005949	0,000725	0,000725	0,006674	0,006674	0,006674
2026	0,005119	0,005119	0,005119	0,000624	0,000624	0,005743	0,005743	0,005743
2027	0,00442	0,00442	0,00442	0,000539	0,000539	0,004958	0,004958	0,004958
2028	0,003828	0,003828	0,003828	0,000467	0,000467	0,004295	0,004295	0,004295
2029	0,003328	0,003328	0,003328	0,000406	0,000406	0,003733	0,003733	0,003733
2030	0,002903	0,002903	0,002903	0,000354	0,000354	0,003257	0,003257	0,003257
2031	0,001824	0,001824	0,001824	0,000222	0,000222	0,002046	0,002046	0,002046
2032	0,00159	0,00159	0,00159	0,000194	0,000194	0,001783	0,001783	0,001783
2033	0,001391	0,001391	0,001391	0,00017	0,00017	0,001561	0,001561	0,001561
2034	0,001222	0,001222	0,001222	0,000149	0,000149	0,001371	0,001371	0,001371
2035	0,001077	0,001077	0,001077	0,000131	0,000131	0,001209	0,001209	0,001209
2036	0,0009537	0,000954	0,000954	0,000116	0,000116	0,00107	0,00107	0,00107
2037	0,0008475	0,000848	0,000848	0,000103	0,000103	0,000951	0,000951	0,000951

Continua na próxima página

Tabela 29 – Continuação da página anterior

Ano	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5	\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8
2038	0,000756	0,000756	0,000756	9,21E-05	9,21E-05	0,000848	0,000848	0,000848
2039	0,000677	0,000677	0,000677	8,25E-05	8,25E-05	0,00076	0,00076	0,00076
2040	0,0006085	0,000609	0,000609	7,42E-05	7,42E-05	0,000683	0,000683	0,000683

Tabela 30 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 3: $\Phi = 0,48$

Ponto de Análise	$P(kPa)$	$T(K)$	$h(kJ/kmol)$	$s(kJ/kmol.K)$
1	101,3	298,20	8649	165
2	459,9	459,40	13373	165,1
3	459,9	928,10	27949	186,8
4	101,3	298,20	-202562	198,6
5	459,9	423,50	-197726	199,5
6	459,9	1370,00	-18738	232,4
7	101,3	980,20	-32967	232,8
8	101,3	623,10	-45104	217,4

Tabela 31 – Vazões molares nos pontos de análise por ano - Caso 3: $\Phi = 0,48$

Ano	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5	\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8
2018	0,02218	0,02218	0,02218	0,00224	0,00224	0,02442	0,02442	0,02442
2019	0,01876	0,01876	0,01876	0,00189	0,00189	0,02065	0,02065	0,02065
2020	0,01589	0,01589	0,01589	0,0016	0,0016	0,01749	0,01749	0,01749
2021	0,01349	0,01349	0,01349	0,00136	0,00136	0,01485	0,01485	0,01485
2022	0,01148	0,01148	0,01148	0,00116	0,00116	0,01264	0,01264	0,01264
2023	0,009796	0,0098	0,0098	0,00099	0,00099	0,01078	0,01078	0,01078
2024	0,00838	0,00838	0,00838	0,00085	0,00085	0,00923	0,00923	0,00923
2025	0,007189	0,00719	0,00719	0,00072	0,00072	0,00791	0,00791	0,00791
2026	0,006186	0,00619	0,00619	0,00062	0,00062	0,00681	0,00681	0,00681
2027	0,00534	0,00534	0,00534	0,00054	0,00054	0,00588	0,00588	0,00588
2028	0,004626	0,00463	0,00463	0,00047	0,00047	0,00509	0,00509	0,00509
2029	0,004021	0,00402	0,00402	0,00041	0,00041	0,00443	0,00443	0,00443
2030	0,003508	0,00351	0,00351	0,00035	0,00035	0,00386	0,00386	0,00386
2031	0,002204	0,0022	0,0022	0,00022	0,00022	0,00243	0,00243	0,00243
2032	0,001921	0,00192	0,00192	0,00019	0,00019	0,00212	0,00212	0,00212
2033	0,001681	0,00168	0,00168	0,00017	0,00017	0,00185	0,00185	0,00185
2034	0,001476	0,00148	0,00148	0,00015	0,00015	0,00163	0,00163	0,00163
2035	0,001302	0,0013	0,0013	0,00013	0,00013	0,00143	0,00143	0,00143
2036	0,001152	0,00115	0,00115	0,00012	0,00012	0,00127	0,00127	0,00127
2037	0,001024	0,00102	0,00102	0,0001	0,0001	0,00113	0,00113	0,00113

Continua na próxima página

Tabela 31 – Continuação da página anterior

Ano	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	\dot{m}_4	\dot{m}_5	\dot{m}_6	\dot{m}_7	\dot{m}_8
2038	0,0009135	0,00091	0,00091	9,2E-05	9,2E-05	0,00101	0,00101	0,00101
2039	0,0008181	0,00082	0,00082	8,2E-05	8,2E-05	0,0009	0,0009	0,0009
2040	0,0007353	0,00074	0,00074	7,4E-05	7,4E-05	0,00081	0,00081	0,00081

**APÊNDICE F – PROPRIEDADES
TERMODINÂMICAS PARA O CICLO OTTO
CALCULADAS NOS PONTOS DE ANÁLISE POR
ANO**

Tabela 32 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 1 : $\Phi = 0,95$

Ponto de Análise	$P(kPa)$	$T(K)$	$h(kJ/kmol)$	$u(kJ/kmol)$	$s(kJ/kmol.K)$
1	101,3	298,2	-193913	-198871	363,6
2	2238	658,5	-187717	-20402	363,6
3	6902	2031	-34921	-51810	228,6
4	394,4	1161	-70482	-80132	228,6
5	101,3	298,2	-100649	-103128	194,5

