



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**



JESSICA MAZIOLI

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA USANDO
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDOS DE CASO**

**OURO PRETO - MG
2019**

JESSICA MAZIOLI
jessicamazioli@hotmail.com

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA USANDO
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDOS DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professora orientadora: Elisângela Martins Leal

OURO PRETO – MG
2019

M476a Mazioli, Jessica.
Análise de sistemas de geração de energia usando resíduos sólidos urbanos:
Estudos de caso. [manuscrito] / Jessica Mazioli. - 2019.

68f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Energia. 2. Sustentabilidade. 3. Resíduos Sólidos Urbanos. 4. Aterro
Sanitário. 5. Viabilidade Técnica. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Ao 4º dia do mês de julho do ano de dois mil e dezenove às 8 horas, no Auditório da Fundação Gorceix, localizado na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, UFOP, foi realizada a defesa de monografia da aluna **Jéssica Mazlioli**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia, Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. A candidata apresentou o trabalho intitulado: "**Análise de sistemas de geração de energia usando resíduos sólidos urbanos: Estudos de caso**", sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram a aluna aprovada.

Ouro Preto, 04 de julho de 2019.

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professora Orientadora

Prof. DSc. Luís Antônio Bortolaia
Professor Avaliador

Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior
Professor Avaliador

Jéssica Mazlioli
Aluna

Dedico esse trabalho a minha família, que foi a base de tudo desde o início, aos meus amigos que estiveram ao meu lado quando precisei e tornaram os anos de graduação mais leve e agradável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha professora orientadora Elisangela Martins Leal pelo apoio, incentivo, conselhos e paciência ao longo toda graduação e também na elaboração do trabalho de conclusão de curso.

Aos amigos e familiares por todo incentivo e inspiração através de gestos e palavras que levaram a superação das dificuldades. Em especial ao meu pai e ao meu irmão que a todo momento vibraram com cada etapa vencida.

À minha mãe (in memoriam), que em algum lugar deve estar vibrando com a minha vitória.

À Gabriella por todas as palavras de apoio, força e cumplicidade. Obrigada por ser atenciosa e aguentar tantas crises ao longe desta etapa.

À UFOP por proporcionar um ambiente criativo, amigável e de construção pessoal através dos estudos.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”.

Mahatma Gandhi

RESUMO

MAZIOLI, Jessica. Análise de sistemas de geração de energia usando resíduos sólidos urbanos: estudos de caso. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 66 páginas. 2019.

As altas taxas de industrialização e de urbanização mundiais propiciam um consumo desenfreado e crescente de mercadorias, o que acarreta na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Durante o processo de decomposição da matéria orgânica dos resíduos, há formação de biogás que pode ser utilizado na geração de energia elétrica e térmica por meio de máquinas térmicas. Esse trabalho apresenta o estudo de três casos analisando sistemas de geração de energia através de resíduos sólidos urbanos. O primeiro caso é a análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário com 3 motores a Diesel e uma turbina a gás. Este estudo é realizado para quatro cidades mineiras que devido aos aportes populacionais e conseqüentemente geração de metano, as potências geradas seguem a ordem crescente de Betim, Uberaba, Uberlândia e Contagem. O segundo caso trata-se de um estudo do desempenho de microturbinas a gás utilizando biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica sendo a análise de sensibilidade realizada através da variação da razão de pressão do compressor e da temperatura na entrada da turbina para diferentes valores de eficiência do compressor, da turbina e do regenerador. Esta análise possibilita encontrar os melhores pontos de eficiência para o ciclo regenerativo, que é a temperatura de 1200 K na entrada da turbina, razão de pressão de 4 e eficiência do compressor, da turbina e do regenerador de 0,80, 0,83 e 0,85 respectivamente. Já o terceiro caso é uma análise técnica de um sistema de geração de energia através do uso de resíduos sólidos urbanos e caldeira *mass burning* para as cidades de Belo Horizonte e Betim, sendo os resultados de Belo Horizonte os mais satisfatórios devido ao seu maior índice populacional conseguindo gerar 9,6 MWel para o ciclo Rankine com superaquecimento. Os cenários comprovam a viabilidade em termos de eficiência energética e a sustentabilidade da utilização de resíduos sólidos urbanos na geração de energia.

Palavras-chave: Energia; Sustentabilidade; Resíduos Sólidos Urbanos; Aterro Sanitário; Ciclo Rankine; Ciclo Brayton; Motores de Combustão e Viabilidade Técnica.

ABSTRACT

MAZIOLI, Jessica. Analysis of energy generation systems using municipal solid waste: case studies. Monography (Bachelor degree in Mechanical Engineering). School of Mining, Federal University of Ouro Preto, 66 pages. 2019.

The high rates of industrialization and urbanization in the World lead to a rampant and increasing consumption of goods, which results in the generation of municipal solid waste (MSW). During the process of decomposition of the organic matter of the residues, there is a formation of biogas that can be used in the generation of electric and thermal energy by means of thermal engines. This work presents the study of three cases analyzing systems of energy generation through municipal solid waste. The first case is the technical analysis of an energy generation system using landfill biogas with 3 diesel engines and a gas turbine. This study is carried out for four cities in Minas Gerais state that, due to population contributions and consequently methane generation, the generated electric power follow the increasing order of Betim, Uberaba, Uberlândia and Contagem. The second case is a study of the performance of gas microturbines using biogas from municipal solid waste for electric power generation, and the sensitivity analysis was carried out by varying the pressure ratio of the compressor and the temperature at the turbine inlet to different values of efficiency of the compressor, turbine and regenerator. This analysis makes it possible to find the best efficiency points for the regenerative cycle, which is the temperature of 1200 K at the turbine inlet, pressure ratio of 4 and efficiency of the compressor, turbine and regenerator of 0.80, 0.83 and 0.85 respectively. The third case is a technical analysis of a system of energy generation through the use of municipal solid waste and mass burning boiler for the cities of Belo Horizonte and Betim, and Belo Horizonte's results are the most satisfactory due to its higher population index generating 9.6 MWel for the Rankine cycle with superheating. The scenarios demonstrate the technical feasibility of generating electric and/or thermal energy and the sustainability of the use of municipal solid waste in energy generation.

Keywords: *Energy; sustainability; municipal solid waste; landfill; Rankine Cycle; technical feasibility.*

LISTA DE SÍMBOLOS

L_o : Potencial para geração de resíduos de metano [kg de CH₄ / kg de MSW];

C_p : Calor específico à pressão constante [J/(kg.K)];

\dot{m} : vazão mássica [kg/s];

η : eficiência [%];

η_{el} : eficiência elétrica [%];

η_{th} : eficiência térmica [%];

ρ_{CH_4} : Massa específica do metano [kg / m³];

v : volume da câmara de combustão;

r_p : razão de pressão;

Q_{CH_4} : taxa de produção de metano: [m³ CH₄ / ano];

pH: Potencial hidrogeniônico;

C : Tempo desde o encerramento dos locais de eliminação de resíduos sólidos (SWDS) [anos];

C : cilindrada [cm³];

COD: Carbono orgânico degradável [kg de C / kg de MSW];

COD_f : Fração de carbono degradável dissociada [%];

D : diâmetro [mm];

F : Fração volumétrica do metano no biogás [%];

FCM: Fator de correção do metano;

K : Constante de taxa de geração de metano [ano⁻¹];

L_o : Potencial de geração de metano [m³ / tonelada de lixo];

M : massa [kg];

P : Pressão [bar];

PMI: Ponto morto inferior;

PMS: Ponto morto superior;

Pop_{urb} : Número de habitantes em uma área urbana [habitantes];

Q : Calor [J];

Q_H : Energia térmica absorvida pela câmara de combustão [J];

Q_L : Energia térmica rejeitada pela turbina [J];

QT : Total de emissões no ano T de resíduos eliminados em anos anteriores (incluindo o ano T) [m³ / ano];

R : Taxa média anual de recebimento de resíduos durante a vida ativa do aterro [ton/ano];

RSDf: Fração de lixo doméstico que é depositado em locais de descarte de resíduos sólidos [%];

RSU: Resíduo sólido urbano;

Rx: Quantidade de resíduos depositados no ano x [kg];

t: tempo [anos];

T: Temperatura [K];

TaxaRSD: Taxa de geração de resíduos sólidos [kg de MSW/habitante.ano];

RC: Relação de compressão;

V: Volume [m³];

X: Ano de entrada de resíduos;

W: Trabalho [J].

h: Entalpia [kJ/mol]

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Participação das regiões do país no total de resíduos sólidos urbanos coletados. | 2 |
| Figura 2 - Disposição final dos resíduos sólidos coletados no Brasil. | 3 |
| Figura 3 - Esquema de um aterro sanitário com estação de Biogás. | 4 |
| Figura 4 - Sustentabilidade e as suas dimensões. | 8 |
| Figura 5 - Esquema de aterro sanitário. | 13 |
| Figura 6 – Dez países com maior potência instalada. | 22 |
| Figura 7 - Ciclo Rankine ideal. | 23 |
| Figura 8 - Desvios do ciclo real de potência a vapor do ciclo Rankine ideal. | 25 |
| Figura 9 - Planta de queima de resíduos pelo processo <i>Mass Burning</i> | 27 |
| Figura 10 - Seção de uma caldeira tipo <i>underfeed</i> com descarregador de cinzas lateral. | 28 |
| Figura 11 - Ciclo ideal de turbina a gás. | 29 |
| Figura 12 – (a) Diagrama $P-v$ e (b) diagrama $T-s$ para o ciclo Brayton ideal. | 30 |
| Figura 13 - Esboço de motor de combustão interna. | 35 |
| Figura 14 - Diagrama $p-v$ e $T-s$ do ciclo Diesel. | 36 |
| Figura 15 - Fluxograma das etapas da realização do trabalho. | 41 |
| Figura 16 - Energia elétrica produzida. | 47 |
| Figura 17 - Energia térmica produzida. | 48 |
| Figura 18 - Diagrama $T-s$ do ciclo termodinâmico da microturbina a gás com regenerador. ... | 49 |
| Figura 19 - Eficiência elétrica vs Temperatura de entrada na turbina. | 50 |
| Figura 20- Eficiência elétrica vs Razão de pressão do compressor. | 51 |
| Figura 21 - Eficiência térmica vs Temperatura de entrada da turbina. | 52 |
| Figura 22 - Consumo específico de combustível vs Razão de pressão do compressor. | 53 |
| Figura 23 - Resultado da geração de RSU e metano. (a) Belo Horizonte; (b) Betim. | 55 |
| Figura 24 – Diagrama esquemático do primeiro cenário avaliado. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 – Diagrama esquemático do segundo cenário avaliado. | 57 |
| Figura 26 – Diagrama esquemático do terceiro cenário avaliado. | 57 |
| Figura 27 - Resultados para a eficiência e para a geração de eletricidade nos cenários propostos. | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Valores para quantidade de carbono degradável. | 17 |
| Tabela 2 - Sugestão de valores para taxa de geração de metano. | 18 |
| Tabela 3 - Potência Fiscalizada de Empreendimentos em operação. | 20 |
| Tabela 4 - Vantagens e características das microturbinas. | 33 |
| Tabela 5. Variáveis e Indicadores de Pesquisa. | 42 |
| Tabela 6 - Combinações possíveis. | 44 |
| Tabela 7 - Produção de eletricidade referente as máquinas térmicas. | 46 |
| Tabela 8 - Produção de energia térmica. | 46 |
| Tabela 9 - Resultados para o poder calorífico inferior de Belo Horizonte e Betim. | 54 |
| Tabela 10 - Estimativa de geração de RSU de Betim e Belo Horizonte. | 54 |
| Tabela 11 - Características dos Cenários 1, 2 e 3. | 56 |
| Tabela 12 - Dados para análise energética dos ciclos utilizados na cidade de Belo Horizonte. | 58 |
| Tabela 13- Dados para análise energética dos ciclos utilizados na cidade de Betim. | 59 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Formulação do Problema..... | 1 |
| 1.2 | Justificativa..... | 5 |
| 1.3 | Objetivos..... | 5 |
| 1.3.1 | Geral | 5 |
| 1.3.2 | Específicos..... | 6 |
| 1.4 | Estrutura do Trabalho | 6 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 | Sustentabilidade..... | 7 |
| 2.2 | Resíduos Sólidos Urbanos | 9 |
| 2.3 | Aterro Sanitário | 12 |
| 2.4 | Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás | 15 |
| 2.5 | Produção de Energia..... | 20 |
| 2.6 | Ciclo Rankine | 23 |
| 2.7 | Caldeira de Grelha – <i>Mass Burning</i> | 26 |
| 2.8 | Turbina a Gás..... | 28 |
| 2.9 | Microturbinas a Gás..... | 32 |
| 2.10 | Motor de Combustão Interna..... | 34 |
| 2.10.1 | Ciclo Diesel | 35 |
| 2.11 | Considerações Finais | 37 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 38 |
| 3.1 | Tipo de Pesquisa..... | 38 |
| 3.2 | Materiais e Métodos | 40 |
| 3.3 | Variáveis e Indicadores | 42 |
| 3.4 | Instrumento de Coleta de Dados..... | 43 |
| 3.5 | Tabulação de Dados..... | 43 |
| 3.6 | Considerações Finais do Capítulo | 43 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 44 |
| 4.1 | Caso 1: Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas. Gustavo Antonio Pereira, 2017..... | 44 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | Caso 2: Estudo do desempenho de microturbinas a gás utilizando biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica. Guilherme Pedroni de Oliveira, 2015. 48 | |
| 4.3 | Caso 3: Análise técnica de um sistema de geração de energia através do uso de resíduos sólidos urbanos e caldeira <i>MASS BURNING</i> : O caso de dois municípios de Minas Gerais. Maycon Xavier da Fonseca, 2016. | 53 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 61 |
| 5.1 | Conclusão | 61 |
| 5.2 | Recomendações | 63 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é apresentada uma abordagem teórica sobre a geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos onde o uso do ciclo Rankine, ciclo Brayton e Motores de Combustão Interna determinará o processo das máquinas térmicas para o aproveitamento energético dos resíduos. Sendo assim, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na apresentação do problema, os motivos de sua origem, justificativa para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

A crescente demanda observada na população mundial, nos setores industriais e empresariais ampliam a necessidade do aumento na oferta de energia. Os produtos conectados à rede elétrica estão se tornando cada vez mais acessíveis a todas as classes sociais no mundo. Em virtude deste aumento na demanda energética juntamente com a preocupação ao meio ambiente, a busca por formas de gerações de energia que não causem deterioração do meio vem crescendo. Logo, o avanço nos estudos de novas tecnologias em busca da energia limpa tem ocupado um espaço importante no âmbito da pesquisa, observando-se resultados notáveis na evolução e no incentivo de produção de energia solar, eólica, biomassa e de sistemas híbridos no mundo.

Embora diversos países tenham políticas de incentivo a geração e utilização de energia limpa, nota-se uma grande dependência do petróleo, carvão e gás. Segundo o relatório “New Energy Outlook” 2017, produzido pela *Bloomberg New Energy Finance* as fontes de energia renováveis devem representar quase três quartos dos US\$ 10,2 trilhões que o mundo investirá em novas tecnologias de geração de energia até 2040, graças à rápida queda dos custos da energia solar e eólica e ao crescente papel das baterias, incluindo baterias de veículos elétricos no equilíbrio entre oferta e demanda.

Desta forma, introduz-se a sustentabilidade como ponto central para uma economia inclusiva tanto social quanto ambientalmente visando solucionar questões importantes na esfera mundial como segurança energética e mudanças climáticas. Portanto, a geração da energia sustentável com fontes inesgotáveis atende as necessidades atuais sem comprometer a capacidade futura.

Segundo Silva e Lima (2013), as preocupações das empresas com questões ambientais estão vinculadas a dedicação de um capítulo inteiro da Constituição Federal desde 1988, que

impõe um dever jurídico a todos, desde empresas públicas a privadas. Assim, as corporações possuem deveres constitucionais e éticos, buscando exercer influências sociais, ambientais e econômicas, obtendo assim uma função socioambiental perante a Constituição.

Além das energias sustentáveis, a abordagem do tema sustentabilidade está implícita no cotidiano familiar e como cultura empresarial. No intuito de definir de forma simples e equilibrada as relações, foi criado o conceito dos três pilares, sendo determinado pelo social, ambiental e o econômico. Trazendo os pilares para o meio dos negócios, o social refere-se ao capital humano sendo os funcionários, clientes, fornecedores, a comunicação em geral; o ambiental consiste no capital natural sendo os bens extraídos para sobrevivência; o econômico que vai muito além do financeiro, buscando sempre uma relação entre o social e o ambiental (LASSU, 2018).

O excesso de desperdício influencia no aspecto físico da cidade e também na qualidade de vida da sociedade, sendo a abordagem dada aos resíduos sólidos determinante ao bom desenvolvimento sustentável. Em prol desta evolução, estudos sugerem a destinação destes componentes a geração de energia sustentável, viabilizando em combustíveis inesgotáveis.

Encontrado em abundância em todo território mundial e muitas vezes eliminado de forma incorreta, a coleta dos resíduos sólidos está distribuída, segundo a Abrelpe pelo território brasileiro no ano de 2017 da seguinte forma apresentado na Figura 1.

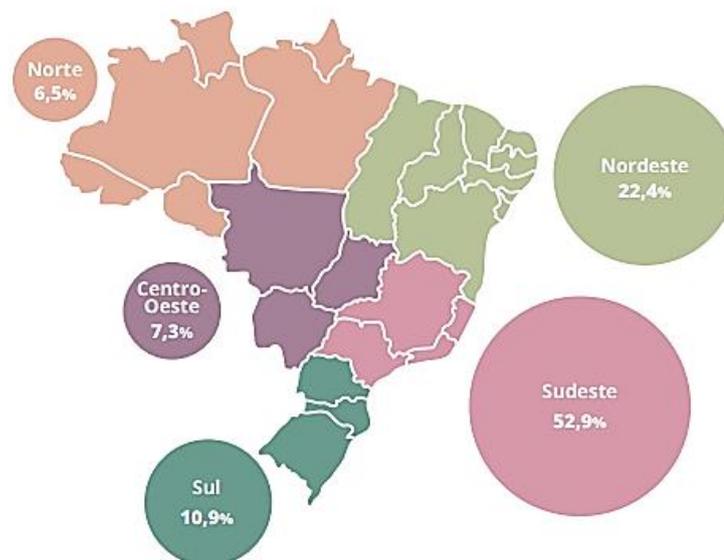


Figura 1 - Participação das regiões do país no total de resíduos sólidos urbanos coletados.
Fonte: Abrelpe, 2017.

Observando na Figura 1, a região sudeste possui a maior porcentagem de resíduos coletados, seguido pela região nordeste. O processo de coleta e destinação final dos resíduos sólidos urbanos é um dos principais desafios enfrentados pela sociedade moderna, sua importância deve-se ao enorme volume produzido, aos gastos financeiros destinados e principalmente o quanto irá afetar o meio ambiente. Na Figura 2 pode-se observar os principais meios de destinação destes resíduos no Brasil 2017.

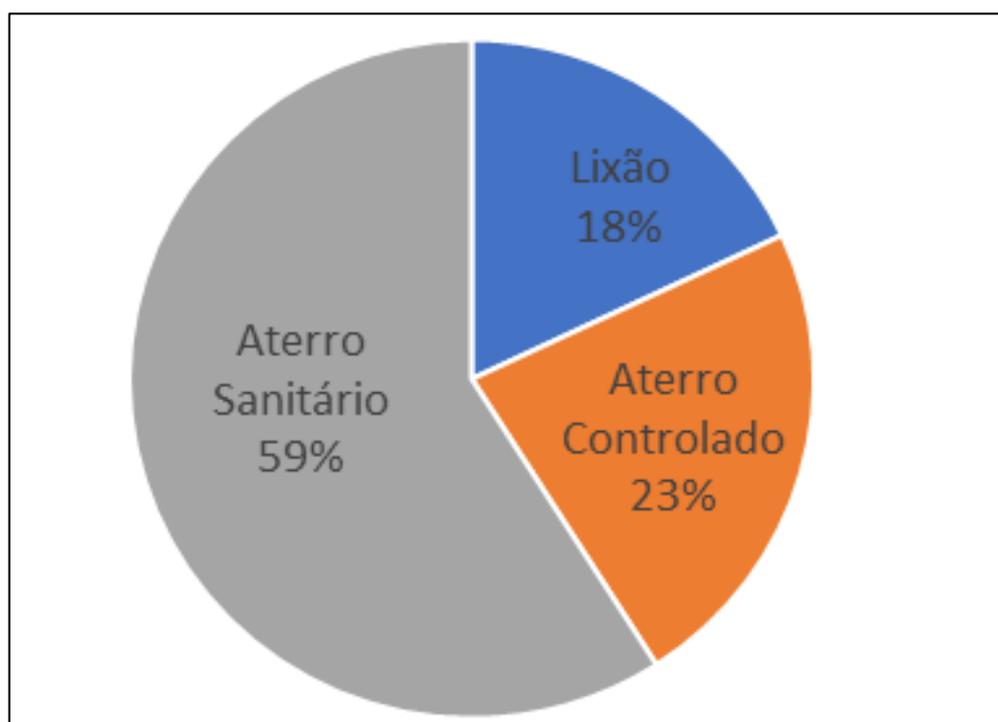


Figura 2 - Disposição final dos resíduos sólidos coletados no Brasil.
Fonte: Abrelpe, 2017 (adaptado).

A crescente preferência pelos aterros sanitários se dá ao fato de ser o meio de descarte ambientalmente correto utilizado. Segundo a norma da ABNT NBR 8419/1992 este método visa confinar os resíduos em menor área possível e obter uma maior redução do seu volume, com o intuito de minimizar os impactos ambientais sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente. Além de normas da ABNT, existem leis ambientais que regem a construção e controle dos aterros sanitários.

Sendo uma obra de engenharia com o objeto de tratar a decomposição final dos resíduos sólidos urbanos, os aterros sanitários devem ser construídos fora de áreas de influência direta em manancial de abastecimento público, distantes de rios, nascentes, e demais meios hídricos,

núcleos populacionais e residências isoladas. Além disso necessitam de sistemas de monitoramento de águas subterrâneas, tratamento de chorume, sistemas de impermeabilização e cobertura diária e com vida útil mínima de 10 anos. A disposição da construção de um aterro sanitário pode ser vista na Figura 3.

