



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO –  
UFOP  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



**GUSTAVO ANTONIO PEREIRA**

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
USANDO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO E MÁQUINAS  
TÉRMICAS**

**OURO PRETO - MG  
2017**

**GUSTAVO ANTONIO PEREIRA**  
**gustavoap65@hotmail.com**

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
USANDO BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO E MÁQUINAS  
TÉRMICAS**

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**  
**2017**

P436a

Pereira, Gustavo Antonio.

Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas [manuscrito] / Gustavo Antonio Pereira. - 2017.

91f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Cidades e vilas - Meio ambiente - Resíduos sólidos. 2. Sustentabilidade. 3. Aterro sanitário. 4. Recursos energeticos. 5. Termodinâmica - Máquinas térmicas. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ATA DA DEFESA**

Ao 30º dia do mês de março do ano de dois mil e dezessete às 16 horas, na sala 04, localizada na Escola de Minas - Campus Morro do Cruzeiro - UFOP, foi realizada a defesa de monografia do aluno **Gustavo Antonio Pereira**, sendo a comissão examinadora constituída por: Profa. DSc. Zirlene Alves da Silva Santos, Prof. MSc. Sávio Sade Tayer e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: “**Análise Técnica de um Sistema de Geração de Energia usando Biogás de Aterro Sanitário e Máquinas Térmicas**”, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado com a nota/conceito 9,5.

Ouro Preto, 30 de março de 2017.

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal

**Professora Orientadora**

Profa. DSc. Zirlene Alves da Silva Santos

**Professora Avaliadora**

Prof. MSc. Sávio Sade Tayer

**Professor Avaliador**

Gustavo Antonio Pereira

**Aluno**

Dedico esse trabalho a todas as minorias que sofrem com o preconceito diariamente, sejam eles devido ao racismo, ao machismo, à orientação sexual, à identidade de gênero, à condição social, entre tantos outros.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe por todo o apoio desde o início.

À minha professora orientadora Elisangela Martins Leal, pelo auxílio no trabalho e pelo incentivo desde sempre.

Aos meus amigos de Ouro Preto, que ao longo desses 5 anos se tornaram minha família me ensinando continuamente a ser um ser humano melhor.

E, finalmente, à mim, por todo esforço e força de vontade para ter conseguido me graduar, sonho este trilhado desde 2010 com muita dificuldade.

*“Somos o resultado dos livros que lemos, das viagens que fazemos e das pessoas que amamos”.*

Airton Ortiz



## RESUMO

PEREIRA, G. A. Análise técnica de um sistema de geração de energia usando biogás de aterro sanitário e máquinas térmicas. 2017. (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Ouro Preto.

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. Devido ao alto volume de lixo produzido, por determinação da Lei nº 12.305/10 (Política Nacional dos Resíduos Sólidos), o Estado obrigou todos os municípios brasileiros a destinarem seus RSU's de forma correta à natureza, ou seja, para aterros sanitários. Durante o processo de decomposição da matéria orgânica estocada nestes locais, há formação de biogás que pode ser utilizado na geração de energia elétrica e térmica porquanto é possível canalizar este gás e usá-lo como combustível por máquinas térmicas. Nesse trabalho, foram utilizados três motores da *Jenbacher* e uma turbina da *OPRA Turbines* acionados pelo gás de aterro dos municípios mineiros de Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim. Os municípios passaram por simulação de geração de metano através da versão 4 da metodologia "*Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site*", modelo da UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) enquanto que os equipamentos passaram por simulação de geração de potência elétrica e térmica pela metodologia do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Os cenários registraram índices da ordem de GWh/GWth, o que comprovou uma viabilidade técnica de utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia. Devido aos portes dos municípios, as potências de energias geradas são decrescentes seguindo a ordem: Contagem; Uberlândia; Uberaba; e Betim, pois há proporcionalidade do número de habitantes para a quantidade de lixo gerado, logo, maior vazão de biogás produzida nos aterros. Em relação às eficiências térmicas e elétricas dos equipamentos, constatou-se que a turbina mostrou-se viável para cidades de pequeno porte pelo fato de possuir menor perda de potência que os motores, já para cidades de médio e de grande porte, os motores são os mais adequados, pois possuem maior eficiência. O uso do biogás é, também, uma alternativa sustentável, uma vez que o produto de combustão será o gás carbônico ao invés de emitir metano diretamente para o meio ambiente (o potencial de aquecimento global do metano é vinte e uma vezes maior que o do gás carbônico).

**Palavras-chave:** sustentabilidade; resíduos sólidos urbanos; aterro sanitário; geração de energia; máquinas térmicas; viabilidade técnica.