Tabela 33 – Vazões molares de biogás e ar por ano (kmol/s) - Caso 1: $\Phi = 0,95$

Ano	\dot{m}_{LFG}	\dot{m}_{ar}	$\dot{m}_{mistura}$
2018	0,002237	0,01121	0,013447
2019	0,001891	0,009475	0,011366
2020	0,001602	0,008027	0,009629
2021	0,001361	0,006819	0,00818
2022	0,001158	0,005802	0,00696
2023	0,0009878	0,004949	0,0059368
2024	0,000845	0,004234	0,005079
2025	0,0007249	0,003632	0,0043569
2026	0,0006238	0,003126	0,0037498
2027	0,0005385	0,002698	0,0032365
2028	0,0004665	0,002337	0,0028035
2029	0,0004055	0,002032	0,0024375
2030	0,0003538	0,001773	0,0021268
2031	0,0002222	0,001113	0,0013352
2032	0,0001937	0,0009705	0,0011642
2033	0,0001695	0,0008493	0,0010188

Continua na próxima página

Tabela 33 – Continuação da página anterior

Ano	\dot{m}_{LFG}	\dot{m}_{ar}	$\dot{m}_{mistura}$
2034	0,0001489	0,0007461	0,000895
2035	0,0001313	0,0006579	0,0007892
2036	0,0001162	0,0005822	0,0006984
2037	0,0001033	0,0005176	0,0006209
2038	0,00009212	0,0004616	0,00055372
2039	0,00008249	0,0004133	0,00049579
2040	0,00007415	0,0003715	0,00044565

Tabela 34 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 2: $\Phi = 0,85$

Ponto de Análise	$P(kPa)$	$T(K)$	$h(kJ/kmol)$	$u(kJ/kmol)$	$s(kJ/kmol.K)$
1	101,3	298,2	-193913	-198871	363,6
2	2238	658,5	-187717	-17337	363,6
3	6491	1911	-31638	-47522	225,8
4	365,5	1076	-64937	-73881	225,8
5	101,3	298,2	-91614	-94093	194,5

Tabela 35 – Vazões molares de biogás e ar por ano (kmol/s) - Caso 2: $\Phi = 0,85$

Ano	\dot{m}_{LFG}	\dot{m}_{ar}	$\dot{m}_{mistura}$
2018	0,002237	0,01253	0,014767
2019	0,001891	0,01059	0,012481
2020	0,001602	0,008971	0,010573
2021	0,001361	0,007622	0,008983
2022	0,001158	0,006485	0,007643
2023	0,0009878	0,005532	0,00652
2024	0,000845	0,004732	0,005577
2025	0,0007249	0,004059	0,004784
2026	0,0006238	0,003493	0,004117
2027	0,0005385	0,003016	0,003555
2028	0,0004665	0,002612	0,003079

Continua na próxima página

Tabela 35 – Continuação da página anterior

Ano	\dot{m}_{LFG}	\dot{m}_{ar}	$\dot{m}_{mistura}$
2029	0,0004055	0,002271	0,002677
2030	0,0003538	0,001981	0,002335
2031	0,0002222	0,001244	0,001466
2032	0,0001937	0,001085	0,001279
2033	0,0001695	0,0009492	0,001119
2034	0,0001489	0,0008338	0,000983
2035	0,0001313	0,0007353	0,000867
2036	0,0001162	0,0006507	0,000767
2037	0,0001033	0,0005785	0,000682
2038	0,00009212	0,0005159	0,000608
2039	0,00008249	0,0004619	0,000544
2040	0,00007415	0,0004152	0,000489

Tabela 36 – Propriedades termodinâmicas por pontos de análise - Caso 3; $\Phi = 0,75$

Ponto de Análise	$P(kPa)$	$T(K)$	$h(kJ/kmol)$	$u(kJ/kmol)$	$s(kJ/kmol.K)$
1	101,3	298,2	-193913	-198871	363,6
2	2238	658,5	-187717	-14161	363,6
3	6049	1780	-28266	-43069	222,9
4	334,9	985,6	-59150	-67345	222,9
5	101,3	298,2	-82260	-84739	194,5

Tabela 37 – Vazões molares de biogás e ar por ano (kmol/s) - Caso 3: $\Phi = 0,75$

Ano	\dot{m}_{LFG}	\dot{m}_{ar}	$\dot{m}_{mistura}$
2018	0,002237	0,0142	0,016437
2019	0,001891	0,012	0,013891
2020	0,001602	0,01017	0,011772
2021	0,001361	0,008638	0,009999
2022	0,001158	0,007349	0,008507
2023	0,0009878	0,006269	0,007257

Continua na próxima página

Tabela 37 – Continuação da página anterior

Ano	\dot{m}_{LFG}	\dot{m}_{ar}	$\dot{m}_{mistura}$
2024	0,000845	0,005363	0,006208
2025	0,0007249	0,004601	0,005326
2026	0,0006238	0,003959	0,004583
2027	0,0005385	0,003418	0,003957
2028	0,0004665	0,002961	0,003428
2029	0,0004055	0,002574	0,00298
2030	0,0003538	0,002245	0,002599
2031	0,0002222	0,00141	0,001632
2032	0,0001937	0,001229	0,001423
2033	0,0001695	0,001076	0,001246
2034	0,0001489	0,000945	0,001094
2035	0,0001313	0,0008333	0,000965
2036	0,0001162	0,0007375	0,000854
2037	0,0001033	0,0006556	0,000759
2038	0,00009212	0,0005847	0,000677
2039	0,00008249	0,0005235	0,000606
2040	0,00007415	0,0004706	0,000545