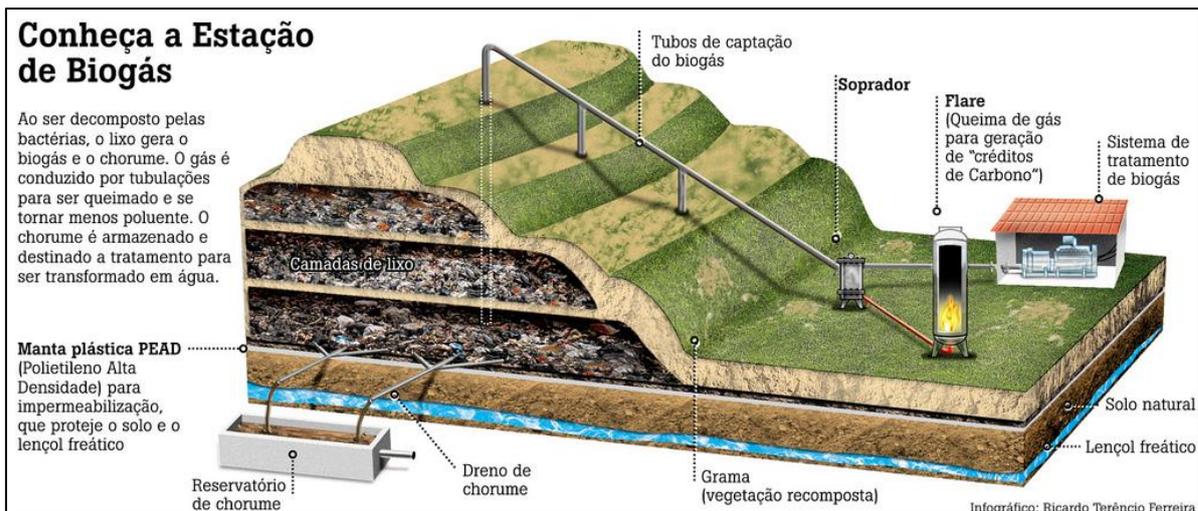


Figura 3 - Esquema de um aterro sanitário com estação de Biogás.

Fonte: VGRESÍDUOS (2017).

Pretendendo buscar uma nova destinação para os resíduos sólidos, surgem estudos de viabilidade técnica para obtenção de energia através do mesmo. Uma das formas de utilização de resíduos como combustível é através da sua queima levando a uma geração de calor, porém para que isso seja possível é necessário um sistema fechado com componentes que tornem este calor em energia. Uma solução para isto pode ser encontrada no sistema térmico de geração de potência utilizando o ciclo Rankine, ciclo Brayton ou Motores de combustão interna em prol da obtenção energia elétrica.

De modo a solucionar as questões ambientais e sociais, a proposta de uma abordagem diferente para a destinação dos resíduos sólidos que tanto prejudica o meio é de certo modo essencial para o equilíbrio da sustentabilidade. Desta forma, tem-se a proposta do uso de resíduos sólidos urbanos em máquinas térmicas de potência a fim de analisar a viabilidade técnica de seu uso e a melhor configuração para atendimento das expectativas de geração de energia elétrica. Dessa maneira chega-se a pergunta desse trabalho:

O uso de resíduos sólidos urbanos é tecnicamente viável em termos de eficiência energética?

1.2 Justificativa

De forma a envolver todos os pilares da sustentabilidade juntamente com a crescente geração de resíduos sólidos urbanos definida na norma ABNT NBR 10.004 da ABNT, se deu a preocupação de formas de descartes consciente sem afetar o equilíbrio entre sociedade e meio ambiente. Um dos modos de destinar esses resíduos é utilizando-os em sistemas térmicos visando a geração de energia.

A composição dos resíduos sólidos urbanos depende da situação socioeconômica, das condições e hábitos de vida de cada um. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é considerada um marco para o setor de resíduos no Brasil, apoiando mudanças necessárias para o controle das destinações, entre os pontos relevantes podem ser destacados os encerramentos dos lixões e a destinação final correta até 2014, elaboração de planos municipais visando o manejo adequado dos resíduos, entre outras como destaca o atlas brasileiro de emissões GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos pela Abrelpe. Ao buscar um melhor tratamento dos resíduos e a destinação de embalagens para reciclagem se dá a classificação para a separação da seguinte forma: matéria orgânica, papel e papelão, plásticos, vidros, metais e outros.

A motivação do entendimento aprofundado e ao acesso a energia limpa se dá ao fato da evolução japonesa ter se tornado tão eficiente no setor de geração de energia através de resíduos sólidos. Segundo um estudo realizado pelo Instituto de Estratégias Globais de Meio Ambiente do Japão, atualmente existem grandes lacunas para melhorias no MDL (Mecanismo de desenvolvimento limpo) e para promover reduções de emissões adicionais, bem como para auxiliar o desenvolvimento sustentável dos países em desenvolvimento.

Diante dos argumentos apresentados a utilização dos resíduos sólidos como combustível para um sistema térmico de geração de energia é justificável.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar a incorporação das análises técnicas de três estudos de caso envolvendo sistemas de geração de energia utilizando resíduos sólidos urbanos destinados aos aterros sanitários como combustível com vistas à sustentabilidade.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica acerca de ciclo Rankine, ciclo Brayton, motores de combustão interna, geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos e sustentabilidade.
- Identificar e fundamentar as variáveis de operação do sistema de geração de energia usando os resíduos sólidos urbanos.
- Detalhar os ciclos termodinâmicos.
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar os instrumentos de coleta e tabulação de dados obtidos.
- Analisar três estudos de caso com o uso de resíduos sólidos urbanos.
- Recomendar trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa juntamente com os objetivos gerais e específicos. No segundo, faz-se a fundamentação teórica de todos os temas abordados no trabalho, tais como: sustentabilidade; aterro sanitário; geração de energia; Ciclo Rankine, Ciclo Brayton, motores de combustão interna e análise termodinâmica. Posteriormente, é apresentada a metodologia utilizada para a pesquisa em questão. No penúltimo capítulo, são feitas as discussões e resultados encontrados a partir das análises dos estudos de caso realizados. E por fim, o trabalho é encerrado com as suas respectivas conclusões e recomendações futuras de trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica de alguns conceitos e equipamentos abordados neste trabalho, dentre eles, sustentabilidade, resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário, produção de energia, ciclo Rankine, ciclo Brayton e motores de combustão interna.

2.1 Sustentabilidade

O surgimento de novas técnicas produtivas se deu através da revolução industrial e tecnológica que tomou conta do mundo nos últimos três séculos, levando ao aumento da capacidade de produção de forma acelerada. A ampliação do modelo de produção culminou em efeitos colaterais para a sociedade, como a discussão sobre impossibilidade de subsistência. Desta forma, essa sociedade esteve vinculada a problemas como concentração de riquezas, desigualdade social, desemprego, prejuízos ambientais e principalmente questões referentes à possibilidade de subsistência (OLIVEIRA, 2012).

Desde então, com a finalidade de alinhar as formas de desenvolvimento com a melhora da intenção humana com o meio ambiente e a sociedade, estudos e pesquisas surgiram. Em 1968 o Clube de Roma foi criado para discutir assuntos relacionados a política, economia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável por intelectuais e estudiosos (OLIVEIRA, 2012).

O desenvolvimento sustentável possui varias vertentes, onde diferentes definições são adotadas para o mesmo termo. Segundo os ambientalistas o desenvolvimento sustentável são transformações que ocorrem em relação ao consumo e produção, com intuito de reverter a degradação ambiental e a miséria social. Já para a CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina) trata-se de um progresso da competitividade mundial, onde o meio ambiente é considerado um meio econômico afim de assegurar o desenvolvimento e a manutenção do meio, sendo o ser humano o capital humano (ARAÚJO *et. al.*, 2004).

A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento definiu desenvolvimento sustentável como sendo:

“Desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades (RELATÓRIO BRUNDTLAND, 1991, página 46)”.

E citou os nove princípios para se alcançar o desenvolvimento sustentável, sendo o principio fundamental respeitar e cuidar da comunidade dos seres vivos. Seguidos pelos critérios de sustentabilidade que são: melhorar a qualidade de vida humana, conservar a

vitalidade e a diversidade do Planeta Terra, minimizar o esgotamento de recursos não-renováveis, permanecer nos limites de capacidade de suporte do Planeta Terra. Finalizando com os meios para se chegar a sustentabilidade descritos por: modificar atitudes e praticas pessoais, permitir que as comunidades cuidem de seu próprio ambiente, gerar uma estrutura nacional para integração de desenvolvimento e conservação e constituir uma aliança mundial (PCN, 2001).

Além desta definição, conceitos-chaves também foram abordados pela Comissão (CMMAD, 1998) sendo eles: o conceito de necessidades básicas dos pobres de todo o mundo e o conceito de limitação dos recursos naturais, acarretando um déficit às necessidades futuras. A partir desta evolução e construção conceitual, sustentabilidade ficou definida como três pilares relacionados de forma que a interação entre dois dos três resultasse em novas condições, como pode ser visto na Figura 4 (OLIVEIRA, 2012).

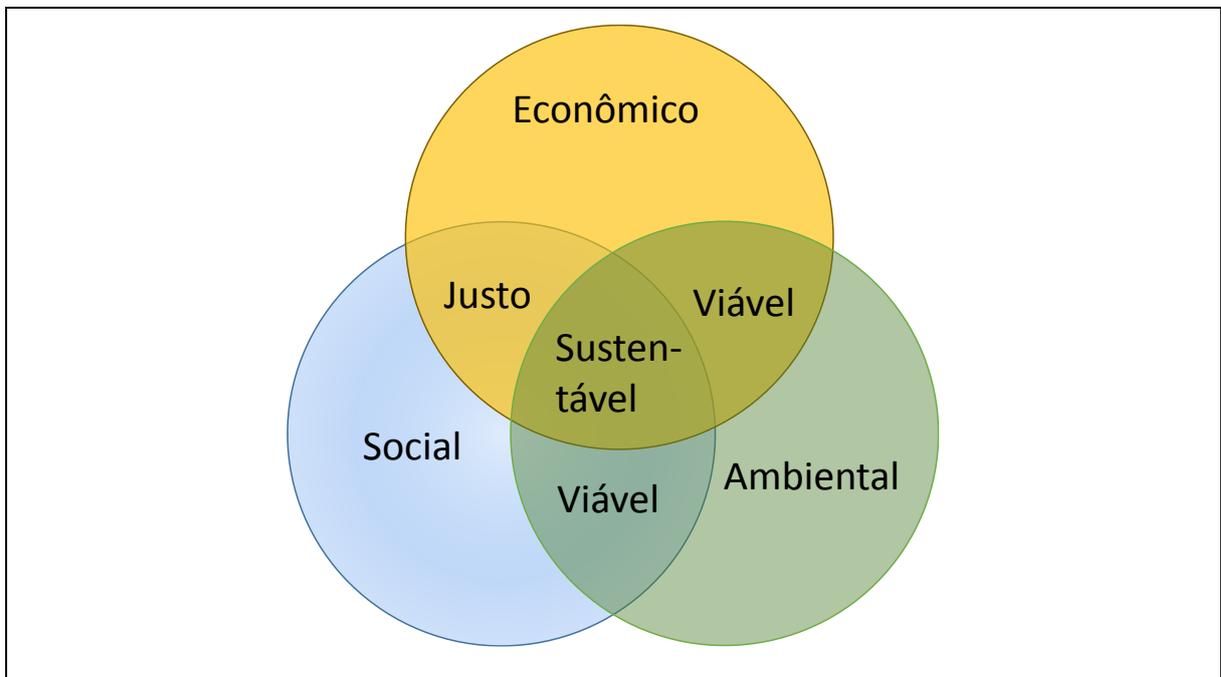


Figura 4 - Sustentabilidade e as suas dimensões.
Fonte: Oliveira, 2012 (adaptado).

Detalhando os três pilares da Figura 4, tem-se o econômico, como finalidade a organização financeira e material direcionada aos negócios; ambiental, refere-se ao capital natural de um empreendimento ou sociedade; social, se refere ao capital humano, sendo ele a sociedade e a comunidade; formando assim a base da sustentabilidade. Nota-se uma interação entre os pilares, onde a economia necessita do capital humano e tem como preocupação o crescimento de forma ambientalmente correta.

Segundo Araújo *et. al.* (2004) uma atividade sustentável é aquela que pode ser mantida por um longo período indefinido, onde mesmo com o surgimento de imprevistos não se esgota nunca. O conceito de sustentabilidade, se tratando de uma sociedade sustentável, não coloca em risco os recursos naturais como o ar, a água, o solo e a vida vegetal e animal. Sendo desta forma o desenvolvimento sustentável aquele que melhora a qualidade da vida do homem na terra e respeita a capacidade de produção do ecossistema, usando de forma eficiente o potencial dos recursos existentes.

Os modelos empresariais tradicionais visam lucros por meio de práticas que em sua maioria exploram e afetam a sociedade, o meio ambiente e a economia, deixando de lado suas responsabilidades sociais. No entanto, políticas internas possibilitam práticas sustentáveis nos negócios melhorando desta forma a reputação corporativa e agregando valor dessa forma a organização. Com o aumento da produção em prol de atender as exigências da sociedade atual acarretam uma preocupação ambiental, social e econômica quanto ao aumento da utilização de insumos e principalmente ao descarte correto dos resíduos ao fim no processo produtivo (PEREIRA *et. al.*, 2018).

A sustentabilidade empresarial trata-se de um conjunto de políticas e ações, voltadas para aplicações nas operações e produtos de uma empresa com o intuito de serem economicamente sustentáveis e socialmente responsáveis. Esta preocupação se deu tardiamente, após a consequência de impactos negativos do desenvolvimento econômico, industrial e comercial. Atualmente a sustentabilidade é um dos temas incorporados no planejamento estratégico de empresas que buscam uma colocação de reconhecimento no mercado (MENDES, 2018).

2.2 Resíduos Sólidos Urbanos

A gestão ambiental busca manter o equilíbrio entre a natureza e sociedade, sendo caracterizada por um conjunto de procedimentos que visam a harmonização entre o desenvolvimento das sociedades humanas e qualidade ambiental. Visando gerir esse sistema, ferramentas de análise são usadas para monitorar a coleta, o tratamento e a disposição final dos resíduos sólidos (POLI *et al.*, 2014).

No que se refere a resíduos sólidos, em 2010 foi aprovada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei 12.305/2010, sendo definida como:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semissólidos, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível” (PNRS, 2010, p.3).

Silva (2017) apresenta estimativas que apontam uma geração de resíduos sólidos no Brasil em torno de 160 mil toneladas diárias, sendo de 30% a 40% possíveis de se aproveitar e reciclar. Os dados ainda apontam as composições dos resíduos descartados, obtendo 57,41% de matéria orgânica, 16,49% de plástico, 13,16% de papel e papelão, 2,34% de vidro, 1,56% de material ferroso, entre outros materiais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010) classifica os resíduos gerados de diversas atividades como resíduos sólidos urbanos, de domicílios e limpeza urbana; resíduos de estabelecimentos comerciais; resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; resíduos da construção civil; resíduos agrossilvopastoris; resíduos dos serviços de transportes e resíduos de mineração. A distinção dos resíduos é de extrema importância devido a forma de tratamento dado a cada um quanto a coleta, transporte e destinação final.

A coleta e o transporte são um dos focos da gestão de resíduos sólidos, principalmente em áreas urbanas. Estima-se que 90% dos domicílios urbanos disponham de coleta direta, enquanto apenas 72% da área rural possuem esse sistema. Dentre as regiões brasileiras, a região sudeste é a que maior atende à demanda de coleta e as regiões Norte e Nordeste possuindo menor taxa. Levando em consideração o estilo de vida nas zonas rurais este valor se torna coerente devido a destinação da fração orgânica dos resíduos a utilização para alimentação animal ou decomposição no solo, onde tem-se a degradação naturalmente (PNRS, 2014; DRSU, 2012).

O desenvolvimento econômico resultante da revolução industrial tornou a sociedade mais consumista, aumentando dessa forma a demanda de produtos e recursos naturais para produção de alimentos e energia. Esse fato resultou no crescimento dos resíduos gerados. Desta forma, a preocupação com o descarte correto para que não ocorra problemas de poluição ao meio tem se tornado tema pertinente para a reformulação do processo em busca de oferecer destinação correta aos resíduos no fim da cadeia produtiva (DAMICO *et. al.*, 2018).

Segundo a Lei no 12.305/2010 define, em seu Artigo 3º:

Destinação final ambientalmente adequada, a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária (SUASA), entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (PNRS, 2010a).

A destinação final dos resíduos gera preocupação a todos os setores ambientais do país, pois, sendo realizada de forma incorreta, pode gerar problemas gravíssimos no âmbito da sustentabilidade. Alguma das formas de tratamento e destinação dos resíduos sólidos segundo VGResíduos (2017) são:

- a) Compostagem:* ocorre por um processo controlado de decomposição microbiana, transformando matéria orgânica em adubo ou em ração animal. Utilizado quando possuem maior quantidade de parte orgânica no conjunto do resíduo sólido.
- b) Co-processamento em fornos de cimento:* caracterizada pela queima dos resíduos em fornos de cimento com temperatura superior a 1200°C, sendo reaproveitado como energia, onde será considerado como combustível ou também como substituto de matéria prima.
- c) Reciclagem:* é considerado uma das formas mais corretas de destinação, onde será possível a separação dos resíduos sólidos para ser transformado em novos produtos, envolvendo alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas.
- d) Incineração:* apesar do elevado custo de operação e manutenção, é considerado um dos mais adequados. Os resíduos sólidos são submetidos a uma decomposição térmica, com o objetivo de reduzir seu volume.
- e) Aterro comum ou lixão:* os resíduos são dispostos sobre o solo sem nenhuma medida de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública. Sendo considerada uma disposição de forma inadequada.
- f) Aterro controlado:* semelhante ao lixão, exceto pelo fato do recobrimento desses resíduos dispostos ao solo.

g) Aterro sanitário: possuindo o melhor controle dos resíduos, se tornou o mais utilizado devido ao domínio perante as questões ambientais e de saúde pública. Com sistemas de monitoramento e proteção ao solo, saída de gás, entre outros.

A discussão socioambiental referente ao descarte final de resíduos sólidos tem se tornado tema essencial nas políticas públicas das organizações empresariais, de modo a defender os interesses sociais, econômicos e ambientais. Questões sobre alternativas de reaproveitamento de resíduos tem sido levantada a fim de sanar as dificuldades enfrentadas pelo excesso de resíduos gerados no mundo e reduzir custos operacionais.

Algumas das principais razões de aproveitamento de resíduos são para utilização como combustível em sistemas de geração de energia; resíduos orgânicos empregados na adubagem; e reciclagem de papel, plástico, papelão, entre outros promovendo um ganho econômico.

2.3 Aterro Sanitário

Como forma de destinar os resíduos sólidos urbanos, o aterro sanitário vem se tornando um dos meios mais utilizados por ser ecologicamente correto. O aterro sanitário se baseia na técnica de disposição de resíduos ordenadamente, preocupa-se em não causar impacto negativo ao meio ambiente, a saúde e a segurança da população. Com os princípios da engenharia os resíduos sólidos urbanos são confinados a uma menor área, o que culmina na redução de seu volume (CETESB, 2013).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), norma NBR 8.419/1996, o aterro sanitário é definido por:

Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário. (1992, p. 62).

Portanto, o processo realizado no aterro sanitário é fundamentado nas técnicas ambientais de impermeabilização do solo e tratamento de chorume, compactação e cobertura diária dos resíduos, coleta e tratamento de gases, entre outros procedimentos. Toda essa preocupação se dá devido a problemas ambientais e de saúde pública como proliferação de

animais, exalação de mau cheiro, contaminação dos lençóis freáticos, surgimento de doenças e transtorno visual (POTELLA et. al., 2014).

Apesar de ser um dos métodos mais usado e melhor conceituado, enfrenta limitações devido ao crescimento populacional e de centros urbanos, consequentemente aumentando produção de resíduos sólidos descartados. Por isso, este sistema necessita estar associado a coleta seletiva e a reciclagem, gerando uma consciência ecológica e uma comoção da comunidade para preservação do meio ambiente (POTELLA et. al., 2014).

É necessário critério para implementação dos aterros de modo a atender as exigências normativas. Seu ciclo de vida se inicia na escolha adequada da área, prosseguindo para elaboração do projeto perante as leis e normas destinadas a construção e existência, licenciamento ambiental, realização do projeto licenciado, monitoramento ambiental e encerramento, após atingir a vida útil do projeto. O esquema de um aterro sanitário construído pode ser visto na Figura 5 (CETESB, 2016).

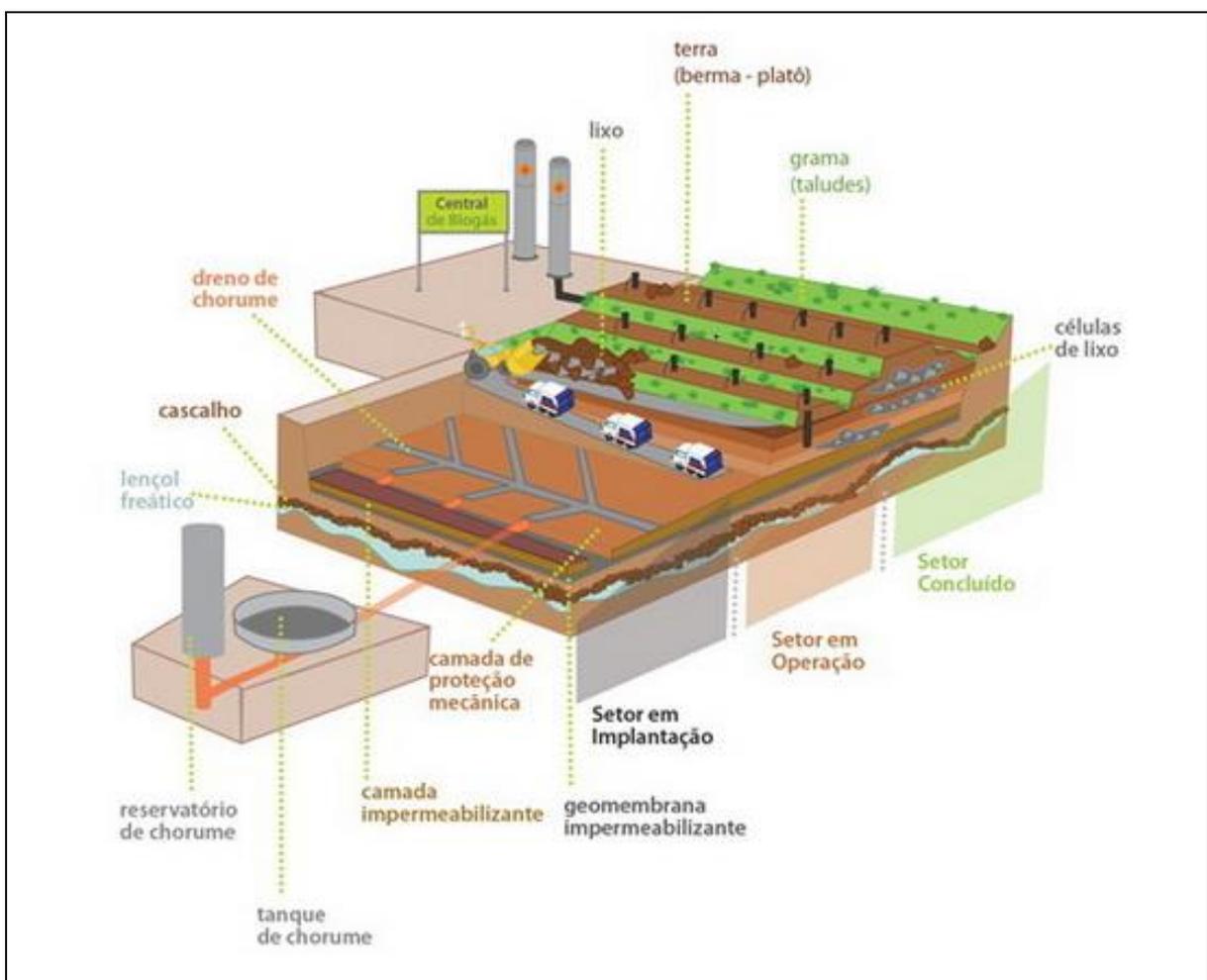


Figura 5 - Esquema de aterro sanitário.
Fonte: Portal RMC (2013).

Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (2006) a infraestrutura básica do aterro sanitário é composta de:

- **Guarita/Portaria:** local onde é realizada a recepção, inspeção e controle dos caminhões e veículos que chegam no aterro sanitário.
- **Balança:** pesagem dos veículos que entram, realizando controle diário e mensal do volume de resíduos.
- **Isolamento:** cerca com portões, isolando a área de operação, impedindo entrada de pessoas e animais.
- **Sinalização:** placas indicativas de advertência e áreas de risco.
- **Cinturão verde:** cerca viva com espécies arbóreas no perímetro da instalação.
- **Acessos:** vias externas e internas para locomoção.
- **Iluminação e força:** ligação a rede elétrica para funcionamento dos equipamentos.
- **Comunicação:** ligação a rede de telefonia e comunicações.
- **Abastecimento de água:** ligação a rede pública de abastecimento de água.
- **Instalações de apoio operacional:** composta por prédio administrativo contendo, no mínimo, escritório, refeitório, copa, instalações sanitárias e vestiários.
- **Área de disposição de resíduos:** local destinado ao aterramento dos resíduos, cumprindo as normas técnicas e ambientais vigentes, com sistemas de impermeabilização de base e das drenagens de chorume, de águas pluviais e de gases.
- **Sistema de tratamento de chorume:** sistema de tratamento do líquido proveniente dos resíduos.
- **Instrumentos de monitoramento:** equipamentos que controlam o funcionamento correto do aterro sanitário.

Os cuidados com a instalação devem ser considerados criteriosamente, pois problemas induzidos em instalações não criteriosas podem afetar gravemente a qualidade do sistema. São consideradas falhas de projeto, a contaminação das águas subterrâneas; potencialização de processos em sua estrutura, como erosão, escorregamento, assoreamento; elevação de custo com desapropriação, implantação, encerramento; entre outros (REIS, 2001).

2.4 Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás

O biogás por muito tempo foi considerado apenas um subproduto obtido pela decomposição de resíduos sólidos nos aterros sanitários. Porém o aumento dos preços dos combustíveis convencionais e a preocupação com a produção de energia através de fontes renováveis, fizeram que esse subproduto fosse considerado viável para produção de energia (FIGUEIREDO, 2011).

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos tem como objetivo realizar o aproveitamento energético do biogás pela degradação dos resíduos e convertê-lo em formas úteis de energia como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras e fogões, combustível veicular ou abastecer gasodutos com gás de qualidade. No entanto deve-se projetar um sistema de coleta, tratamento e queima padrão do biogás com poços de coleta, sistema de condução, tratamento, compressor e flare com queima controlada para garantir maior eficiência da queima do metano (MMA, 2019).

A produção do biogás é possível devido a grande variedade de resíduos orgânicos como resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lixo doméstico, entre outros. Sendo composto por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Essas porcentagens são variáveis de acordo com a composição do lixo, do tratamento empregado e da eficiência do processo, podendo chegar o biogás a conter entre 40% a 80% de metano (FIGUEIREDO, 2011).

Os fatores que influenciam a geração de biogás segundo Brito Filho (2005) são descritos a seguir:

- **Composição do resíduo:** quanto maior a porcentagem de material orgânico na composição do resíduo, maior será o potencial de produção de biogás no aterro.
- **Umidade:** as condições de umidade no aterro dependem de diversos fatores, como umidade com que o resíduo chega, o percentual de infiltração da água da superfície e do solo, da pluviosidade regional, além da água produzida durante a decomposição. Quanto maior umidade maior será a taxa de produção do biogás.
- **Tamanho das partículas:** quanto menor a umidade da partícula, maior será a área superficial, então a decomposição será mais rápida se comparada a uma partícula de menor área.

- **Idade do resíduo:** a geração do biogás num aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso (período que vai da disposição do resíduo até o início da geração do metano) e tempo de conversão (período que vai da disposição do resíduo até o término da geração do metano).
- **pH:** um pH abaixo de 6 ou acima de 8 está dentro de uma faixa ótima do metano e tem sua produção maximizada. Fora desse intervalo, a produção de metano fica estritamente limitada.
- **Temperatura:** as condições de temperatura influenciam nos tipos de bactérias e o nível de produção de gás. Temperaturas máximas são encontradas dentro de 45 dias após disposição dos resíduos. Altas temperaturas são resultados da atividade biológica. as temperaturas do gás produzido variam entre 30 e 60°.
- **Outros fatores:** nutrientes, bactérias, compactação de resíduos, dimensões do aterro, operações do aterro e processamento de resíduos variáveis.

Segundo MMA – Ministério do Meio Ambiente (2010), o regimento que vigora referente a produção de energia elétrica através de biogás como combustível para autoprodutores e produtores independentes diz que:

No caso do autoprodutor, a eletricidade gerada tem como finalidade atender, parcial ou totalmente, as necessidades de consumo do próprio produtor, podendo não obstante ser autorizada pela ANEEL a venda de eventuais excedentes de energia, na forma do inciso IV do art. 26 da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Assim, caso a municipalidade explore diretamente, a produção de eletricidade destinar-se-á a suprir parcial ou totalmente suas necessidades de consumo, não sendo objeto de comercialização, exceto no que tange à existência de eventuais excedentes que, sob a autorização prévia da ANEEL, poderão ser comercializados. No caso de terceiros, a produção igualmente destinar-se-á a suprir suas necessidades de consumo e eventualmente pode ser comercializado o excedente de produção de energia sobre o consumo.

No caso de produtor independente, a geração de eletricidade destina-se à finalidade de venda, seja no ACR - Ambiente de Contratação Regulada, seja no ACL - Ambiente de Contratação Livre.

Tanto o autoprodutor como o produtor independente, que utilizam fonte térmica (exceto nuclear), deve solicitar autorização à ANEEL, no caso de potência superior a 5.000 kW (5 MW), ou apenas comunicar à ANEEL, para registro, no caso de uma usina com capacidade reduzida (até 5.000 kW ou 5 MW), nos termos da Lei nº 9074/95 e observado o disposto na Resolução nº 390 de 15 de dezembro de 2009 (MMA, 2010).

Existem vários métodos para calcular a quantidade de metano gerado a partir de processos crus para processos que levam em conta parâmetros mais completos como condições climáticas, concentração de nutrientes no solo e composição de resíduos (CETESB, 2003).

A metodologia do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), é apresentada pela Equação (1). Essa metodologia é utilizada para o cálculo da emissão de metano a partir de resíduos sólidos em países ou regiões específicas.

$$\dot{Q}_{CH_4} = \frac{Pop_{urb} \times Taxa_{RSD} \times RSD_f \times L_0}{\rho_{CH_4}} \quad (1)$$

Sendo: \dot{Q}_{CH_4} a taxa de produção de metano [$m^3 CH_4 / ano$]; Pop_{urb} o número de habitantes em uma área urbana [habitantes]; $Taxa_{RSD}$ a taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano [kg de MSW / habitante.ano]; RSD_f a fração de resíduo que é depositado em locais de descarte de resíduos sólidos [%]; ρ_{CH_4} a massa específica de metano [kg/ m^3], que, para fins de cálculo, foi utilizado o valor 0,740 kg/ m^3 , para a temperatura de 25 ° C e 1 atm. L_0 é o potencial para gerar resíduos de metano [kg de CH_4 / kg de MSW] e pode ser calculado a partir de:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

Sendo: FCM o fator de correção do metano; COD a taxa de carbono orgânico degradável [kg de C / kg de MSW]; COD_f a fração de carbono degradável dissociada [%]; e F a fração volumétrica do metano no biogás [%].

Segundo o IPCC (1996), o fator de correção de metano (FCM) varia de acordo com tipo de lugar e seus índices são: aterro ou aterro sanitário inadequado (FCM de 0,4), aterros controlados (FCM de 0,8), aterros sanitários adequados ou aterro sanitário (FCM de 1,0) e aterros não classificados (FCM de 0,6). Já o cálculo da quantidade de carbono degradável (COD) baseia-se na composição de resíduos e na quantidade de carbono em cada componente da massa residual, esses índices podem ser verificados na Tabela 1 para alguns componentes.

Tabela 1 - Valores para quantidade de carbono degradável.

| Componente | COD (% em massa) |
|------------------------------|------------------|
| Papel/Papelão | 40 |
| Resíduo de parques e jardins | 17 |
| Matéria orgânica | 15 |
| Têxtil | 40 |
| Madeira | 40 |

Fonte: Pereira, 2017.

A taxa de carbono orgânico degradável (*COD*) é calculada a partir de (FONSECA, 2018):

$$COD = (0,40 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,40 \times D) + (0,30 \times E) \quad (3)$$

Sendo: A a fração de papel e cartão nos resíduos; B a fração de resíduos de parques e de jardins; C a fração de resíduo alimentar; D a fração de restos de tecidos; e E a fração de madeira dos resíduos sólidos urbanos.

A fração de *COD* dissociada (*COD_f*) denota para a fração de carbono disponível para decomposição bioquímica, e pode ser obtida a partir da Equação (4).

$$COD_f = 0,014 \times T + 0,28 \quad (4)$$

Sendo: T a temperatura na zona anaeróbia [°C].

Segundo Pereira et al. (2017) buscando um detalhamento da geração de metano em aterros, recomenda-se a utilização de metodologias que levem em consideração a geração de biogás ao longo dos anos. As metodologias utilizadas aqui são do IPCC e da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*): método de projeto e metodologia teórica de decomposição de primeira ordem. Ambos utilizam a constante de taxa de geração de metano (k). A constante de velocidade de geração de metano é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e especialmente umidade. Os valores de k são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Sugestão de valores para taxa de geração de metano.

| Zona boreal e zona de clima temperado | | | |
|---|-----------------------|--|-----------------------|
| Temperatura média anual $\leq 20^\circ\text{C}$ | | | |
| Seco | | Úmido | |
| Média de pluviosidade anual $< 1\text{mm}$ | | Média de pluviosidade anual $> 1\text{mm}$ | |
| Padrão: 0,05 | Extensão: 0,05 - 0,06 | Padrão: 0,09 | Extensão: 0,08 - 1,00 |
| Zona de clima tropical | | | |
| Temperatura média anual $\geq 20^\circ\text{C}$ | | | |
| Seco | | Úmido | |
| Média de pluviosidade anual $< 1000\text{ mm}$ | | Média de pluviosidade anual $> 1000\text{ mm}$ | |
| Padrão: 0,065 | Extensão: 0,05 - 0,08 | Padrão: 0,17 | Extensão: 0,15 - 0,20 |

Fonte. IPCC, 1996.

Quando em fase de projeto, é recomendado o método de projeto, pois ainda não é possível mensurar o fluxo anual de resíduos. O método é dividido na etapa onde o aterro recebe os resíduos de materiais e após o seu encerramento. Enquanto o aterro é aberto, o termo cinético ($e^{-k \cdot c}$) será igual a 1. Após o aterro ter sido fechado, este termo deve ser considerado. Assim, a equação (5) calcula a geração de metano durante o tempo de recebimento de resíduos e a equação (6) calcula a geração de metano após o fechamento do aterro sanitário.

$$\dot{Q} = F \times R \times L_0 \times (1 - e^{-k \times t}) \quad (5)$$

$$\dot{Q} = F \times R \times L_0 \times (e^{-k \times c} - e^{-k \times t}) \quad (6)$$

Sendo: \dot{Q} a taxa de geração de metano [m^3 de CH_4 / ano]; F a fração de metano no biogás [%]; R a taxa média anual de recebimento de resíduos durante a vida ativa do aterro [ton / ano]; L_0 o potencial de geração de metano [m^3 / tonelada de lixo]; k a constante de taxa de geração de metano [ano^{-1}]; c o tempo desde o encerramento dos locais de eliminação de resíduos sólidos [anos]; t o tempo desde que os locais de eliminação de resíduos foram abertos [anos].

A metodologia teórica de decaimento de primeira ordem considera a geração de metano proveniente de uma certa quantidade de resíduos depositados no ano "x". Como a quantidade depositada de resíduos sólidos a cada ano é variável, a quantidade de metano gerada em um determinado ano é igual à geração de resíduos depositados no ano "T" mais a geração de lixo depositado em anos anteriores ao ano referenciado "T" como mostrado na Equação (7).

$$\dot{Q}_T = F \times R_x \times K \times L_0 \times e^{-k \cdot (T-x)} \quad (7)$$

Sendo: \dot{Q}_T o total de emissões no ano T de resíduos eliminados em anos anteriores (incluindo o ano T) [m^3 / ano]; F a fração de metano em gás de aterro [%]; R_x a quantidade de resíduos depositados no ano x [kg]; k a constante de taxa de geração de metano [ano^{-1}]; L_0 o potencial de geração de metano [m^3 / tonelada de lixo]; T o ano atual; x o ano de entrada de resíduos.

A Equação (8) calcula a soma das correspondentes quantidades de resíduos de metano depositados no aterro a cada ano. Onde os resíduos eliminados anualmente (R_x) são variáveis e dependem da taxa de crescimento populacional, taxa de RSU produzida por habitante por ano e a porcentagem de resíduos que são recolhidos e depositados no aterro.

$$\sum \dot{Q}_T = F \times k \times L_0 \times \sum R_x \times e^{-k \cdot (T-x)} \quad (8)$$

Usando esta estimativa é possível definir as emissões de metano do aterro sanitário obtidas todo ano ao longo de seu tempo de abertura e depois de seu fechamento.

2.5 Produção de Energia

Dentro do panorama mundial a discussão por geração de energia limpa vem sendo difundida ao longo de eventos mundiais, com temas climáticos e ambientais, gerando mudanças nas políticas e reestruturação nas matrizes energéticas nacionais. Dentro deste contexto, algumas formas de geração de energia vêm sendo analisadas para a evolução na produção, destacando-se a hidrelétrica, biomassa, eólica, solar, geotérmica, oceânica, células de combustão a nitrogênio e a nuclear (PORTO et al., 2013).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui no total 7.102 empreendimentos de geração de energia em operação, produzindo 159.745.060 kW de potência instalada. Desta forma, pode-se observar a distribuição da produção pelas diferentes formas de geração de energia através da Tabela 3.

Tabela 3 - Potência Fiscalizada de Empreendimentos em operação.

| Tipo | Quantidade | Potência outorgada (kW) | Potência Fiscalizada (kW) | % |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------|
| Usina Hidrelétrica | 218 | 101.892.288 | 96.414.820 | 60,16 |
| Usina Termelétrica | 3001 | 42.987.490 | 41.337.216 | 25,79 |
| Central Geradora Eólica | 544 | 13.393.439 | 13.370.643 | 8,34 |
| Pequena Central Hidrelétrica | 427 | 5.145.259 | 5.117.517 | 3,19 |
| Usina Termonuclear | 2 | 1.990.000 | 1.990.000 | 1,24 |
| Central Geradora Solar Fotovoltaica | 2255 | 1.349.373 | 1.349.373 | 0,84 |
| Central Geradora Hidrelétrica | 692 | 689.477 | 688.479 | 0,43 |
| Central Geradora Undi-elétrica | 1 | 50 | 50 | 0 |
| Total | 7140 | 167.447.376 | 160.268.098 | 100 |

Fonte: BIG, 2018 (adaptado).

Analisando os dados da Tabela 3, nota-se que a maior fração da produção está localizada nas usinas hidrelétricas, entregando um total de 96.414.820 kW, totalizando 60,16% da produção. Sendo a segunda na porcentagem absoluta as usinas termelétricas com 25,79%, seguida das centrais geradoras eólicas obtendo 8,34%. Sendo as demais porcentagens compostas pelas demais fontes geradoras apresentadas.

As usinas hidrelétricas usam o fluxo de água como combustível para geração de energia elétrica, com o intuito de aproveitar a força da água em quedas de rio estuda-se o melhor local para a construção da mesma. Para a elaboração do empreendimento é necessário levar em conta o protejo de engenharia, os impactos ambientais e social na região, além da viabilidade econômica. A concepção inclui desvio do fluxo do rio, criação do reservatório onde ocorrerá o desague para movimentação das turbinas, que estão conectadas aos geradores, podendo assim armazenar a energia elétrica convertida da mecânica. Sua classificação devida à capacidade é determinada por centrais geradoras hidrelétricas com até 1 MW de potência instalada, pequenas centrais hidrelétricas com potência instalada entre 1,1 MW e 30 MW e por último a usina hidrelétrica de energia suportando potência instalada superior a 30 MW (ANEL, 2018).

Uma das principais inovações no setor de produção de energia limpa são as Centrais Geradoras Eólicas, onde sua geração ocorre pela conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação proveniente do vento, com o auxílio de turbinas eólicas, para geração de eletricidade. Nos primórdios da civilização se fazia presente o uso da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grão e outras aplicações envolvendo energia mecânica. Atualmente a energia eólica vem sendo utilizada como o movimento de pás nas turbinas pelo vento, gerando energia elétrica limpa e de fonte renovável (FERREIRA, 2011).

Mundialmente falando, é considerada a fonte de energia promissora para substituir a energia proveniente dos combustíveis sólidos, o cenário geral pode ser observado na Figura 6 mostrando os 10 países com maior potência instalada no ano de 2009 (ANEL, 2018; FERREIRA, 2011).

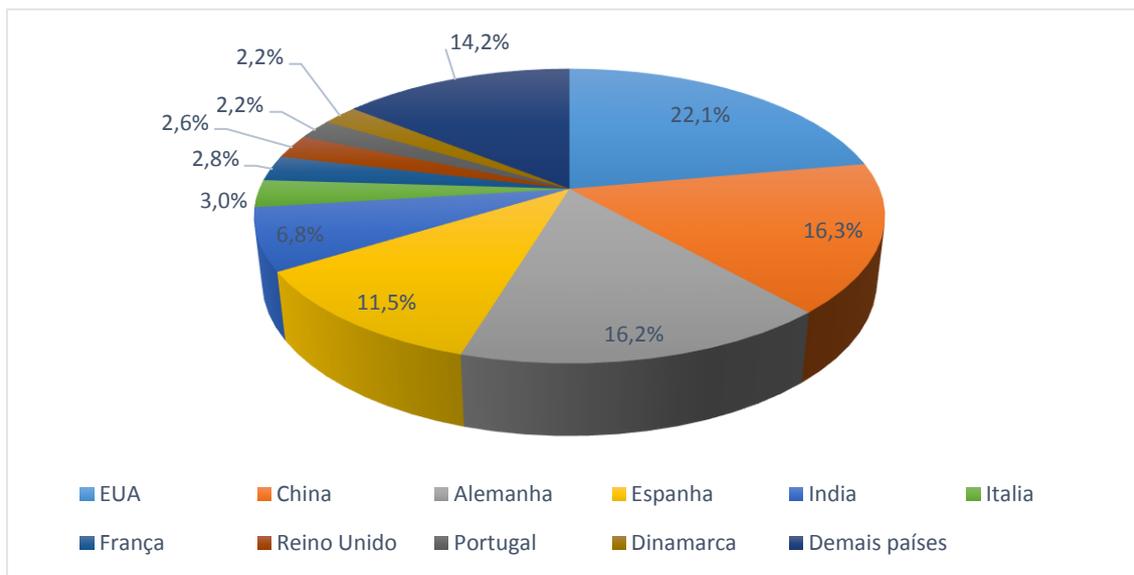


Figura 6 – Dez países com maior potência instalada.

Fonte: Ferreira, 2011 (adaptado).

Novos estudos buscam formas viáveis e eficientes de ampliação na produção de energias renováveis, sendo um deles a queima de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica.

Chamadas de usinas de recuperação de energia, as centrais de queima de resíduos sólidos é uma alternativa sustentável para o problema do lixo mundial, reduzindo drasticamente o volume de resíduos e através do calor de queima transformado em energia renovável. Sua implantação influencia diretamente na redução de emissões com transporte, disposição em aterros e lixões, além do incentivo do reuso e reciclagem (ABES, 2015).

Inicialmente o aproveitamento de resíduos sólidos para geração de energia elétrica se deu pelo uso do biogás produzido nos aterros sanitários, no entanto uma outra forma de combustível para geração de energia é a incineração dos resíduos previamente selecionados através da coleta seletiva. Dois fatores positivos podem ser apontados como motivação para incineração de resíduos sólidos, sendo eles: a combustão reduz o volume de resíduos em 90 a 95% e o calor oriundo da combustão possibilita a geração de energia elétrica. Porém um aspecto negativo que deve ser tratado com bastante atenção é a liberação de gases prejudiciais ao meio provenientes da incineração (ARRIGONI *et. al.*, 2015).

Cada país possui sua forma de tratamento de resíduos, sendo uns mais eficientes e destinados a reutilização. A Alemanha é considerada a campeã em reciclagem em aproveitamento, atualmente o índice de envio de resíduos a aterros sanitários é inferior a 1%,

em dados obtidos no ano de 2011 constatou-se que 63% de todos os resíduos urbanos foram reciclados, e de 8 a 10 quilos do resíduo não reaproveitado serão incinerados, gerando energia. Já no Japão existem mais de 1,2mil plantas de usinas de incineração em atividade, possuindo um alto controle de poluição e eficiência energética (SENADO FEDERAL, 2018).

2.6 Ciclo Rankine

Com o intuito de comprovar o possível rendimento aceitável de fontes de calor pela queima de resíduos sólidos urbanos com objetivo de produzir energia elétrica, o ciclo Rankine convencional é estudado de forma mais detalhada.

Segundo Çengel (2013), o ciclo Rankine é considerado um ciclo de potência a gás nos quais os fluidos de trabalho permanecem como gás durante todo o ciclo. A Figura 7 mostra este ciclo e o diagrama T-s. O ciclo ideal não possui reversibilidade interna, consistindo de um sistema fechado onde as etapas são:

- (1 \Rightarrow 2): expansão isentrópica em uma turbina
- (2 \Rightarrow 3): rejeição de calor a pressão constante em um condensador.
- (3 \Rightarrow 4): compressão isentrópica em uma bomba.
- (4 \Rightarrow 1): Fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira.