## ABSTRACT

*PEREIRA, G. A. Technical analysis of an energy generation system using landfill biogas and thermal engines. 2017. (Graduation in Mechanical Engineering). Federal University of Ouro Preto.*

*The high rates of industrialization and urbanization worldwide lead to a rampant and increasing consumption of goods, which leads to the generation of municipal solid waste. Due to the high volume of garbage produced, by the determination of Law n°. 12.305/10 (National Policy on Solid Waste), the State obliged all Brazilian municipalities to destine their MSW in a correct way to the nature, in other words, landfills. During the process of decomposition of the organic matter stored in these places, there is formation of biogas that can be used in the generation of electric and thermal energy because it is possible to channel this gas and to use it as fuel by thermal machines. In this work, three engines of Jenbacher and one turbine of OPRA Turbinas were used in the Minas Gerais's cities of Contagem, Uberlândia, Uberaba and Betim. The municipalities underwent simulation of methane generation through version 4 of the methodology "Tool to determine the methane emissions avoided from the disposal of waste in a sanitary landfill", model of the UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), while the equipments passed through simulation of generation of electric and thermal energy of methodology IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). The scenarios recorded indexes of the order of GWh/GWth, which proved a technical feasibility of using landfill biogas for power generation. Due to the ports of the municipalities, the powers of generated energies are descending following an order: Contagem; Uberlândia; Uberaba; and Betim, because there is proportionality of the number of inhabitants to the amount of garbage generated, thus, a higher flow of biogas produced in landfills. Regarding the thermal and electrical efficiencies of the equipment, it was verified that the turbine proved to be feasible for small cities due to the fact that it has less power loss than the motors, for medium and large cities, the motors are the most appropriate because they have greater efficiency. The use of biogas is also a sustainable alternative, since the product of combustion will be carbon dioxide rather than methane directly into the environment (the global warming potential of methane is twenty-one times greater than that of carbon dioxide).*

**Keywords:** *sustainability; urban solid waste; landfill; power generation; thermal machines; technical viability.*

## LISTA DE SÍMBOLOS

**L<sub>o</sub>**: Potencial para geração de resíduos de metano [kg de CH<sub>4</sub> / kg de MSW];

**C<sub>p</sub>**: Calor específico à pressão constante [J/(kg.K)];

***m***: vazão mássica [kg/s];

**η**: eficiência;

**η<sub>el</sub>**: eficiência elétrica [%];

**η<sub>th</sub>**: eficiência térmica [%];

**ρ<sub>CH<sub>4</sub></sub>**: Massa específica do metano [kg / m<sup>3</sup>];

**v**: volume da câmara de combustão;

**r<sub>p</sub>**: razão de pressão;

**Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>**: taxa de produção de metano: [m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / ano];

**pH**: Potencial hidrogeniônico;

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

**C**: cilindrada [cm<sup>3</sup>];

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

**COD<sub>f</sub>**: 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<sup>-1</sup>];

**L<sub>o</sub>**: Potencial de geração de metano [*m*<sup>3</sup> / tonelada de lixo];

**M**: massa [kg];

**P**: Pressão;

**PMI**: Ponto morto inferior;

**PMS**: Ponto morto superior;

**Pop<sub>urb</sub>**: Número de habitantes em uma área urbana [habitantes];

**Q**: Calor [J / cal];

**Q<sub>H</sub>**: Energia térmica absorvida pela câmara de combustão;

**Q<sub>L</sub>**: Energia térmica rejeitada pela turbina;

**QT**: Total de emissões no ano T de resíduos eliminados em anos anteriores (incluindo o ano T)  
[m<sup>3</sup> / 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;

**R<sub>x</sub>**: Quantidade de resíduos depositados no ano x [kg];

**t**: tempo [anos];

**T**: Temperatura [K / °C];

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

**TC**: Taxa de compressão;

**V**: Volume;

**X**: Ano de entrada de resíduos;

**W**: Trabalho [J].

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Os três pilares da sustentabilidade. ....	2
Figura 2. Coleta global e per capita de RSU no Brasil para os anos 2010 e 2011. ....	2
Figura 3. Disposição final dos RSU coletados no Brasil.....	3
Figura 4. Composição gravimétrica dos RSU no Brasil.....	4
Figura 5. Bases da sustentabilidade.....	12
Figura 6. Figura esquemática de um aterro sanitário.....	15
Figura 7. Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás. ....	21
Figura 8. Turbina a gás mostrando seus componentes. ....	29
Figura 9. Partes de uma turbina a gás, materiais de construção e forma de produção. ....	31
Figura 10. Ciclo ideal Brayton: a esquerda o esquema da turbina a gás e a direita os diagramas P-v e T-s.....	34
Figura 11. Ponto Morto Superior e Ponto Morto Inferior. ....	37
Figura 12. Diagramas $P \times V$ e $T \times s$ do ciclo Diesel Ideal.....	40
Figura 13. Geração de metano para a cidade de Contagem.....	49
Figura 14. Geração de metano para a cidade de Uberlândia. ....	50
Figura 15. Geração de metano para a cidade de Uberaba. ....	50
Figura 16. Geração de metano para a cidade de Betim. ....	51
Figura 17. Produção de eletricidade para a cidade de Contagem.....	53
Figura 18. Produção de eletricidade para a cidade de Uberlândia.....	54
Figura 19. Produção de eletricidade para a cidade de Uberaba.....	55
Figura 20. Produção de eletricidade para a cidade de Betim.....	56
Figura 21. Produção de energia térmica para a cidade de Contagem.....	58
Figura 22. Produção de energia térmica para a cidade de Uberlândia. ....	59
Figura 23. Produção de energia térmica para a cidade de Uberaba.....	60
Figura 24. Produção de energia térmica para a cidade de Betim. ....	61