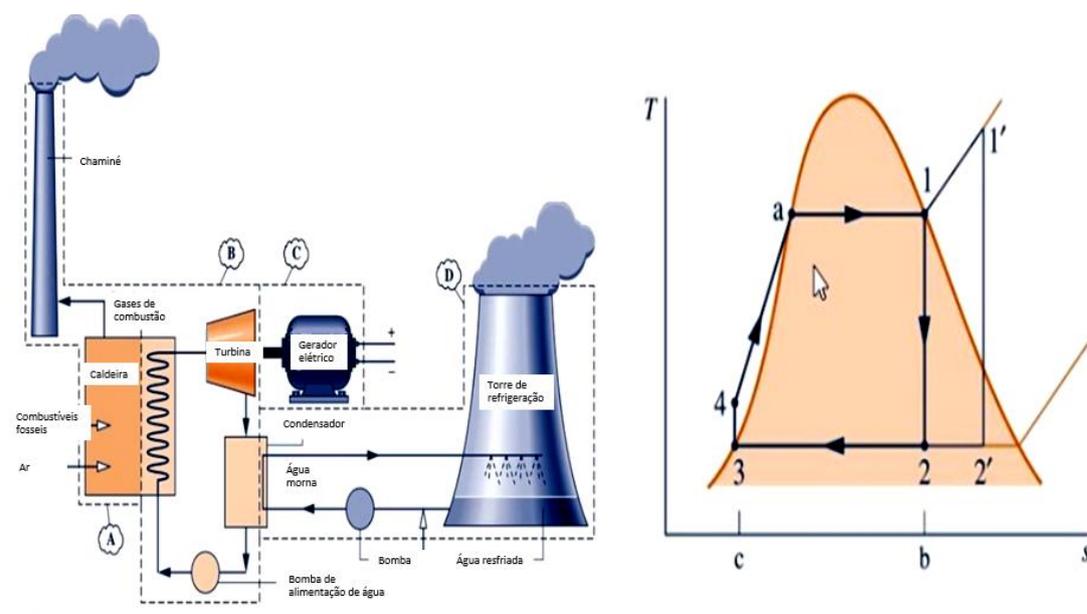


Figura 7 - Ciclo Rankine ideal
Fonte: Mantegazza *et al.* (2017).

Segundo Moran *et al.* (2013), levando em consideração que os equipamentos do Ciclo Rankine estão em regime permanente, utiliza-se o princípio de conservação da energia (primeira lei da termodinâmica) para desenvolver expressões a partir da equação geral:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (9)$$

A partir da caldeira, o vapor tem sua temperatura e pressão elevadas, sendo expandida ao longo da turbina para produzir trabalho. Em seguida, o vapor é descarregado no condensador com pressão consideravelmente baixa. O balanço da taxa de energia na turbina é (MORAN *et al.*, 2013):

$$\dot{W}_{turbina} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (10)$$

Sendo: $\dot{W}_{turbina}$ a potência produzida pela turbina, \dot{m} a vazão mássica do fluido de trabalho e h_3 e h_4 a entalpia específica de entrada e saída da turbina, respectivamente.

No condensador, o vapor é condensado por meio de um fluido de arrefecimento (geralmente água de resfriamento, em que a temperatura da água de resfriamento aumenta), ocorrendo assim a transferência de calor do fluido quente ao fluido frio. Assim, o balanço da taxa de energia do condensador é (MORAN *et al.*, 2013):

$$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (11)$$

Sendo: $\dot{Q}_{condensador}$ o calor liberado no processo de condensação.

O líquido que deixa o condensador é bombeado para a caldeira a uma pressão mais elevada. Considerando o volume de controle ao entorno da bomba e desconsiderando a transferência de calor para a viziança, o balanço da taxa de energia fornecem (MORAN *et al.*, 2013):

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (12)$$

Sendo: \dot{W}_{bomba} é a potência de entrada que passa pela bomba.

Desta forma o fluido de trabalho completa o ciclo quando o líquido deixa a bomba e alimenta a caldeira, e então é aquecida até a saturação e evapora na caldeira. O balanço da taxa de energia fornece (MORAN *et al.*, 2013):

$$\dot{Q}_{caldeira} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (13)$$

Sendo: $\dot{Q}_{caldeira}$ a transferência de calor da fonte de energia para o fluido de trabalho da caldeira.

Através da eficiência térmica é possível definir a quantidade de energia fornecida ao fluido de trabalho. Utilizando as equações já determinadas, a eficiência térmica do ciclo de potência fica (MORAN *et al.*, 2013):

$$\eta = \frac{W_{turbina}/\dot{m} - W_{bomba}/\dot{m}}{Q_{caldeira}/\dot{m}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (14)$$

Em relação aos ciclos ideais, os ciclos reais sofrem com perdas importantes originárias de turbinas, bombas, tubulações e condensador como ilustrado na figura 8. As perdas nas turbinas representam a maior perda de desempenho do ciclo real em relação ao Ciclo Rankine ideal, sendo devidas ao escoamento do fluido de trabalho pelos canais e palhetas da turbina e transferência de calor para o ambiente. A Figura 8 mostra ainda as diferenças entre o processo real e ideal, onde o ponto 4 representa o estado real do vapor na saída da turbina, não sendo um processo isoentrópico como no ciclo ideal. O sistema de controle também pode acarretar em perdas na turbina, se usado um processo de estrangulamento para controlar a turbina (BORGNAKKE *et al.*, 2009).

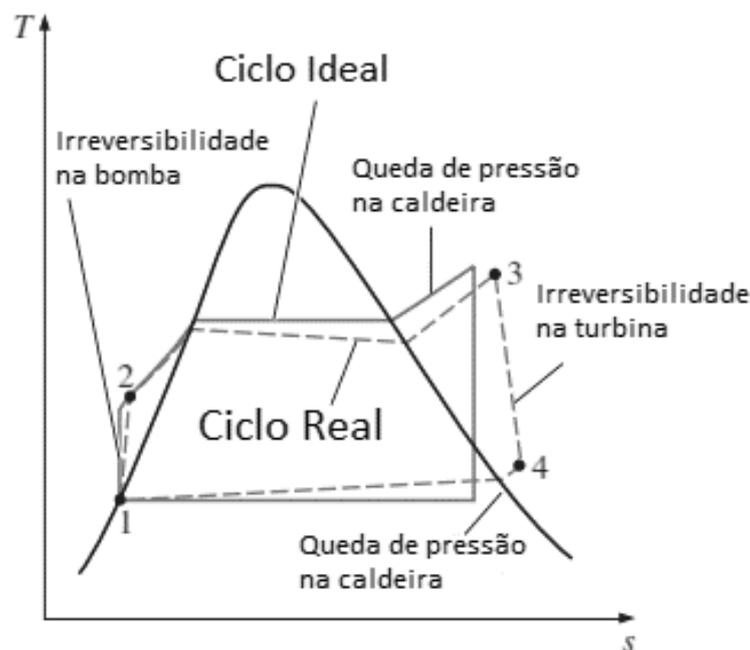


Figura 8 - Desvios do ciclo real de potência a vapor do ciclo Rankine ideal.
 Fonte: Çengel, 2006.

As perdas na bomba são semelhantes as ocorridas na turbina, associadas principalmente ao escoamento do fluido. O diagrama T-s indicado na figura 9 mostra também a diferença entre os ciclos, onde o processo ideal é representado pelo ponto 2s e o real pelo ponto 2, não sendo isoentrópica no caso real. Nota-se que as perdas na bomba são menores devido a potência utilizada no acionamento das bombas ser muito menor que a potencia produzida nas turbinas (BORGNAKKE *et al.*, 2009).

Nas tubulações as perdas mais importantes são devido a queda de pressão provocada pelo atrito, e a transferência de calor ao ambiente. Já no condensador as perdas são ainda mais baixas, ocorrendo no resfriamento abaixo da temperatura de saturação do liquido que deixa o candesador (BORGNAKKE *et al.*, 2009).

2.7 Caldeira de Grelha – *Mass Burning*

Consiste na técnica mais comum de recuperação de energia através de resíduos, utilizando-se de uma caldeira com fornalha de queima em grelha com a função de transformar os resíduos sólidos urbanos em vapor para geração de energia elétrica posteriormente, sendo possível realizar a queima total. As matérias ainda não são misturadas sem que ocorra uma separação dos materiais recicláveis, sendo necessário somente a retirada de matérias de grande porte previamente (ITÔ, 2014).

Antigamente essas caldeiras, chamadas de incineradores operavam em baixas temperaturas e sem controle de poluição atmosférica, sendo dessa forma fonte poluidora. Atualmente esse cenário já é diferente, eles estão adequados as normas ambientais e sem prejudicar o meio ambiente e a saúde humana. Pode ser visto na Figura 9 uma planta típica do processo “*Mass Burning*” (SAMPAIO, 2014).

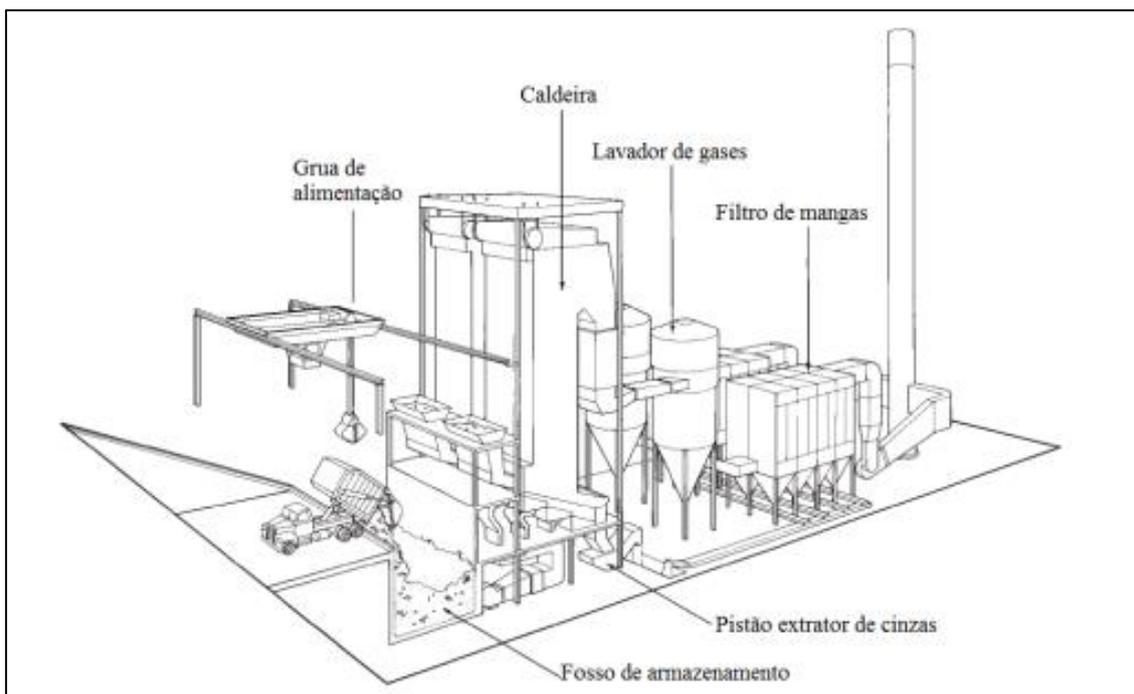


Figura 9 - Planta de queima de resíduos pelo processo *Mass Burning*.
Fonte: Sampaio, 2014.

O funcionamento da planta consiste em uma área que possibilita os caminhões manobrar e descarregar o lixo no fosso de armazenamento. Esse fosso de armazenamento tem capacidade para operar vinte e quatro horas por dia por dia e sete dias por semana. O operador da grua de alimentação auxilia no abastecimento da caldeira com os resíduos armazenados, buscando uma eficiência de combustão maior e diminuição da emissão de odores a temperatura de combustão é definida entre 815°C a 1095°C. Para garantir a remoção dos compostos nocivos a saúde e ao meio ambiente os gases passam por um lavador de gases e um filtro de mangas (SAMPAIO,2014).

A EPA (2007) assegura que a seleção de dimensões e tipos adequados de caldeiras para o combustível usado influencia diretamente na instalação bem sucedida do equipamento requerido. A classificação das caldeiras refere-se aos diferentes métodos de adição e distribuição do combustível. Havendo dois tipos de sistema – caldeiras de alimentação superior (*Overfeed*) que alimentam o combustível por cima da grelha e o ar por baixo das grelhas, e caldeiras de alimentação inferior (*Underfeed*) que alimentam tanto o combustível quanto o ar por baixo da grelha.

As caldeiras *overfeed* são divididas em dois tipos, sendo classificadas pela forma que o combustível é distribuído e queimado, podendo ser de alimentação mássica (*mass-feed*) ou

espalhador (*Spreader*). No tipo *mass-feed* é introduzido combustível continuamente em uma das extremidades da grelha, tendo seu caimento diretamente por gravidade. De modo a controlar a quantidade de combustível é possível ajustar a velocidade de alimentação ou controlar a garganta onde ocorre a alimentação se abrindo ou se fechando. Já as caldeiras do tipo *spreader* possui uma maior versatilidade, sendo assim mais comumente utilizada. Sendo capazes de distribuir o combustível de forma uniforme e a uma profundidade uniforme em relação a superfície da grelha que utiliza de um mecanismo impulsionando as partículas individuais de combustível para o ar acima da grelha (ORNL,2002; EPA, 2007).

As caldeiras *underfeed* são mais utilizadas para combustível relativamente seco e tem como característica empurrar o combustível para o fundo da camada enquanto o calor causa combustão completa e neste momento sobe para o topo da camada como cinzas e é então descartado. Assim como a anterior também possui dois tipos básicos, sendo eles a alimentação horizontal com descarregador de cinzas lateral e alimentação por gravidade com descarregador de cinzas traseiro. Na Figura 10 é apresentado uma caldeira tipo *underfeed* com descarregador de cinzas lateral, sendo possível identificar componentes da mesma (EPA,2007; ORNL,2002).

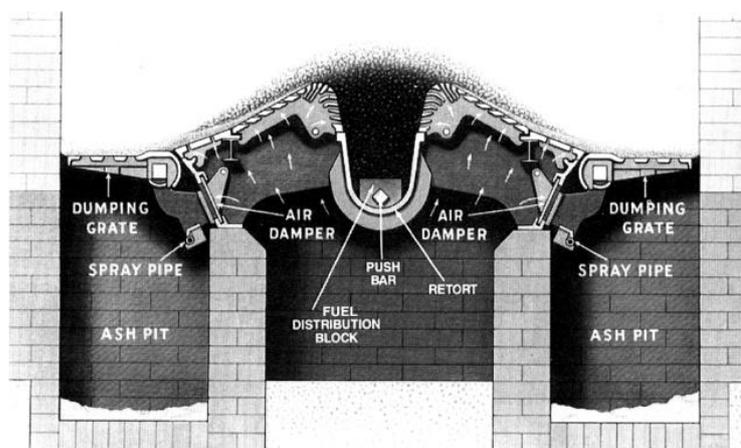


Figura 10 - Seção de uma caldeira tipo *underfeed* com descarregador de cinzas lateral.
Fonte: ORNL, 2002.

2.8 Turbina a Gás

As turbinas a gás pertencem ao grupo de motores de combustão interna e opera em uma faixa que varia de pequenas potências como 100 kW até grandes potências como 180 MW. Possui como principais vantagens quando comparada a outras máquinas térmicas o seus

pequenos peso e volume, diminuindo o espaço ocupado. Considera-se o uso como uma turbomáquina possuindo a vantagem sobre os motores de combustão interna devido a ausência de movimento alternativo e de atrito entre as superfícies metálicas (MENESES, 2011).

As turbinas são dispositivos que geram potência devido a passagem de um fluido de trabalho escoando através de uma serie de pás colocadas em um eixo que se encontra livre e gira. As instalações podem operar de modo aberto ou fechado. O modo aberto é o mais comum e possui como principio de funcionamento um motor onde o ar atmosférico é encaminhado para um compressor, sendo comprimido até a elevação da pressão. O ar então é lançado na câmara de combustão, ocorrendo a mistura com o combustível e ocorrendo o processo de combustão, gerando um produto de temperatura elevada. Esses produtos da combustão se expandem através da turbina e são lançados para as vizinhanças. Parte do trabalho ali produzido é usado no acionamento do compressor e o restante fica disponível para geração de eletricidade. Este processo pode ser visto na Figura 11 (Moran et al., 2013).

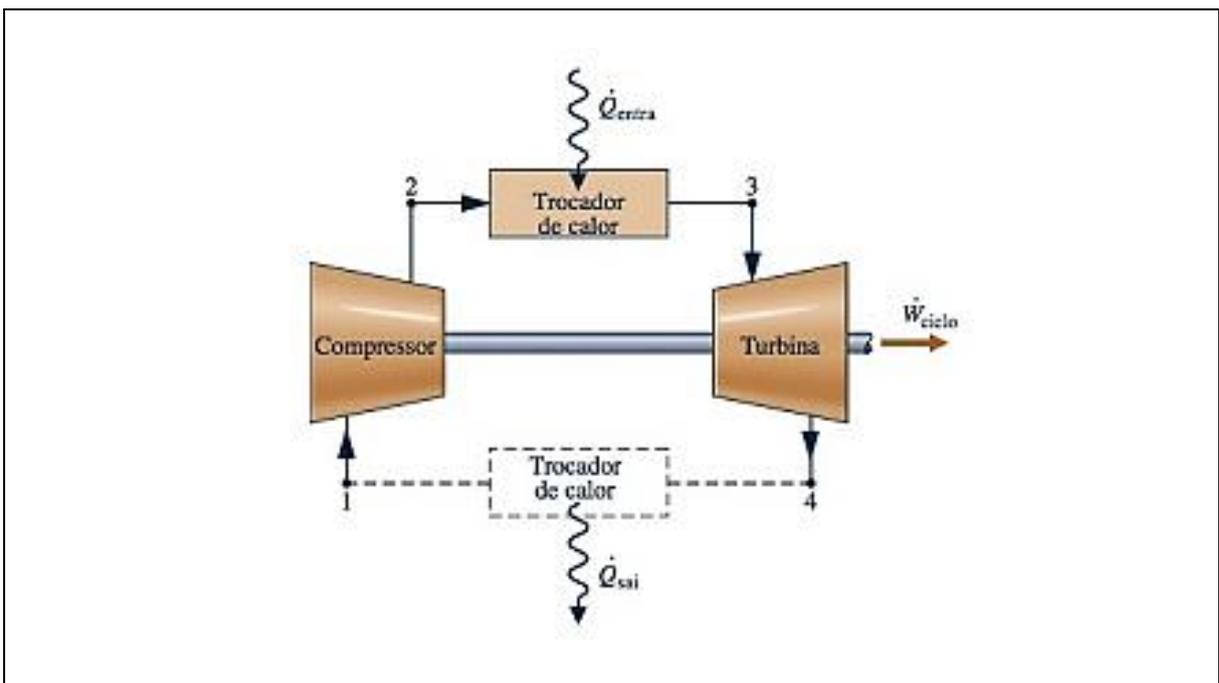


Figura 11 - Ciclo ideal de turbina a gás.

Fonte: Moran et al., 2013

Segundo Repinaldo (2013) o ciclo-padrão que representa a configuração e análise de turbinas a gás é conhecido como ciclo Brayton. O ciclo em questão é composto por quatro processos:

- (1 \Rightarrow 2): compressão adiabática isentrópica;
- (2 \Rightarrow 3): adição de calor a pressão constante;

- (3 \Rightarrow 4): expansão adiabática isentrópica;
 (4 \Rightarrow 1): rejeição de calor a pressão constante.

O diagrama que representa os processos pode ser visto na Figura 12a no diagrama $P-v$ e na Figura 12b no diagrama $T-s$.

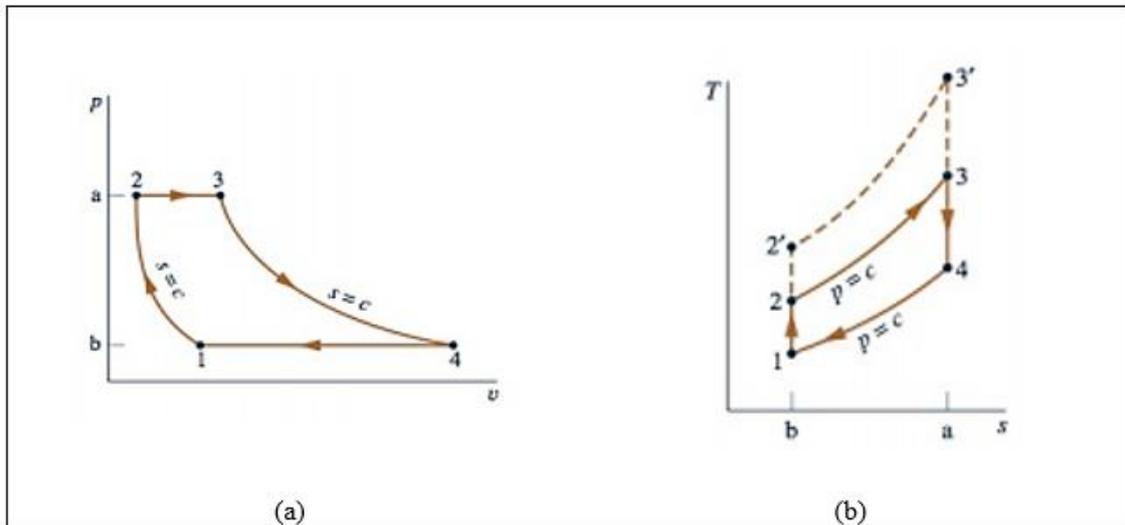


Figura 12 – (a) Diagrama $P-v$ e (b) diagrama $T-s$ para o ciclo Brayton ideal.
 Fonte: Repinaldo, 2013.

O combustível mais comumente utilizado nas turbinas a gás visando geração de energia elétrica é o gás natural. Porém, outros combustíveis podem ser usados dependendo da aplicação, como o óleo combustível destilado, propano, gases produzidos a partir de aterros, de estações de tratamento de esgoto e de resíduos animais e o gás proveniente do processo de gaseificação do carvão (Moran et al., 2013).

Segundo Neves (2017) para o ciclo Brayton, a resolução do equacionamento foi possível devido a utilização de tabelas termodinâmicas. A partir do compressor, com o estado 1, é possível determinar a entalpia h_1 e da pressão relativa P_{r1} , e considerando o compressor como isentrópico, é possível a utilização da razão de compressão para determinar a pressão relativa no estado 2 ideal, assim como a pressão P_2 .

$$r_{Brayton} = \frac{P_{r2i}}{P_{r1}} \quad (15)$$

$$r_{Brayton} = \frac{P_2}{P_1} \quad (16)$$

Através dos índices encontrados acima é possível chegar ao trabalho ideal realizado pelo compressor (NEVES, 2017):

$$w_{cpi} = h_{2i} - h_1 \quad (17)$$

Com o auxílio da eficiência do compressor, o trabalho real pode ser determinado (NEVES, 2017):

$$w_{cp} = \frac{w_{cpi}}{\eta_{cp}} \quad (18)$$

Definindo assim a entalpia real do estado 2 (NEVES, 2017):

$$h_2 = w_{cp} + h_1 \quad (19)$$

O processo na câmara de combustão é considerado como uma combustão completa onde a pressão é constante (NEVES, 2017):

$$P_2 = P_3 \quad (20)$$

Sabendo-se a temperatura T_3 , defini-se o estado 3 e obtém-se a entalpia h_3 e a pressão relativa P_{r3} . Chegando à quantidade de calor obtida com a combustão (NEVES, 2017):

$$q_{cc} = h_3 - h_2 \quad (21)$$

E a taxa da quantidade de calor (NEVES, 2017):

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_{ar} q_{cc} \quad (22)$$

Dessa forma pode-se definir os parâmetros da Turbina a gás considerando que o trabalho real da turbina alimenta o trabalho real do compressor (NEVES, 2017):

$$w_{tg} = w_{cp} \quad (23)$$

Podendo ser utilizado para encontrar o valor da entalpia de saída da turbina, utiliza-se então o trabalho da turbina como (NEVES, 2017):

$$w_{tg} = h_3 - h_4 \quad (24)$$

Então a temperatura T_4 e a pressão relativa P_{r4} podem ser encontradas. Sendo feito também o cálculo da pressão P_4 e pressão P_{r4i} , utilizando-se da eficiência isoentrópica da turbina (NEVES, 2017):

$$\eta_t = \frac{w_{tg}}{w_{tgi}} \quad (25)$$

Sendo assim possível chegar a (NEVES, 2017):

$$h_{4i} = h_3 - w_{tgi} \quad (26)$$

Tendo conhecimento da entalpia ideal h_{4i} e da pressão ideal P_{r4i} considerando uma expansão isentrópica é possível determinar a pressão P_4 , através de (NEVES, 2017):

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_{r3}}{P_{r4i}} \quad (27)$$

2.9 Microturbinas a Gás

As microturbinas a gás possuem como característica principal as baixas potências quando comparadas com as turbinas industriais e miniturbinas. Além disso, elas são inicialmente projetadas para aplicações comerciais, e possuem uma elevada e variável velocidade de rotação, não utilizam caixa redutora (a turbina e o gerador estão acoplados no mesmo eixo), possuem alta durabilidade, o projeto é simples com redução de custos e grandes volumes de fabricação, trabalham em baixas pressões, são compactas e fáceis de instalar, geram baixas emissões de poluentes, permitem cogeração e modularidade e sua eficiência é razoável (30–33%) (CARVALHO et. al., 2007).

São turbinas de pequeno porte com uma faixa de potência de 25 kW até 500 kW de operação, possuindo em sua maioria um trocador de calor que possui como função recuperar o calor e aumentar a eficiência do ciclo. Desta forma, se faz necessário o conhecimento do ciclo Brayton para operação das microturbinas, além de uma análise para a diminuição da poluição dos combustíveis fósseis nos gases de exaustão. Assim o objetivo é aumentar a eficiência termodinâmica e minimizar o consumo de combustíveis para a combustão (MARTINEZ, 2016).

Algumas das desvantagens do uso de microturbinas a gás são seu alto custo, eficiência com cargas parciais questionáveis, experiência limitada com o uso da tecnologia e ruídos de altas frequências (CARVALHO et. al., 2007).

Uma boa alternativa para reduzir a emissão de poluentes, e produzir o máximo ganho de energia conservada é o uso dos biocombustíveis gasosos ou líquidos criados a partir dos produtos orgânicos naturais de origem vegetal ou animal. A Tabela 4 mostra as vantagens e características de projeto das microturbinas (MARTINEZ, 2016).

Tabela 4 - Vantagens e características das microturbinas.

| Características de Projeto | Vantagens |
|---|---|
| Vida útil e confiabilidade: | A vida útil das microturbinas é estimada em um intervalo de 4.000 a 8.000 horas. Unidades instaladas têm demonstrado confiabilidade em serviço comercial. |
| Modularidade: | As unidades podem ser ligadas em paralelo a cargas maiores para fornecer energia com confiabilidade. |
| Operação em cargas parciais: | Microturbinas podem trabalhar a cargas parciais quando a potência de saída é reduzida, isto se consegue abaixando o fluxo de massa e temperatura de combustão, embora a eficiência em carga parcial seja mais baixa do que a eficiência em plena carga. |
| Produção de energia térmica utilizável: | As microturbinas produzem calor residual nos gases de escape em uma faixa de temperaturas entre 200 e 350°, o qual é adequado para o abastecimento de energia térmica a uma variedade de indústrias. |

Fonte: Martinez, 2016 (adaptado).

2.10 Motor de Combustão Interna

Segundo Çengel (2013) os ciclos termodinâmicos são classificados em ciclos de potência e ciclo de refrigeração. Os motores de combustão interna pertencem ao grupo dos ciclos de potência, pois possuem como finalidade produzir potência a partir da queima do combustível dentro das fronteiras do sistema. Tem-se como exemplo os automóveis.

Esse tipo de máquina térmica se diferencia como motor de ignição por centelha e motor de ignição por compressão. Nos motores de ignição por centelha ocorre a mistura ar e combustível que é inflamada pela centelha da vela de ignição, sendo vantajosos para aplicações que exijam até 225 kW de potência e são mais adequados de serem utilizados em automóveis devido ao seu baixo peso e custo. Já nos motores de ignição por compressão, o ar é comprimido até que a pressão e temperatura se elevem suficientes para que ocorra a combustão espontânea quando o combustível for injetado, sendo vantajosos para aplicações em que necessitam de economia de combustível e potência relativamente alta como os utilizados em caminhões pesados, ônibus, locomotivas, navios, unidades auxiliares de potência, etc (Moran et al., 2013).

Segundo Varella (2010) o ciclo de funcionamento são transformações na massa gasosa no interior da câmara, partindo de sua admissão até a sua eliminação para o exterior. Desta forma os motores de combustão interna são classificados em dois tipos: ciclo Otto e ciclo Diesel. O ciclo Otto foi exposto por Nikolaus A. Otto em 1876 e o ciclo Diesel por Rudolf Diesel em 1893. Ambos podem completar seu ciclo com dois ou quatro cursos do pistão, sendo o de dois cursos chamado de motor de dois tempos e quando completa quatro cursos é chamado de motor de quatro tempos. A Figura 13 apresenta um motor de combustão interna que consiste de um cilindro composto por duas válvulas e um pistão movente.

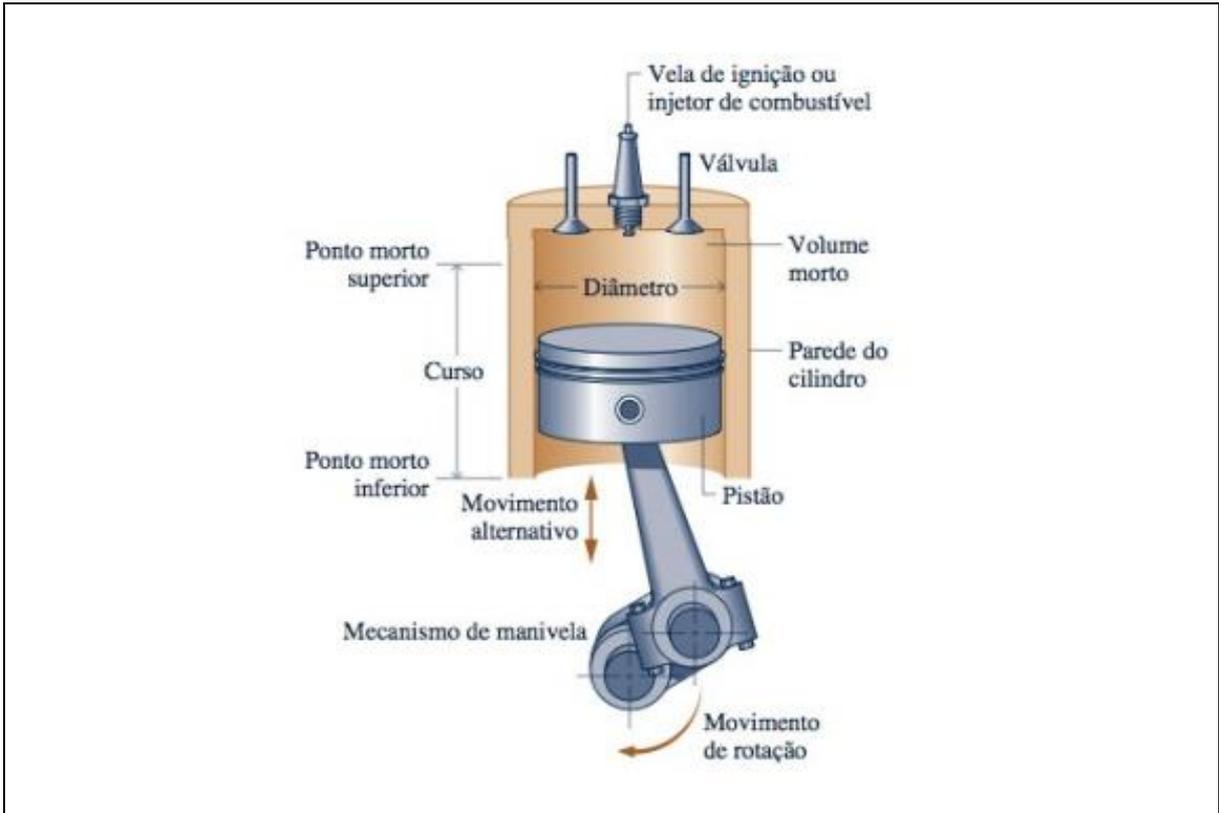


Figura 13 - Esboço de motor de combustão interna.
 Fonte: Moran et al., 2013.

2.10.1 Ciclo Diesel

O Ciclo Diesel proposto por Rudolph Diesel nos anos de 1890, utiliza-se da classificação de motores de ignição por compressão. São motores que não necessitam lidar com problemas de autoignição trazendo como benefício a possibilidade do uso de combustíveis mais baratos (Çengel, 2013).

Segundo Moran et al. (2013) esse ciclo é considerado ideal, e que a adição de calor ocorre a pressão constante, que se inicia com o pistão no ponto morto superior. O ciclo Diesel é mostrado nos diagramas da Figura 14.

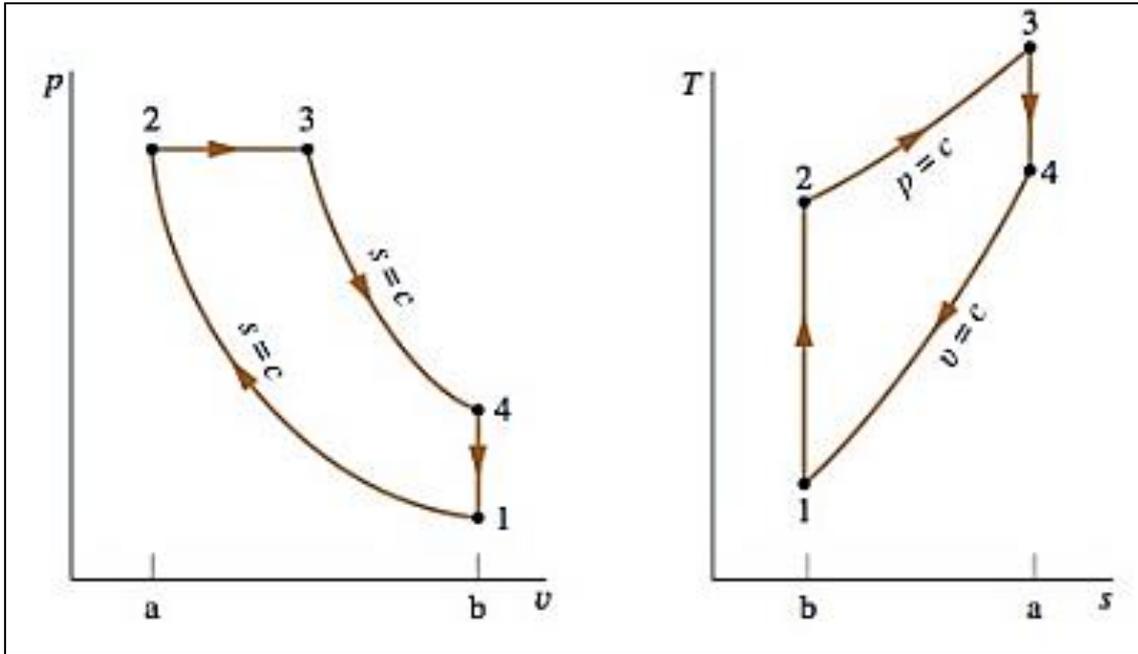


Figura 14 - Diagrama p-v e T-s do ciclo Diesel.
Fonte: Moran et al., 2013.

As etapas apresentadas no diagrama são detalhadas a seguir.

- (1 \Rightarrow 2): compressão isentrópica;
- (2 \Rightarrow 3): adição de calor a pressão constante;
- (3 \Rightarrow 4): expansão isentrópica;
- (4 \Rightarrow 1): rejeição de calor a volume constante.

Segundo Carvalho (2011) as equações a seguir são utilizadas para cálculos do ciclo Diesel.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad (28)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad (29)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} \quad (30)$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^k \quad (31)$$

Equação referente ao processo de adição de calor a pressão constante no motor pode ser descrita como (CARVALHO, 2011):

$$Q_{23} = (U_3 + pV_3) - (U_2 + pV_2) = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (32)$$

Equação referente ao processo de rejeição de calor a volume constante no motor pode ser escrita como (CARVALHO, 2011):

$$Q_{41} = (U_4 - U_1) = m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (33)$$

A eficiência térmica do motor será (CARVALHO, 2011):

$$n_t = 1 - \frac{Q_{23}}{Q_{41}} = 1 - \frac{1}{TC^{k-1}} \left[\frac{(T_3/T_2)^k - 1}{k[(T_3/T_2) - 1]} \right] \quad (34)$$

Para o fluido de trabalho ar e gases de combustão, aplica-se a equação de gás perfeito (CARVALHO, 2011):

$$P \cdot v = R \cdot T \quad (35)$$

2.11 Considerações Finais

As informações mostradas neste capítulo referem-se aos sistemas térmicos a serem estudados para obtenção de resultados do capítulo 4 que, em seguida, servirão para análises e conclusões.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo descreverá a característica do desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de estabelecer a sua classificação e natureza, método e instrumentos de coleta utilizados assim como as variáveis e indicadores adotados, para que possam ser feitas as análises e cálculos necessários e a área da pesquisa.

3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa tem um caráter pragmático, sendo considerado uma maneira formal e sistemática de desenvolvimento do método científico. Tendo como objetivo central da pesquisa, a busca por soluções para um problema, mediante o uso de procedimentos científicos (Gil, 1999).

De acordo com Minayo (2003), a realização da pesquisa pode ocorrer de duas formas, pelos métodos qualitativo e quantitativo. O método qualitativo tem como foco no caráter subjetivo do objeto analisado, onde se baseia na interpretação, o qual ocupa um lugar central na teoria e é constituído por um conjunto de técnicas que serão adotadas para construir uma realidade. A pesquisa é assim, uma atividade básica da ciência que se preocupa com as ciências sociais sem que possa ser quantificada, trabalhando com crenças, significados, valores e outros construtos profundos de relações que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis.

As respostas analisadas na pesquisa qualitativa não possuem cunho objetivo, não possuindo o propósito de contabilizar quantidades como resultado final, mais ser possível compreender o comportamento em questão.

Já segundo Silva (2001), a pesquisa quantitativa, é todo o tipo de informação que pode ser traduzida em números utilizando métodos estatísticos, as opiniões e dados obtidos de acordo com os boletins de informação e pesquisa de campo. Obtendo-se como resultados por indicadores numéricos que apontam a característica a ser analisada na pesquisa.

Quanto ao objetivo da pesquisa, Gil (1999) classifica a pesquisa como exploratória, na qual sua intenção é esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, visando hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, abrangendo bibliografia, documentos, entrevistas e estudos de caso. E ainda assim adquando uma visão geral, acerca de determinado fato; descritiva, em que é observado, analisado e descrito as características de determinada população

ou fenômeno ou estabelece relações entre variáveis, utilizando como técnica principal, a coleta de dados; e explicativa, que identifica os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, pois explica a razão e o porquê das coisas.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa bibliográfica baseia-se na utilização de livros e obras acadêmicas, sejam estas impressas ou digitalizadas e obtidas via Internet, e também por meio de dados que se obtém através de estudo de casos e experimentos. Já a pesquisa experimental, está mais próxima às Ciências Naturais, sendo a grande responsável pelos maiores avanços científicos, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente, com o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas especiais, e equipamentos adequados.

Pesquisa documental é definida como sendo elaborada através das mais diversas fontes sem tratamentos analíticos. Ainda segundo o mesmo autor, a pesquisa participante caracteriza-se pelo envolvimento e identificação do pesquisador com as pessoas investigadas (FONSECA, 2002).

Já a pesquisa-ação é realizada e idealizada a partir de bases empíricas em estreita associação com uma ação ou resolução de um problema no qual os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Segundo Yin (2001), estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados. Para Gil (1999), os exemplos mais característicos desse tipo de pesquisa são os de investigações sobre ideologias ou aquelas que se propõem à análise das diversas posições acerca de um problema.

Mediante as informações apresentadas, este trabalho consiste, quanto à abordagem de uma pesquisa, em uma pesquisa qualitativa, pois se baseia na interpretação e na análise de dados e quantitativa, pois utiliza dados numéricos, cálculos e processo de análise estatística. Quanto ao objetivo, em uma pesquisa exploratória, devido ao fato de que irá realizar um levantamento bibliográfico, documental e estudos de caso referente ao princípio de funcionamento de ciclos térmicos tendo como combustível resíduos sólidos urbanos, a fim de esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos através da comparação dos resultados obtidos pela eficiência térmica de acordo com os casos apresentados. O presente trabalho ainda abrange uma pesquisa

de caráter bibliográfico, visto que é fundamentada em uma variedade de livros, teses, dissertações, artigos e internet, com o objetivo de enriquecimento teórico para realização do estudo proposto. A análise e compreensão dos parâmetros dos ciclos ainda compete a um estudo de caso aos quais serão feitos uma observação e um melhor detalhamento para que o investigador possa mostrar seu ponto de vista sem intervir sobre o objeto a ser estudado.

3.2 Materiais e Métodos

O referente trabalho utilizará estudo bibliográfico visando apresentar uma análise dos principais parâmetros interventores na determinação da eficiência térmica dos ciclos selecionados, com a utilização de resíduos sólidos urbanos, além de descrever e detalhar os principais componentes dos diferentes ciclos analisados.

Deve-se coletar os dados e resultados obtidos de bibliografias selecionadas referente a eficiência térmica dos ciclos trabalhados visando a geração de energia através de resíduos sólidos urbanos.

A análise dos sistemas em questão visa a determinação do processo mais eficiente de produção de energia através da utilização de resíduos sólidos urbanos, como também suas vantagens e desvantagens perante a suas aplicações.

Para a realização das análises foi utilizado materiais bibliográficos diversos e tendo como base monografias de Pereira (2016), Fonseca (2016) e Oliveira (2015), assim, a análise dos resultados obtidos entre eles. A Figura 15 representa um fluxograma com as etapas para a realização deste trabalho.

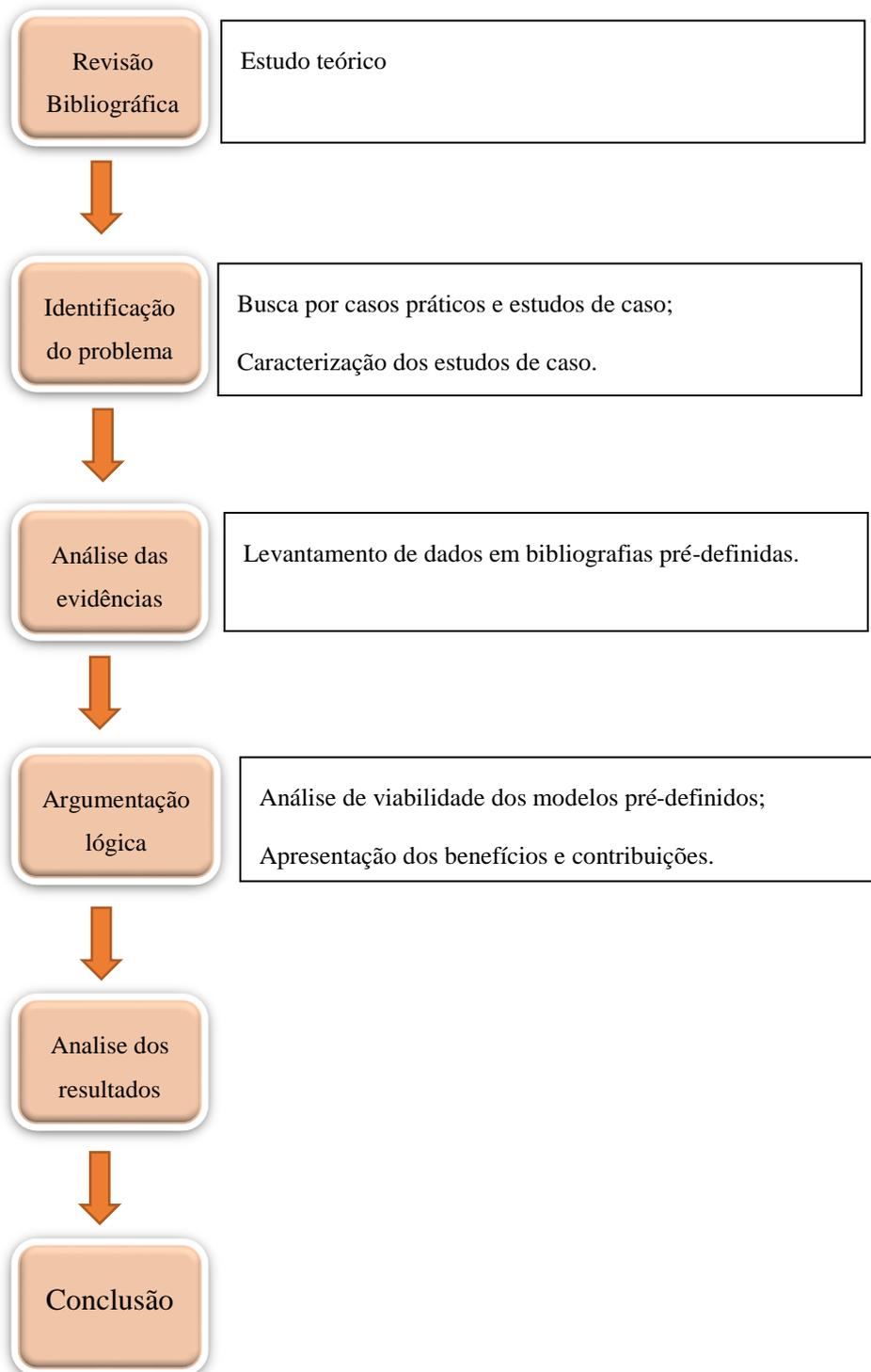


Figura 15 - Fluxograma das etapas da realização do trabalho.
Fonte: Pesquisa direta, 2018.

3.3 Variáveis e Indicadores

Variável pode ser definida como qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível verificação (GIL, 1999).

A escolha dos indicadores varia com o objetivo da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa, tendo em vista o estudo e medição de cada variável. De acordo com o objetivo do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo a Tabela 5.

Tabela 5. Variáveis e Indicadores de Pesquisa.

| Variáveis | Indicadores |
|--|--|
| Eficiência térmica do ciclo a gás (η_t) | <ul style="list-style-type: none"> • Trabalho fornecido ao ciclo; • Fornecimento de energia do combustível; • Trabalho realizado pela máquina térmica. |
| Características Operacionais | <ul style="list-style-type: none"> • Tipo de máquina térmica; • Biogás de aterro sanitário; • Resíduo de aterro sanitário; • Composição química do resíduo e do biogás; • Variáveis operacionais de cada equipamento; |
| Motor Ciclo Diesel | <ul style="list-style-type: none"> • Relação de compressão; • Cilindrada; • Potência líquida gerada; • Eficiência. |
| Turbina a Gás e Turbina a Vapor | <ul style="list-style-type: none"> • Pressão de entrada e de saída; • Temperatura de entrada e de saída; • Potência líquida gerada; • Eficiência. |
| Caldeira <i>Mass Burning</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Pressão de entrada e saída; • Temperatura de entrada e saída; • Eficiência. |
| Eficiência térmica do ciclo a vapor | <ul style="list-style-type: none"> • Combustível fornecido a caldeira; • Potência fornecida pela turbina; • Combustível fornecido ao reaquecedor; |
| Superaquecedor e Reaquecedor Externo | <ul style="list-style-type: none"> • Pressão de entrada e saída do vapor; • Temperatura de entrada e saída do vapor; • Vazão mássica do vapor; • Composição e vazão mássica do biogás; • Perda de pressão. |

Fonte: Pesquisa Direta, 2019.

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Nesta etapa, acontece a coleta de dados em cima do tema abordado a fim de obter o embasamento necessário para a pesquisa através de revisões bibliográficas e observações. Como já mencionado neste capítulo, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, qualitativa, quantitativa e exploratória, logo todos os dados necessários para o estudos serão adquiridos através de uma pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações e catálogos e dados disponibilizados por empresas governamentais na internet, associada com uma observação direta a fim de alcançar dados teóricos e práticos, e também através de um estudo de caso, com o intuito de conseguir informações uteis para realizar uma comparação entre as bibliografias.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos pela teoria, o *Microsoft Excel* será utilizado para uma melhor visualização das informações coletadas. Será também empregado o *software Microsoft Word* para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram mostradas as classificações referentes ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas de forma a executar este trabalho. Abordaram-se também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa. Além de ter delimitado a área em que ocorre esta pesquisa e também a forma como foi realizada a coleta e tabulação dos dados obtidos. No próximo capítulo serão apresentados os casos práticos e estudos de casos, fazendo a apresentação dos sistemas térmicos, suas devidas aplicações propostas, bem como os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem por objetivo de apresentar os resultados da pesquisa realizada, utilizando o gás de aterro para geração de energia e máquinas térmicas. Para tal fim, foram usadas algumas pesquisas de casos práticos que serão abordadas, bem como seus benefícios.

4.1 Caso 1: Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas. Gustavo Antonio Pereira, 2017.

A pesquisa em questão consiste na seleção de tecnologias de geração de energia a partir de biogás de aterro sanitário. Os equipamentos selecionados tiveram como característica principal a possibilidade de utilizar gás pobre para acioná-los e são eles:

- 3 Motores da *Jenbacher*, modelos: J.316, J.320 e J.412;
- 1 Turbina a Gás da *OPRA Turbines*, modelo: OP16.

E tendo como base levantamento de dados foram selecionadas quatro cidades mineiras para realizar as análises de biogás e de produção de energia elétrica e térmica. As cidades de Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim foram selecionadas devido aos municípios possuírem aporte populacional distintos, podendo abranger diferentes configurações. Desta forma foi possível realizar 16 combinações entre cidades e máquinas térmicas como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 - Combinações possíveis.

| | Motor J.316 | Motor J.320 | Motor J.412 | Turbina OPRA |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Contagem/MG | Combinação 1 | Combinação 2 | Combinação 3 | Combinação 4 |
| Uberlândia/MG | Combinação 5 | Combinação 6 | Combinação 7 | Combinação 8 |
| Uberaba/MG | Combinação 9 | Combinação 10 | Combinação 11 | Combinação 12 |
| Betim/MG | Combinação 13 | Combinação 14 | Combinação 15 | Combinação 16 |

Fonte: Pereira, 2017.

Em busca de determinar a geração de metano de forma estimada foi definido como faixa de tempo de funcionamento dos aterros sanitários para as cidades em questão de 2007 a 2040, sendo 2055 o último ano para análise de dados.

De acordo com os dados apresentados tornou-se notório a maior concentração de geração de metano no ano de 2040 devido ao acúmulo de todos os anos anteriores até o seu fechamento. Teve como análise até o ano de 2055 pois a decomposição do lixo continua, porém de forma decrescente já que não existe deposição de resíduos sólidos desde o fechamento.

A cidade que apresentou maior geração de metano foi Contagem devido seu maior volume de resíduos sólidos urbanos, seguida por Uberlândia. Já Uberaba possui uma taxa de crescimento anual de resíduos sólidos urbanos tornando assim maior geradora de CH₄ quando comparada a Betim.

Na determinação da produção de energia elétrica cada equipamento possui uma eficiência elétrica distinta e os resultados variam de acordo com a geração de metano apresentada para cada cidade. Os valores de eficiência do equipamento são considerados dados do fabricante levando em conta a vazão mássica do combustível em comparação com a vazão mássica de projeto do equipamento. Desta forma, a produção de energia elétrica [GWh] para as cidades de Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim, foram apresentadas desde o ano de 2007 ao ano de 2055 com pico de produção em 2040.

Com análise dos dados notou-se que para todas as combinações a produção de eletricidade se mostrou viável, ajudando dessa forma a suprir a demanda elétrica dos municípios. Tomando o ano de pico de produção de metano como parâmetro de análise concluiu-se que o motor J.412 obteve o melhor desempenho em Contagem, seguida de Uberlândia, Uberaba e Betim. Já a turbina OPRA obteve o pior desempenho para o mesmo ano. Os dados podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 - Produção de eletricidade referente as máquinas térmicas.

| | Motor J.412 | Turbina OPRA |
|----------------------|--------------------|---------------------|
| Contagem/MG | 19,96 GWh | 12,83 GWh |
| Uberlândia/MG | 14,9 GWh | 9,58 GWh |
| Uberada/MG | 11,18 GWh | 7,94 GWh |
| Betim/MG | 6,65 GWh | 5,26 GWh |

Fonte: Pereira, 2017 (adaptado).

Devido a constante variação da vazão mássica do metano as eficiências elétricas das máquinas térmicas também variam de forma proporcional e por consequência não atingem o pico máximo de produção em todos os anos. A cidade que menos sofreu com essa variação foi a cidade de Contagem devido a sua alta produção ao contrário de Betim que possui a menor eficiência. A turbina apesar de apresentar pior desempenho em 2040 foi a que obteve menor variação em termos de eficiência elétrica quando comparada aos motores, sendo mais vantajosa em alguns anos.

Com relação a produção de energia térmica para o ano de pico de produção de metano que o motor J.320 obteve o melhor desempenho em Contagem, seguido de Uberlândia, Uberaba e Betim. Já a Turbina obteve menor rendimento para esse ano. Os dados podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 - Produção de energia térmica.

| | Motor J.320 | Turbina OPRA |
|----------------------|--------------------|---------------------|
| Contagem/MG | 21,48 GWh | 13,01 GWh |
| Uberlândia/MG | 16,04 GWh | 9,72 GWh |
| Uberada/MG | 12,03 GWh | 8,05 GWh |
| Betim/MG | 7,16 GWh | 5,34 GWh |

Fonte: Preira, 2017 (adaptado).

Na Figura 16 observa-se todas as combinações comparadas para a geração de eletricidade.

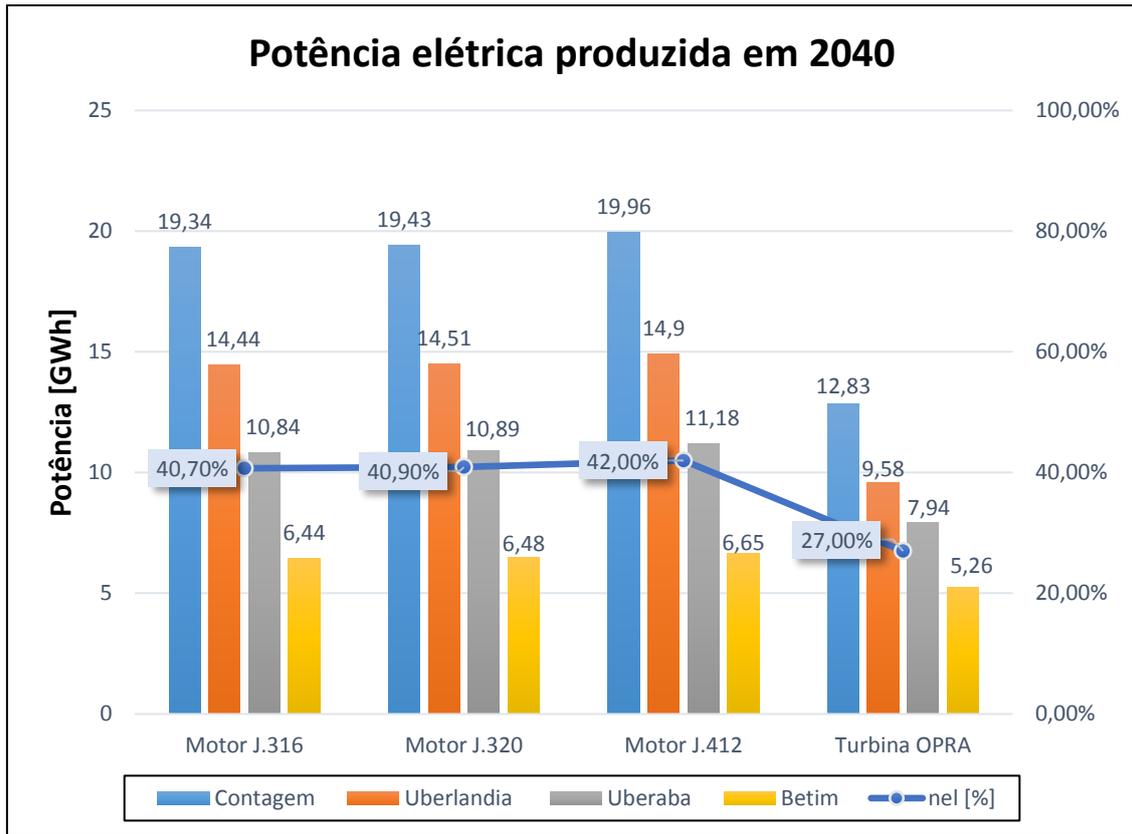


Figura 16 - Energia elétrica produzida.
Fonte: Pereira, 2017 (adaptada).

Constata-se através da figura acima que o motor J.412 é o mais eficiente para todas as cidades, possuindo 42% de eficiência elétrica. Já a turbina apresenta menor produção possuindo apenas 27% de eficiência elétrica. Essa energia é responsável para ajudar a atender a demanda elétrica nestas cidades.

A Figura 17 apresenta todas as combinações comparadas para a geração de energia térmica.

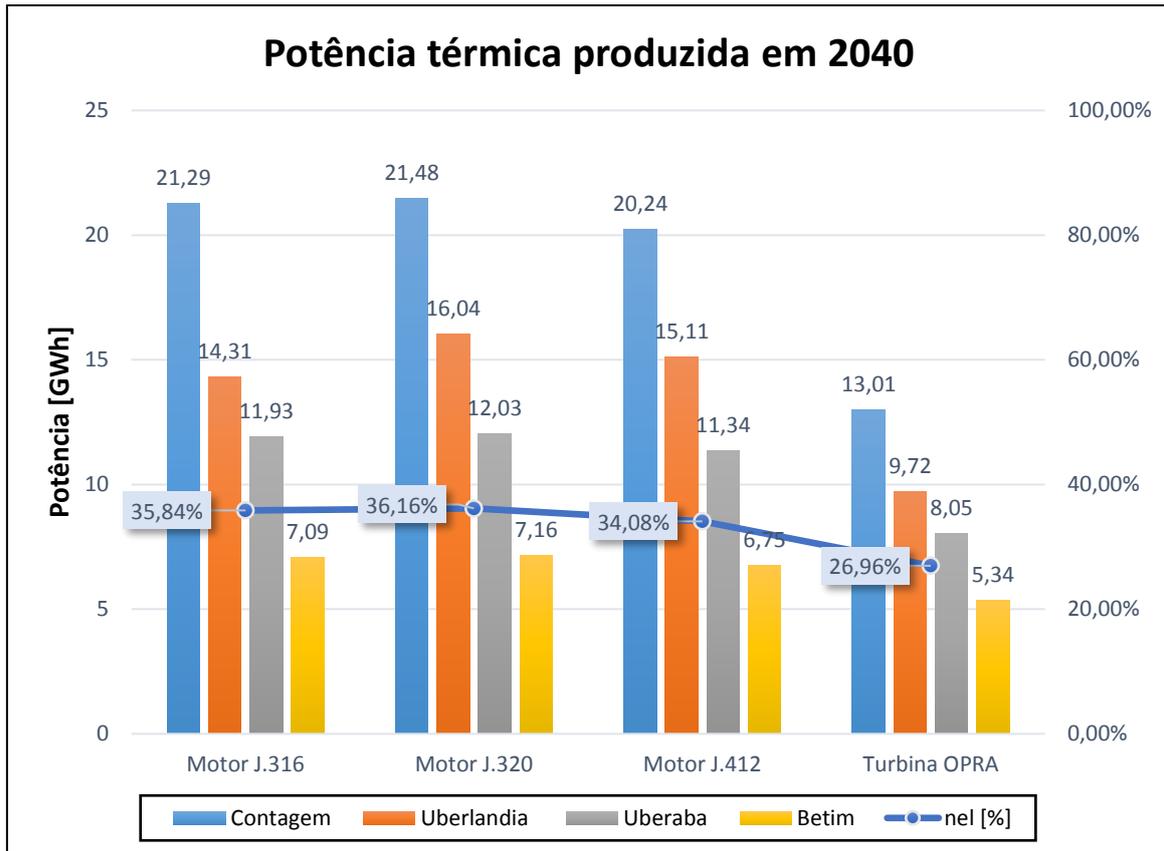


Figura 17 - Energia térmica produzida.
Fonte: Pereira, 2017.

Como pode ser visto na figura 17 a máquina térmica que apresentou melhor rendimento para todas as cidades foi o motor J.320, obtendo 36,16% de eficiência térmica. Sendo mais uma vez com pior rendimento a turbina com a penas 26,96% de eficiência térmica.

4.2 Caso 2: Estudo do desempenho de microturbinas a gás utilizando biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica. Guilherme Pedroni de Oliveira, 2015.

Para realizar a simulação das microturbinas foi armanezado parâmetros em uma base de dados de acordo com as faixas variáveis de tecnologia existentes e condições ISO. As variáveis adotadas na análise energética foram:

- Temperatura de entrada da turbina/saída da câmara de combustão: 1000K, 1100K e 1200K;
- Razão de pressão do compressor: 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0;

- Variações das eficiências isentrópicas do compressor e da turbina, respectivamente: 0,80 e 0,83; 0,79 e 0,82; 0,79 e 0,81; 0,77 e 0,80;
- Variação da eficiência do regenerador: 0,75; 0,80, 0,85.

O ciclo da microturbina a gás é representado na Figura 18.

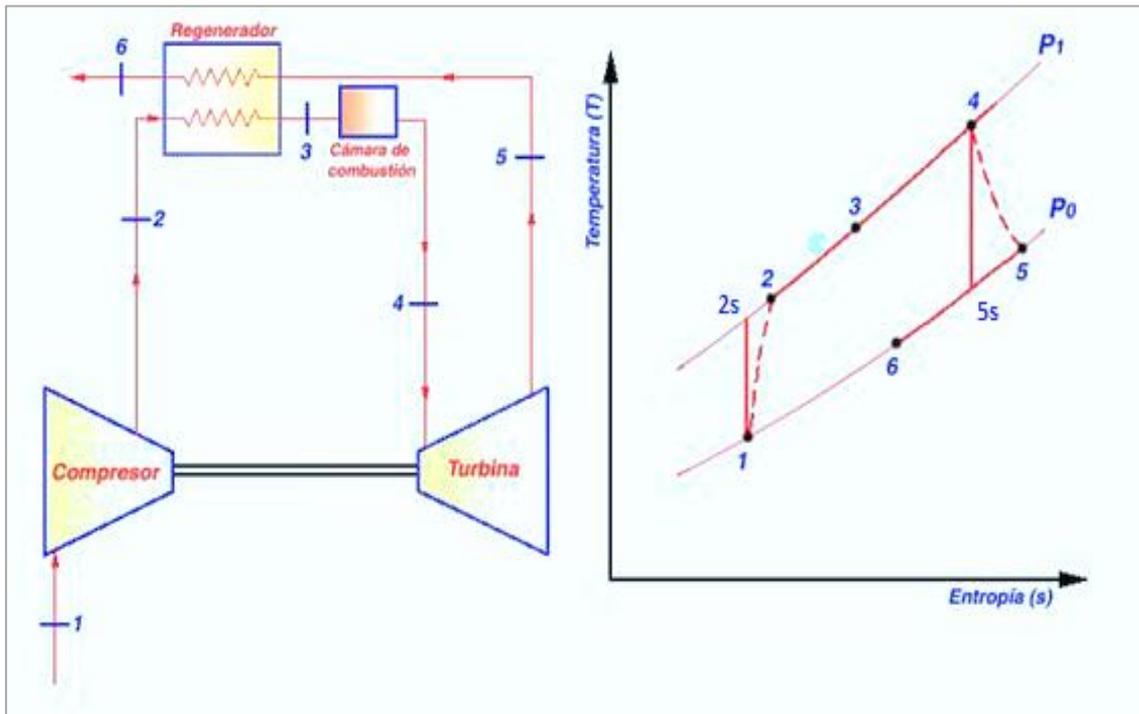


Figura 18 - Diagrama T-s do ciclo termodinâmico da microturbina a gás com regenerador.
Fonte: Oliveira, 2015.

O trabalho busca analisar as melhores condições de trabalho, que envolve uma maior eficiência elétrica e térmica com um menor consumo de combustível possível. Desta forma foram feitas diferentes condições de trabalho, e a condição que apresentou resultados expressivos tem como característica:

- Eficiência do regenerador 80%;
- Eficiência do compressor 80%;
- Eficiência da turbina 83%.

Com base nessas condições de trabalho a Figura 19 apresenta a eficiência elétrica para diferentes temperaturas de entrada na turbina.

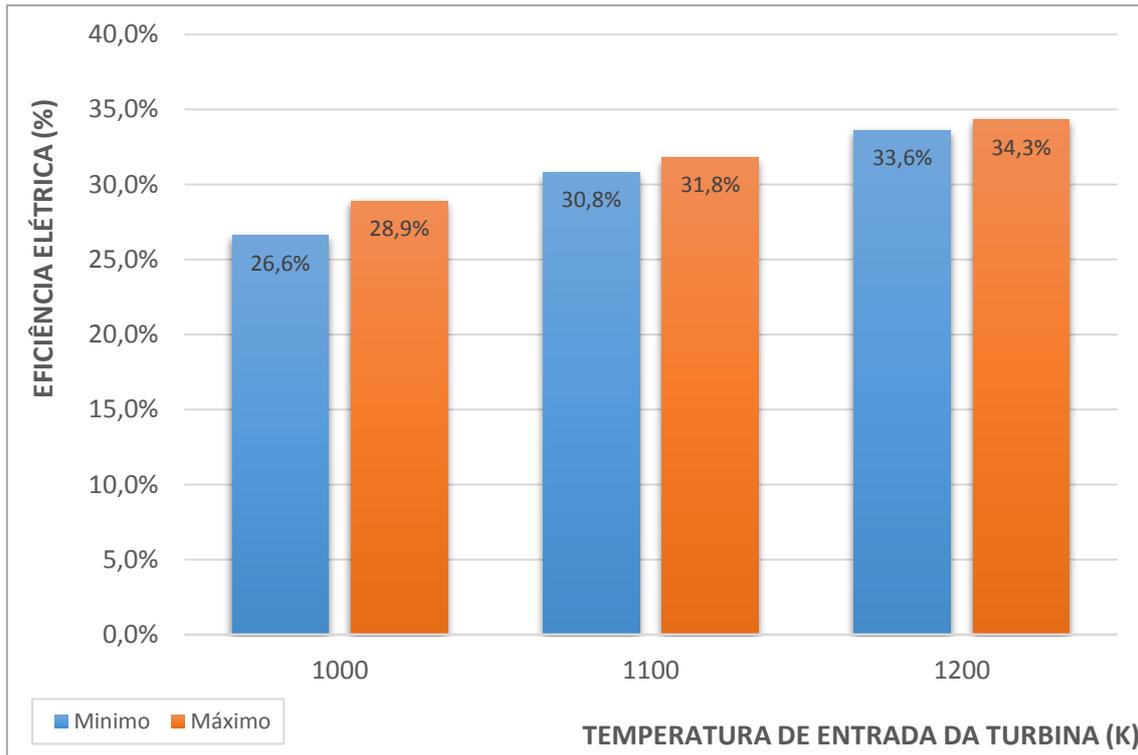


Figura 19 - Eficiência elétrica vs Temperatura de entrada na turbina.
Fonte: Oliveira, 2015 (adaptado).

De acordo com a Figura 19 tem-se que para essa condição de trabalho a temperatura de 1000K a eficiência elétrica variou de 26,6% a 28,9% obtendo assim a menor eficiência. Já a temperatura de 1200K apresentou a melhor eficiência elétrica, tendo sua variação entre 33,6% a 34,3%. Esse maior valor de eficiência elétrica se deu com razão de pressão do compressor igual a 4.

Quando se eleva a eficiência do regenerador para 85% e fixa-se a eficiência da turbina e do compressor em 83% e 80%, respectivamente, ocorre um aumento em cerca de 3% na eficiência elétrica em relação a eficiência do regenerador igual a 80%, como pode ser visto na figura 20.

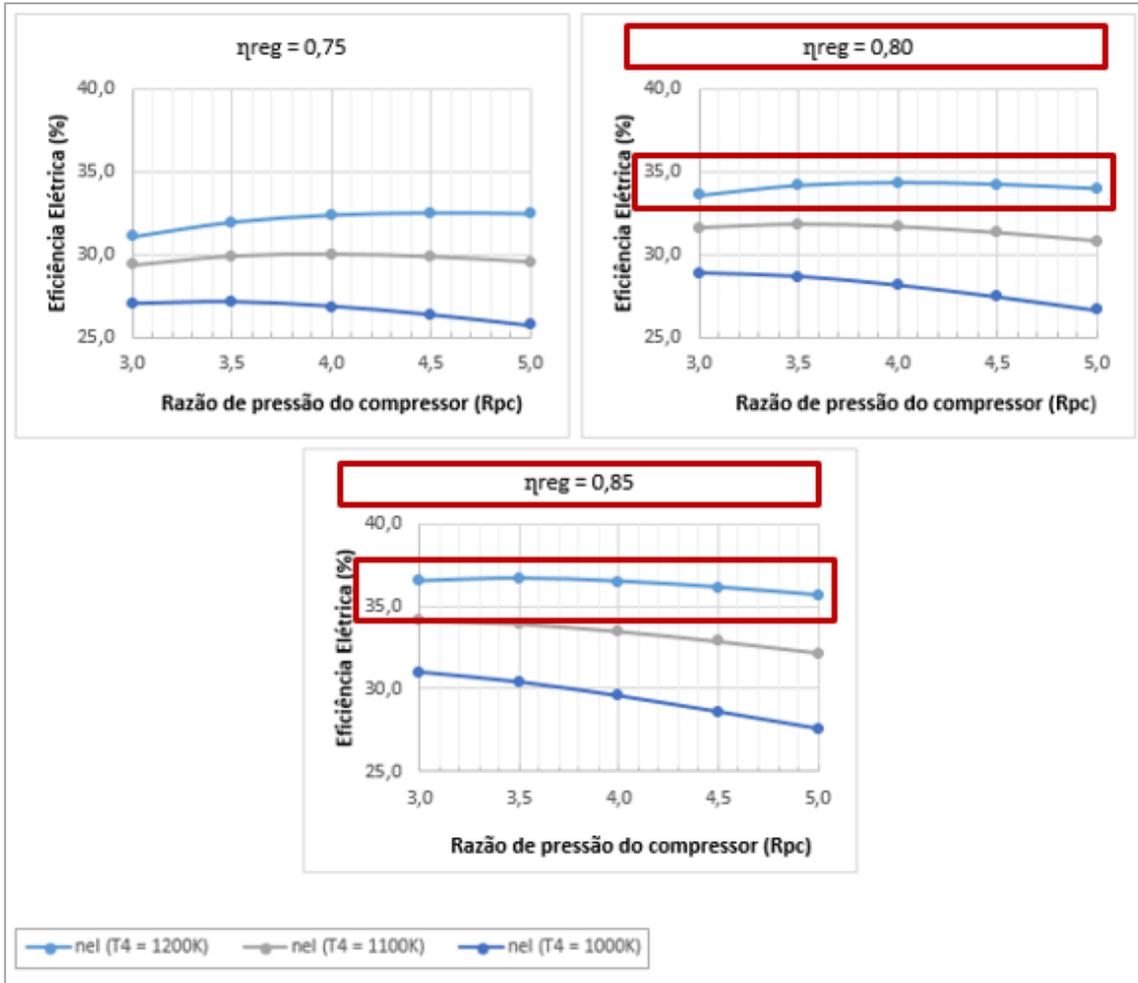


Figura 20- Eficiência elétrica vs Razão de pressão do compressor.
 Fonte: Oliveira, 2015 (adaptado).

No caso da eficiência térmica do ciclo os resultados se assemelham a eficiência elétrica tendo melhores resultados com as mesmas condições de trabalho. A Figura 21 apresenta os resultados variando a temperatura de entrada na turbina.

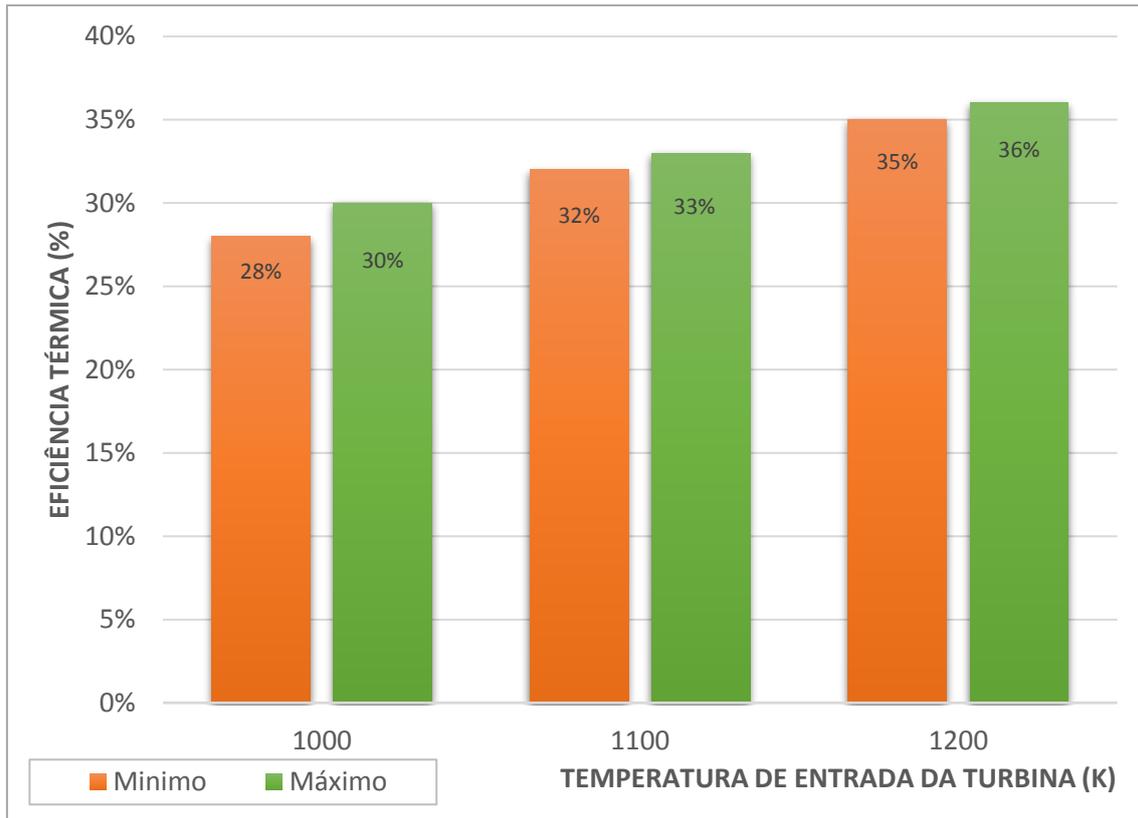


Figura 21 - Eficiência térmica vs Temperatura de entrada da turbina.
Fonte: Oliveira, 2015 (adaptado).

Do mesmo modo a temperatura de 1200K se destaca em relação as outras, obtendo dessa forma a maior eficiência térmica que varia de 35% a 36% de acordo com a razão de pressão do compressor.

Em relação ao consumo específico de combustível a Figura 22 apresenta dados para algumas variações de eficiência do compressor e da turbina.

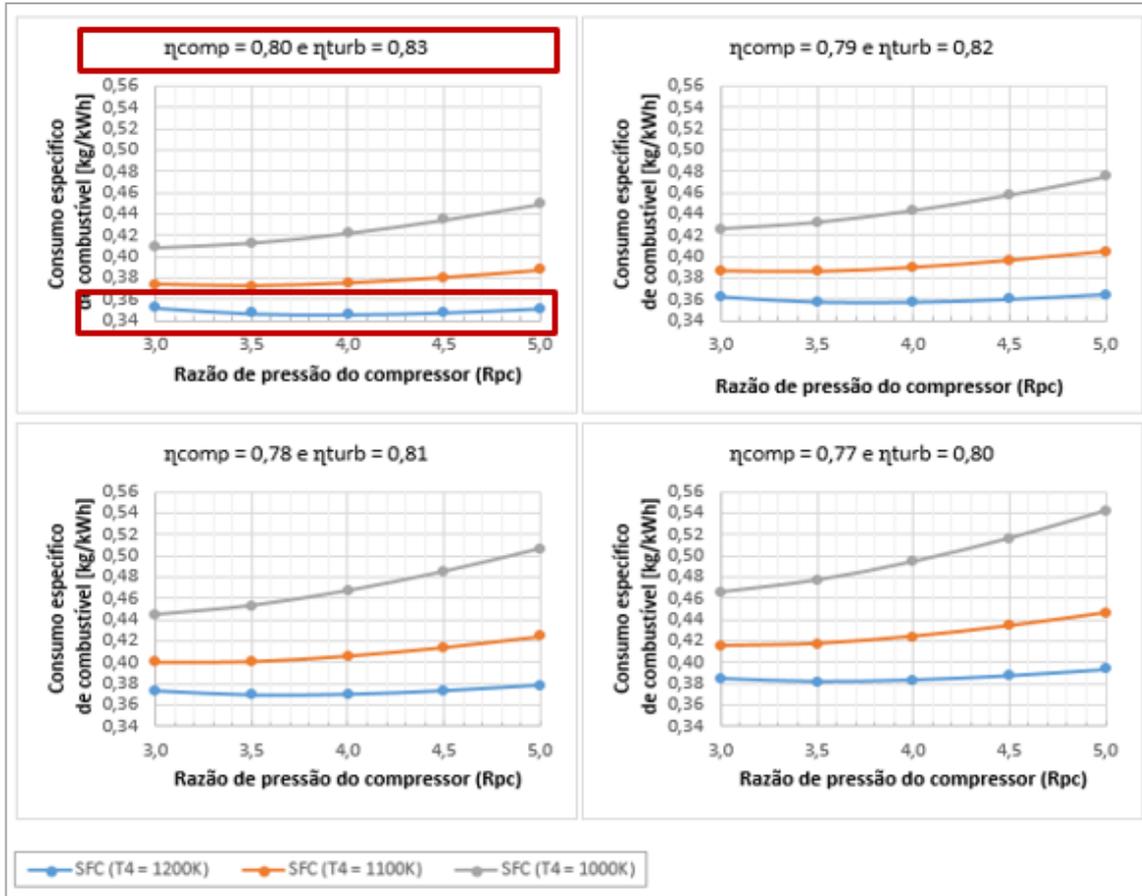


Figura 22 - Consumo específico de combustível vs Razão de pressão do compressor.
Fonte: Oliveira, 2015 (adaptado).

Como pode ser visto na Figura 22 a condição de trabalho que apresentou menor consumo e melhor desempenho é a mesma para as outras análises e com a temperatura de entrada na turbina igual a 1200K, mesmo sem obter grandes variações em relação a razão de pressão do compressor diferentes.

4.3 Caso 3: Análise técnica de um sistema de geração de energia através do uso de resíduos sólidos urbanos e caldeira *MASS BURNING*: O caso de dois municípios de Minas Gerais. Maycon Xavier da Fonseca, 2016.

Foi necessário a realização do levantamento do poder calorífico inferior (Tabela 9) e dos dados da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos dos municípios de Belo Horizonte e Betim para análise técnica do sistema de geração de energia.

Tabela 9 - Resultados para o poder calorífico inferior de Belo Horizonte e Betim.

| Cidade de Belo Horizonte | | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------|
| RSU Coletado | % de resíduo | % de Carbono | % de Umidade | PCI_{LAC} | PCI |
| Orgânicos | 52,0 | 48,0 | 70,0 | 17.000 | 3353,22 |
| Metais e Outros | 16,6 | 4,5 | 2,0 | 0 | -8,12 |
| Plástico | 16,0 | 60,0 | 0,2 | 33.000 | 3167,22 |
| Papel | 10,0 | 43,5 | 10,2 | 16.000 | 671,06 |
| Madeira | 3,0 | 6,0 | 1,5 | 17.000 | 29,50 |
| Têxteis | 2,0 | 55,0 | 10,0 | 20.000 | 215,11 |
| Borracha | 0,4 | 10,0 | 10,0 | 23.000 | 8,22 |
| PCI [kJ/kg] | | | | | 7436,21 |
| Cidade de Betim | | | | | |
| RSU Coletado | % de resíduo | % de Carbono | % de Umidade | PCI_{LAC} | PCI |
| Orgânicos | 54,0 | 48,0 | 70,0 | 17.000 | 3482,19 |
| Metais e Outros | 12,0 | 4,5 | 2,0 | 0 | -5,87 |
| Plástico | 16,0 | 60,0 | 0,2 | 33.000 | 3167,22 |
| Papel e Papelão | 13,0 | 44,0 | 10,2 | 16.000 | 882,78 |
| Têxteis | 4,0 | 55,0 | 10,0 | 20.000 | 430,22 |
| Borracha | 1,0 | 10,0 | 10,0 | 23.000 | 20,56 |
| PCI [kJ/kg] | | | | | 7977,09 |

Fonte: Fonseca, 2016.

Através da tabela verifica-se que o PCI dos materiais da cidade de Betim é superior ao de Belo Horizonte devido aos RSU de Betim possuírem maior quantidade de materiais como papeis, têxteis e borracha.

Com o auxílio de bibliografias complementares foi possível estimar a geração de resíduos sólidos urbanos e biogás até o ano de 2040 para as cidades. Os dados encontrados da geração de RSU está representada na Tabela 10.

Tabela 10 - Estimativa de geração de RSU de Betim e Belo Horizonte.

| Municípios | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Betim | 117.826,82 | 126.109,51 | 134.108,71 | 142.655,60 | 144.909,02 | 147.779,97 |
| Belo Horizonte | 768.742,17 | 843.215,59 | 914.854,49 | 987.646,59 | 1.011.961,03 | 1.033.719,65 |

Fonte: Fonseca, 2016.

Pode-se verificar na Tabela 10 que a cidade de Belo Horizonte apresentou maior estimativa de geração de resíduos sólidos urbanos quando comparada a Betim. Essa diferença ocorre devido a diferença populacional, sendo Belo Horizonte mais populosa que Betim.

Após o conhecimento dos dados de geração de RSU das cidades se faz necessário o cálculo da quantidade de metano gerada através desses resíduos, sua quantidade pode ser vista na Figura 23.

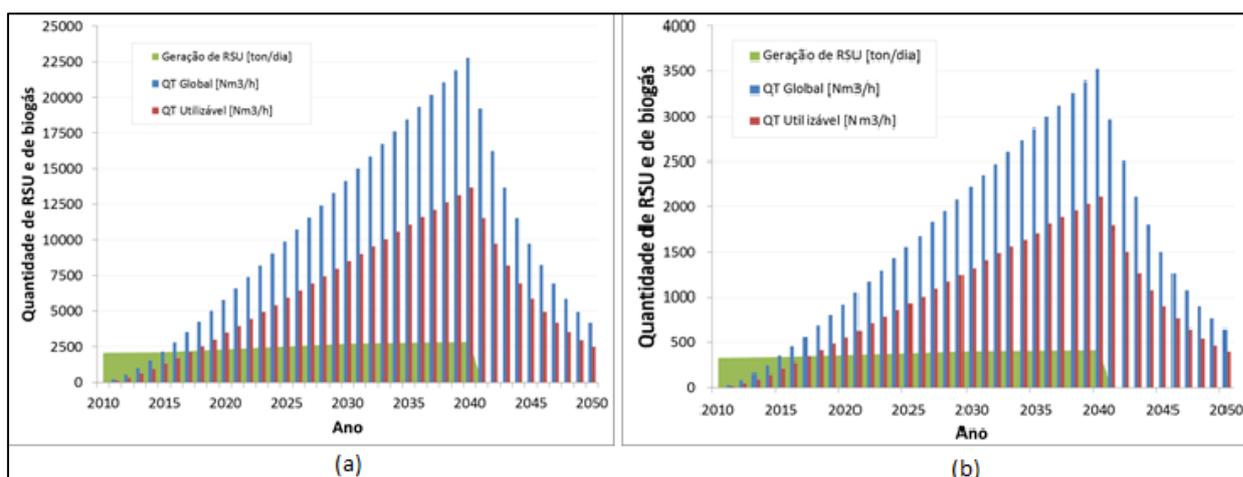


Figura 23 - Resultado da geração de RSU e metano. (a) Belo Horizonte; (b) Betim.
Fonte: Fonseca, 2016.

Devido ao maior índice populacional e geração de resíduos Belo Horizonte possui uma maior geração de metano global e utilizável. Os dados foram utilizados para cálculos de geração de eletricidade nos dois cenários.

A análise energética se dá através do ciclo a vapor (ciclo Rankine) onde serão estudados três cenários utilizando resíduos sólidos urbanos como combustível. Para a análise dos ciclos foram realizadas algumas considerações como: regime permanente em todos os componentes, energia cinética e potencial desprezíveis. As características dos cenários estão apresentadas na Tabela 11. Já os diagramas esquemáticos do primeiro, segundo e terceiro cenários estão mostrados nas Figuras 24, 25 e 26, respectivamente.

Tabela 11 - Características dos Cenários 1, 2 e 3.

| | CENÁRIO 1 | CENÁRIO 2 | CENÁRIO 3 |
|--|-----------|-----------|-----------|
| Rendimento Térmico Caldeira | 90% | 90% | 90% |
| Pressão de Trabalho Caldeira | 4,2 Mpa | 8,2 MPa | 8,2 MPa |
| Temperatura de trabalho da Caldeira | 420 °C | 420°C | 420°C |
| Temperatura no Reaquecedor | -- | 400°C | 400°C |
| Eficiência Isoentrópica da Turbina | 80% | -- | -- |
| Eficiência da Turbina de Alta Pressão | -- | 82% | 82% |
| Eficiência da Turbina de Baixa Pressão | -- | 75% | 75% |
| Pressão de Trabalho Condensador | 15 kPa | 15 kPa | 15 kPa |
| Vazão mássica | 10 ton/h | 10 ton/h | 15 ton/h |

Fonte: Fonseca, 2016 (adaptado).

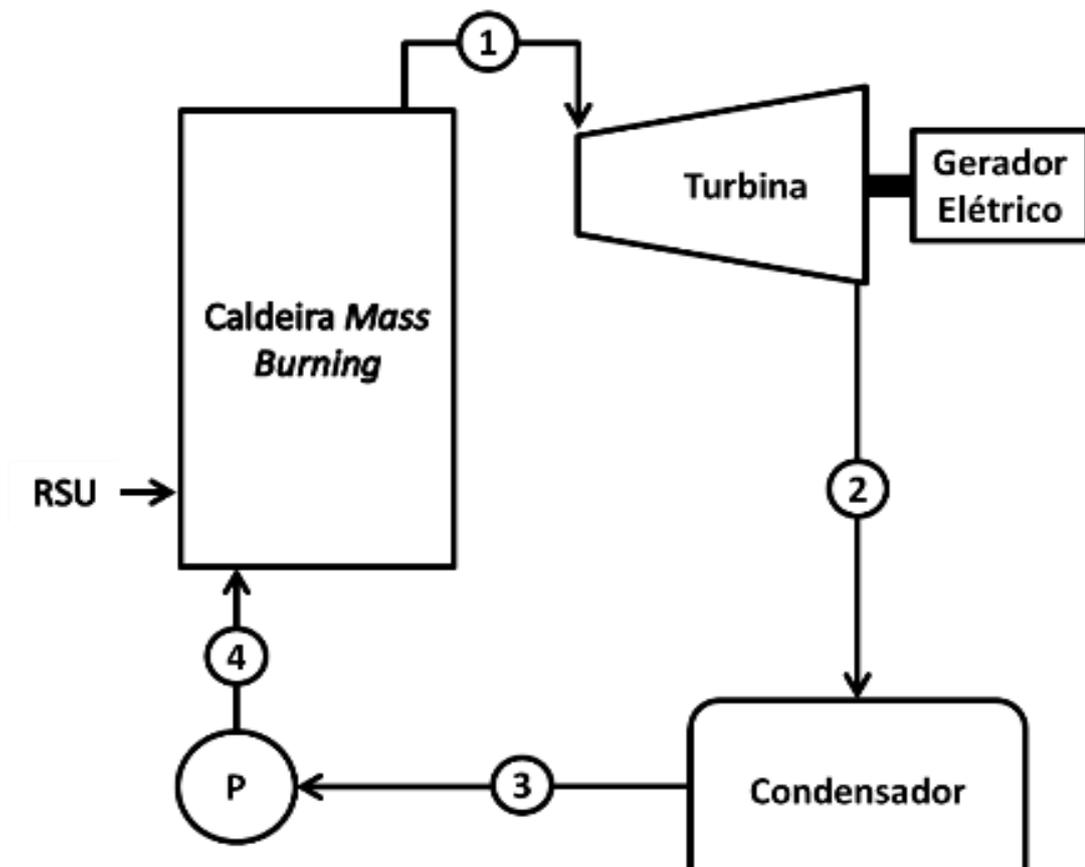


Figura 24 – Diagrama esquemático do primeiro cenário avaliado.
Fonte: Fonseca, 2016.

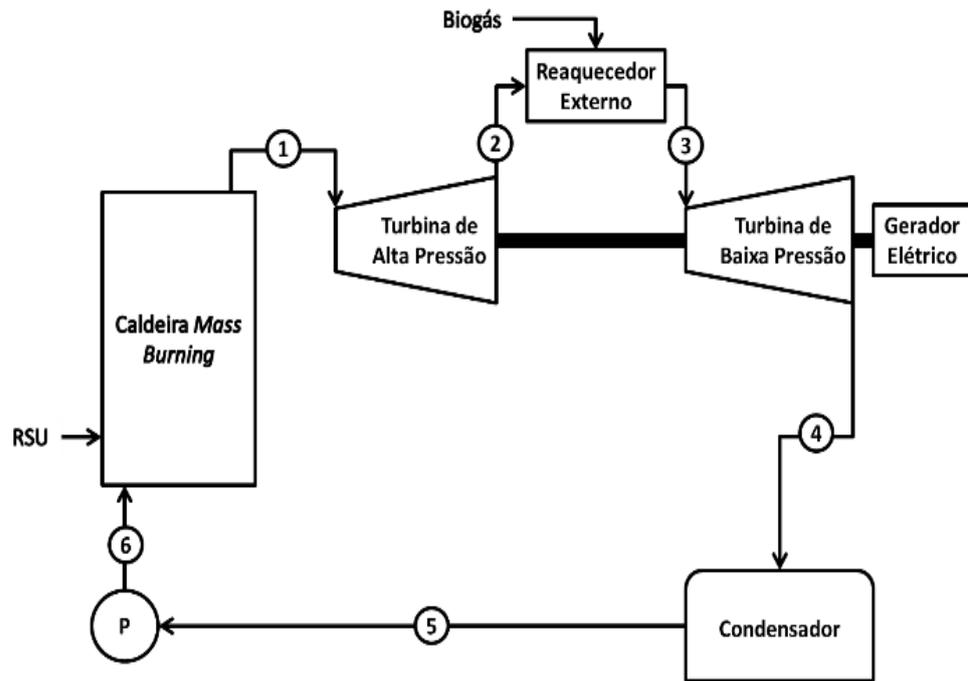


Figura 25 – Diagrama esquemático do segundo cenário avaliado.
Fonte: Fonseca, 2016.

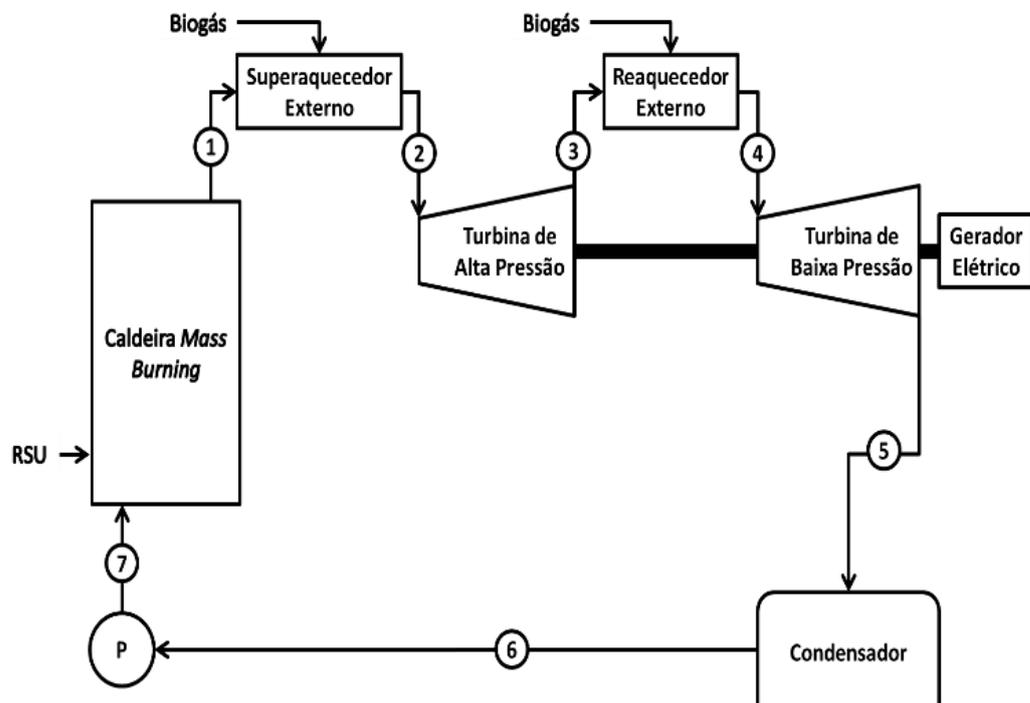


Figura 26 – Diagrama esquemático do terceiro cenário avaliado.
Fonte: Fonseca, 2016.

Em prol de adquirir uma maior geração de energia elétrica, foi estudado os melhores pontos de operação para as seguintes cidades. Desta forma foi considerado os seguintes dados das Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Dados para análise energética dos ciclos utilizados na cidade de Belo Horizonte.

| Dados | Valor (Cenário 1) | Valor (Cenário 2) | Valor (Cenário 3) |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| PCI dos RSU | 7436,21 [kJ/kg] | 7436,21 [kJ/kg] | 7436,21 [kJ/kg] |
| PCI do Biogás | - | 14468 [kJ/Nm ³] | 14468 [kJ/Nm ³] |
| Vazão mássica de RSU | 10 [ton/h] | 10 [ton/h] | 15 [ton/h] |
| Vazão mássica de Biogás | - | 658 [Nm ³ /h] | 1288 [Nm ³ /h] |
| Temperatura de entrada da água na caldeira | 80 [°C] | 80 [°C] | 80 [°C] |
| Temperatura de saída do vapor na caldeira | 420 [°C] | 420 [°C] | 420 [°C] |
| Pressão de saída do vapor na caldeira | 42 [bar] | 82 [bar] | 82 [bar] |
| Temperatura de saída do vapor do superaquecedor | - | - | 500 [°C] |
| Pressão de saída do vapor do superaquecedor | - | - | 79,5 [bar] |
| Eficiência isentrópica da turbina de alta pressão | 0,80 | 0,82 | 0,82 |
| Temperatura de saída do vapor do reaquecedor | - | 400 [°C] | 420 [°C] |
| Pressão do vapor no reaquecedor | - | 23 [bar] | 23 [bar] |
| Eficiência isentrópica da turbina de baixa pressão | - | 0,75 | 0,75 |
| Pressão do vapor na saída do condensador | 0,15 [bar] | 0,15 [bar] | 0,15 [bar] |
| Efetividade TC do condensador | 0,75 | 0,75 | 0,75 |

Fonte: Fonseca, 2016 (adaptado).

Tabela 13- Dados para análise energética dos ciclos utilizados na cidade de Betim.

| Dados | Valor (Ciclo Simples) | Valor (Ciclo com Reaquecimento) | Valor (Ciclo com Superaquecedor e Reaquecedor) |
|--|----------------------------------|--|---|
| PCI dos RSU | 7977,09 [kJ/kg] | 7977,09 [kJ/kg] | 7977,09 [kJ/kg] |
| PCI do Biogás | - | 14468 [kJ/Nm ³] | 14468 [kJ/Nm ³] |
| Vazão mássica de RSU | 10 [ton/h] | 10 [ton/h] | 10 [ton/h] |
| Vazão mássica de Biogás | - | 355 [Nm ³ /h] | 355 [Nm ³ /h] |
| Temperatura de entrada da água na caldeira | 80 [°C] | 80 [°C] | 80 [°C] |
| Temperatura de saída do vapor na caldeira | 420 [°C] | 420 [°C] | 420 [°C] |
| Pressão de saída da água na caldeira | 42 [bar] | 82 [bar] | 82 [bar] |
| Temperatura de saída do vapor do superaquecedor | - | - | - |
| Pressão de saída do vapor do superaquecedor | - | - | - |
| Eficiência isentrópica da turbina de alta pressão | 0,80 | 0,82 | 0,82 |
| Temperatura de saída do vapor do reaquecedor | - | 330 [°C] | 330 [°C] |
| Pressão de saída do vapor do reaquecedor | - | 23 [bar] | 23 [bar] |
| Eficiência isentrópica da turbina de baixa pressão | - | 0,75 | 0,75 |
| Pressão do vapor na entrada do condensador | 0,15 [bar] | 0,15 [bar] | 0,15 [bar] |
| Efetividade TC do condensador | 0,75 | 0,75 | 0,75 |

Fonte: Fonseca, 2016 (adaptado).

As Tabelas 12 e 13 mostram que a vazão mássica de biogás para a cidade de Belo Horizonte é maior que a de Betim no cenário 2 devido a sua maior geração de resíduos sólidos. Houve um aumento da vazão de biogás para 1288 Nm³/h e também a vazão mássica de RSU de 10 para 15 ton/h nos ciclos de cenário 2 e 3, tendo em vista a produção de biogás conseguir suprir esta vazão. Já em Betim a vazão mássica de biogás não é suficiente para a aplicação nos cenários 2 e 3.

A Figura 27 apresenta os resultados de geração elétrica e a eficiência dos ciclos de acordo com os dados e considerações adotadas anteriormente.

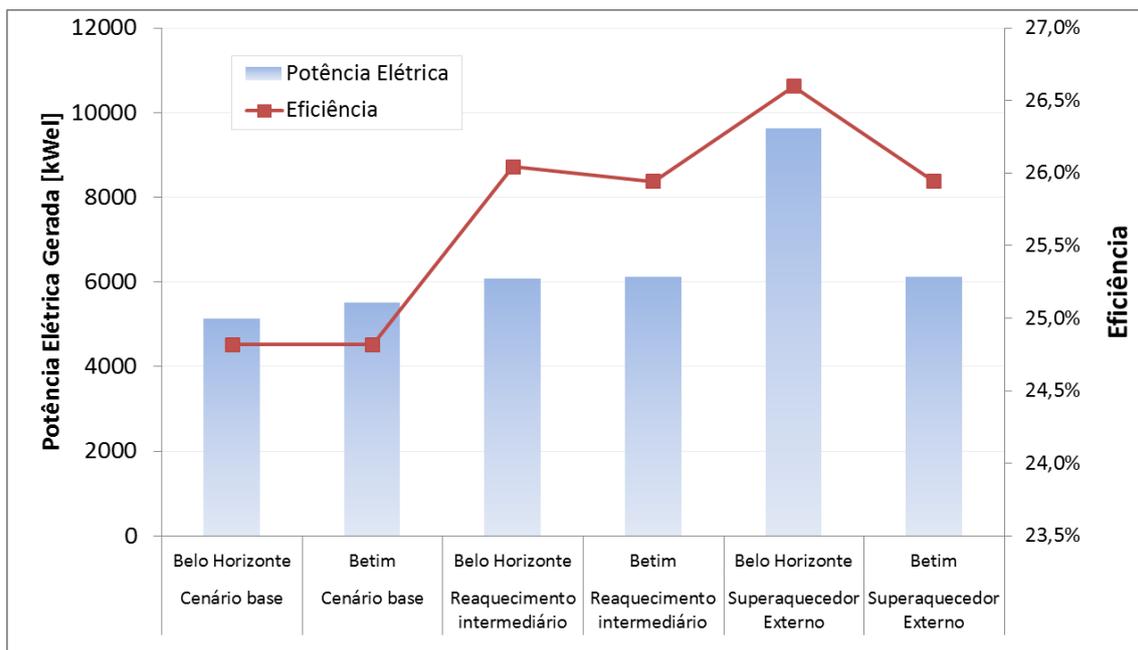


Figura 27 - Resultados para a eficiência e para a geração de eletricidade nos cenários propostos.
Fonte: Fonseca, 2016.

De acordo com a Figura 27 e os dados gerados nota-se que o cenário 3 para a cidade de Belo Horizonte obteve a maior eficiência e a maior potência elétrica dos ciclos em questão estudados, sendo assim o mais apropriado, isso se dá pela maior geração de resíduos e biogás sendo possível assim um aumento na vazão mássica. Já para a cidade de Betim o ciclo que apresentou melhor comportamento foi o ciclo Rankine com reaquecimento intermediário como visto no cenário 2, observando uma maior geração de energia elétrica e eficiência. Nota-se uma diferença de comportamento entre os cenários devido a diferença populacional e de geração de resíduos sólidos urbanos e biogás entre as cidades.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente capítulo irá discorrer sobre as conclusões tiradas a partir dos dados apresentados no capítulo 4 através da metodologia utilizada. E, também, recomendar trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

Em virtude do aumento na demanda energética e a preocupação ambiental busca-se suprir a necessidade energética do país, através de novas fontes de energias, preferivelmente renováveis onde apresenta abertura para crescente utilização dos processos de incineração e o aproveitamento energético do biogás.

Dos resultados apresentados no capítulo 4 observa-se que a geração de energia atinge valores na escala de GWh/GWth tanto de energia térmica quanto elétrica podendo ser utilizado para as atividades humanas que necessitam de energia. A pergunta problema deste trabalho disserta sobre o uso de resíduos sólidos urbanos ser tecnicamente viável em termos de eficiência energética, a qual, conforme resultados, foi respondida.

Já com relação aos objetivos, o objetivo principal trata da análise técnica de três estudos de caso envolvendo sistemas de geração de energia com a utilização de resíduos sólidos urbanos destinados aos aterros sanitários como combustível para geração de energia elétrica e térmica em máquinas térmicas com vistas à sustentabilidade. Através dos resultados apresentados mostrados no capítulo 4, pode-se afirmar que o objetivo foi cumprido.

O primeiro estudo de caso envolveu os dados de coleta de resíduos sólidos de quatro cidades do estado de Minas Gerais: Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim. E constatou-se que a produção de metano teve um maior valor de 1000 m³/h para a cidade de Contagem/MG e de 400 m³/h para a cidade de Betim/MG no ano de 2040.

Para o ano de pico de produção de metano (2040) na cidade de Contagem tendo em vista a produção de energia elétrica, o motor J.412 apresentou melhor desempenho com produção de 19,96 GWh. Já no uso da turbina OPRA, obteve rendimento inferior aos motores, tendo uma produção de 12,83 GWh. Do ponto de vista térmico o motor J.320 apresentou melhor desempenho com uma produção de 21,48 GWh e pior desempenho para turbina OPRA tendo como produção 13,01. Já para o mesmo ano na cidade de Betim o melhor desempenho em produção de energia elétrica e térmica foram com o Motor J.412 obtendo 6,65 GWh e Motor

J.320 obtendo 7,16 GWh respectivamente, e o pior desempenho para a turbina OPRA obtendo 5,26 GWh e 5,34 GWh, respectivamente.

O segundo estudo de caso envolveu diferentes variações para as condições de trabalho apresentadas utilizando microturbinas a gás e mostra que o ciclo regenerativo apresenta boas eficiências elétricas e térmicas principalmente para a temperatura de entrada da turbina equivalente a 1200K com razão de pressão igual a 4, sendo os maiores valores obtidos para as eficiência do compressor de 0,80, da turbina de 0,83 e de regenerador de 0,80, com valores variando entre 33,6 e 34,3%, e 35 e 36%, respectivamente.

No terceiro estudo de caso envolveu três cenários diferentes para o ciclo a vapor utilizando caldeira *mass burning* e coleta de dados de resíduos sólidos de Belo Horizonte e Betim. Entre os três ciclos propostos o que obteve melhores resultados para a cidade de Belo Horizonte foi o ciclo com superaquecimento, com eficiência de 26,6% e produzindo 9,6 MWel. Já para Betim o ciclo que obteve melhor resultado foi o reaquecimento intermediário, com eficiência de 25,9% e produzindo 6,1 MWel.

Segundo Júnior (2003) constata-se uma eficiência global de 42,2% para um sistema utilizando ciclo Rankine em uma planta termelétrica. Desta forma, nota-se uma menor eficiência no estudo de caso 3 devido a diferença de combustível e equipamentos utilizados.

Para Potter *et al.* (2007) o desempenho real de ciclos Brayton básicos está em torno de 35 a 38%. Pode-se concluir que para o sistema de geração a vapor os resultados estão bem próximos aos dos sistemas convencionais, sendo viáveis para aplicação de combustível oriundo de resíduos sólidos urbanos.

Segundo Roso *et al.* (2016) os motores de combustão interna a Diesel possuem uma eficiência de 40% em seu ciclo básico. Assim, comprova-se através do estudo de caso que a utilização dos motores a Diesel é compatível para utilização de metano como combustível.

As tecnologias apresentadas mostram que o uso de resíduos sólidos urbanos podem ser uma alternativa tecnicamente viável para a produção de eletricidade.

5.2 Recomendações

A finalidade deste trabalho, como também os resultados e conclusões apresentadas referentes ao uso de tecnologias utilizando sistemas térmicos e máquinas térmicas apresentaram soluções satisfatórias para o objetivo em questão, porém ainda há várias maneiras de se utilizar máquinas térmicas para geração de energia. Ou seja, outras pesquisas com diferentes sistemas e máquinas podem ser realizadas objetivando o aumento da eficiência dos ciclos termodinâmicos já analisados, um aprofundamento dos estudos para o ciclo Rankine utilizando caldeira *mass burning* e uma análise econômica dos sistemas já apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, p.71, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental. **URU – Barueri (unidade de recuperação energética de resíduos sólidos)**. Disponível em <<http://www.abes-mg.org.br/visualizacao-de-clipping/ler/5808/ure-barueri-unidade-de-recuperacao-energetica-de-residuos-solidos>>. Acesso em 30 jun. 2018.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. São Paulo, 2017.

ANEEL – Agência nacional de energia elétrica. **Parte II Fontes renováveis**. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em 12 jul. 2018.

ARAÚJO, G.C; SILVA, R.P. **Desenvolvimento Sustentável do Meio Ambiente: Estudo no Instituto Souza Cruz**. Anais do 2º Congresso Brasileiro de Extensão Universitária. Belo Horizonte, 2004.

ARRIGONE, G.M.; MUTTI, C.N.; FERROLI, P.C.M.; LIBRELOTTO, L.I. **Geração de resíduos urbanos: coleta e tratamento, exemplos do norte da Itália**. UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Edição 1, 2015.

BIG - Banco de Informações de Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Capacidade de geração do Brasil**. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 02 out. 2018.

BRITO FILHO, L.F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2005.

BORGNACKE C.; SOONTAG R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. 7ª edição. Americana – SP. Blucher, 2009.

CARVALHO, A.M.; SILVA, C.H.F.; LORA, E.E.S.; NASCIMENTO, M.A.R.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R.V.; COBAS, V.R.M. **Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída**. Programa P&D CEMIG/ANEEL. Minas Gerais, 2007.

ÇENGEL Y. A.; BOLES M. A. **Termodinâmica**. 5ª edição. AMGH Editora Ltda, 2006.

ÇENGEL Y. A.; BOLES M. A. **Termodinâmica**. 7ª edição. AMGH Editora Ltda, 2013.

CETESB - Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo (São Paulo). 2013. **Aterro Sanitário**. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br/mudancasclimaticas/biogás/Aterro%20Sanit%C3%Alrio/21Aterro%20Sanit%C3%Alrio/>>: Acesso em: 26 jun. 2018.

CETESB - Companhia Ambiental Do Estado de São Paulo (São Paulo). 2016. **Aterro Sanitário**. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br/proclima/2016/07/14/os-criterios-para-a-implantacao-de-aterros-sanitarios/>>: Acesso em: 28 jun. 2018.

CETESB/SMA – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA-SP –Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Relatório técnico n.º 2 do convênio SMA/MCT n.º 01.0052.00/2001 – aterros**. São Paulo, 2003.

CMMAD – COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. Relatório Brundtland. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1998.

DAMICO, R.V.L.; MACINI, N.; FERREIRA, T.C.; ALVES, M.F.R.; CALIA, R.C. **Redes para a sustentabilidade: estudos de caso sobre o manejo dos resíduos sólidos no brasil**. Organização e Sustentabilidade, Londrina, Vol. 6 (2), pp. 72-88, 2018.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership. **Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies**. v.1.1. United States, april 2007.

FIGUEIREDO, N.J.V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso**. Programa de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FONSECA, M.X. **Análise técnica de um sistema de geração de energia através do uso de resíduos sólidos urbanos e caldeira *mass burning*: O caso de dois municípios de Minas Gerais.** Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Orientações básicas para operação de aterro sanitário.** Belo Horizonte, 2006.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Atlas, 1999. GUEDES L. C. V. Guia de estudo: Máquinas térmicas. Centro Universitário do Sul de Minas Unis-MG. Acesso em 26/06/2016.

ITÔ, L.C. **Geração de Energia Elétrica A Partir de Resíduos Sólidos Urbanos.** Trabalho de conclusão de curso. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

JÚNIOR, J.G.F.S. **Análise energética e exergética de um ciclo rankine com aquecimento distrital: estudo de uma planta termelétrica.** Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, 2003.

LASSU - Laboratorio de Sustentabilidade da Universidade de São Paulo (São Paulo). **Pilares da sustentabilidade.** Disponível em < <http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/pilares-da-sustentabilidade/>>: Acesso em: 27 jun. 2018.

MANTEGAZZA, P.; CABEZAS-GÓMEZ, L.; MAGAZONI, F. C. **Modelagem de uma turbina radial para o ciclo de Rankine orgânico pelo método da linha média.** Revista Eletrônica Paulista de Matemática. Vol. 10, pp. 50-67. 2017.

MARTINEZ. J.H.C. **Análise Termoeconômica de um ciclo a gás regenerativo com injeção de etanol na entrada do compressor.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2016.

MENDES, G. cebds - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável. **Os desafios e vantagens da sustentabilidade empresarial aplicada.** Disponível em <<http://cebds.org/blog/sustentabilidade-empresarial/#.W5vI1M5KjIU>>. Acesso em 14 set. 2018.

MENESES, E.L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas.** Trabalho de conclusão de curso. Curso de Tecnologia em Construção Naval da UEZO. Rio de Janeiro, 2011.

MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** 22ª edição. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário.** Disponível em < <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em 06 fev. 2019.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável.** Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD. SÃO PAULO, 2010.

MORAN, J.M; HOWARD, N.S; BOETTNER, D.D; BAILEY, M.B. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 7ª edição. LTC Editora Ltda, 2013.

NEVES, S.C. **Análise de um ciclo combinado Brayton-Rankine com a utilização de dióxido de carbono supercrítico.** Trabalho de conclusão de curso da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

ORNL - Oak Ridge National Laboratory. **Guide to Low-Emission Boiler and Combustion Equipment Selection.** April 2002.

OLIVEIRA, G.P. **Estudo do desempenho de microturbinas a gás utilizando biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica.** Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2015.

PEREIRA, M.L.; LUCENA, W.G.L.; PAIVA, S.B. **Determinantes da divulgação voluntária do relatório de sustentabilidade nas empresas de energia elétrica e de telecomunicações listadas na BM&FBOVESPA.** Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. Vol. 7, pp. 300-321.2018.

PORTAL RMC - **Noticias da Região Metropolitana de Campinas**. Disponível em <<http://www.portaldarmc.com.br/noticias-da-regiao/2013/06/conheca-as-diferencas-entre-lixao-e-aterro-sanitario/>>. Acesso em 28 jun. 2018.

POTTER, M.C.; SCOTT, E.P. **Ciências Térmicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor**. 2007.

PCN. Parâmetros curriculares nacionais - **Meio Ambiente e Saúde**. **Ministério da Educação. Secretaria da Educação Fundamental**. 3a. ed. Brasília, 2001.

PEREIRA, G.A. **Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas**. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2017.

PNRS. Decreto n. 12.305, de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, 2010.

PORTELLA, R.B.; DE CARVALHO, J.L.V.; DE JESUS, S.C. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares e Comerciais do Centro da Cidade de Barreiras – Bahia**, 2014.

REIS, F. A. G. V. Curso de Geologia Ambiental via Internet. UNESP - Universidade Estadual Paulista. **Formas de Disposição de Resíduos**. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res12.html>>. Acesso em 28 jun. 2018.

RELATÓRIO BRUNDTLAND, **Our Common Future**, 1987. Disponível em <<https://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>>. Acesso em 18/06/2019.

REPINALDO. V.P. **Otimização de um ciclo Brayton irreversível com regeneração, inter-resfriamento e reaquecimento**. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da UNESP. São Paulo, 2013.

ROSO, V.R.; NORA, M.D.; MARTINS, M, E, S.; MACHADO, P. M. **Consumo de combustível e emissões de poluentes em um motor Diesel convertido a etanol para geração térmica de energia elétrica**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas. V.37, n.1, p. 131 – 142. Londrina, 2016.

SAMPAIO, R.P. **Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduos (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana.** Dissertação de Mestrado na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

SILVA, S.P. **A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilema e potencialidades sob a ótica da economia solidária.** Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2017.

SILVA, D. F.; LIMA, G. F. C. **Empresas e Meio Ambiente: Contribuições da Legislação Ambiental.** INTERthesis, Florianópolis, Vol. 10 (2), pp. 334-359, 2013.

SENADO FEDERAL. **Em discussão! Como alguns países tratam seus resíduos.** Disponível em < <https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/residuos-solidos/mundo-rumo-a-4-bilhoes-de-toneladas-por-ano/como-alguns-paises-tratam-seus-residuos>>. Acesso em 02 out. 2018.

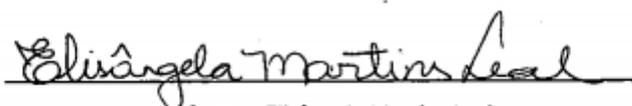
VGRESÍDUOS - **Diferença entre destinação e composição final.** 2017. Disponível em <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/diferenca-destinacao-disposicao-final/>>. Acesso em 28 jun. 2018.

VARELLA C. A. A. **Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos.** 2ª edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2001.

Certifico que a aluna JESSICA MAZIOLI, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado "ANÁLISE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA USANDO RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDOS DE CASO", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 09 de julho de 2019.

A handwritten signature in black ink, reading "Elisângela Martins Leal", is written over a horizontal line.

Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Orientadora