Figura 25. Energia elétrica produzida em 2040.....	63
Figura 26. Energia térmica produzida em 2040. ....	64

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Potencial de geração de eletricidade a partir de biogás. ....	7
Tabela 2. Valores para quantidade de carbono degradável. ....	25
Tabela 3. Sugestão de valores para taxa de geração de metano. ....	26
Tabela 4. Variáveis e Indicadores de Pesquisa. ....	46
Tabela 5. Combinações possíveis utilizadas no trabalho. ....	48

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	6
1.3	Objetivos.....	8
1.3.1	Geral .....	8
1.3.2	Específicos.....	8
1.4	Estrutura do Trabalho .....	9
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1	Sustentabilidade.....	10
2.2	A Evolução da Questão Ambiental no Brasil.....	13
2.3	Aterro Sanitário .....	15
2.4	Sistemas de Coleta, Extração e Tratamento do Biogás de Aterro.....	17
2.5	Biogás .....	18
2.6	Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás .....	22
2.7	Turbina a Gás.....	28
2.7.1	Ciclo Ideal Brayton.....	33
2.7.2	Equações - Ciclo Ideal Brayton .....	34
2.8	Motores de Combustão Interna.....	36
2.8.1	Motor Diesel de Quatro Tempos .....	39
2.8.2	Ciclo Diesel Ideal .....	40
2.9	Considerações Finais .....	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
3.1	Tipo de Pesquisa.....	43
3.2	Materiais e Métodos .....	45
3.3	Variáveis e Indicadores .....	45
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	47
3.5	Tabulação de Dados.....	47
3.6	Considerações Finais do Capítulo .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
4.1	Seleção das tecnologias de geração de energia .....	48
4.2	Estimativa de geração de metano .....	49

4.3	Produção de energia elétrica.....	52
4.4	Produção de energia térmica.....	57
4.5	Comparação entre as combinações.....	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>65</b>
5.1	Conclusão .....	65
5.2	Recomendações .....	67
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será apresentada uma abordagem teórica sobre a geração de metano a partir de resíduos sólidos urbanos e o uso do biogás em uma máquina térmica 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 demanda energética mundial só tende a crescer devido ao constante processo de industrialização e de urbanização. Logo, é notável a importância do estudo de novas tecnologias para aprimorar esses processos a fim de atenuar os impactos ao meio ambiente uma vez que este já se encontra bastante degradado e poluído devido à exploração de recursos hídricos, florestais e minerais desenfreados e aos volumes de resíduos sólidos urbanos produzidos em larga escala.

O *Department of Economic and Social Affairs Population Division* (2005) afirma que o século XX testemunhou a rápida urbanização da população mundial. A proporção global da população urbana aumentou de 13% em 1900 para 29% em 1950 e, de acordo com a *Revision of World Urbanization Prospects*, chegou a 49% em 2005. Desde que o mundo é projetado para continuar a urbanizar, 60% da população mundial está prevista para viver em cidades até 2030.

Dessa maneira, o conceito de sustentabilidade se incorpora a esta nova realidade mundial na qual deve-se pensar não somente no meio ambiente, mas no impacto que a sociedade sofrerá e qual será o custo-benefício de um certo projeto. Os três pilares da sustentabilidade são mostrados na Figura 1.

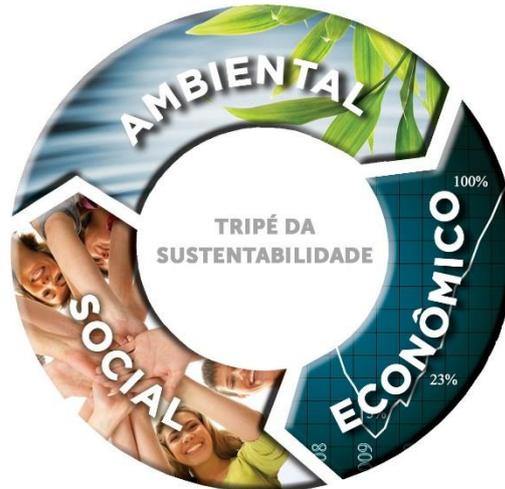


Figura 1. Os três pilares da sustentabilidade.  
Fonte: Delboni Auriemo, 2016.

A Figura 1 mostra os três alicerces que compõem a sustentabilidade. Atualmente, se preocupar com questões somente ambientais já não atendem mais as expectativas das empresas no mundo, elas também avaliam o impacto social e econômico de seus projetos, ou seja, só faz sentido se a sociedade tiver um ganho, a parte econômica for viável e o meio ambiente sofrer um impacto benéfico.

Partindo das ideias anteriores, há a preocupação quanto a questão do volume de lixo produzido no Brasil sem a destinação correta. A Figura 2 mostra a geração de resíduo sólido urbano no país para os anos de 2010 e 2011.

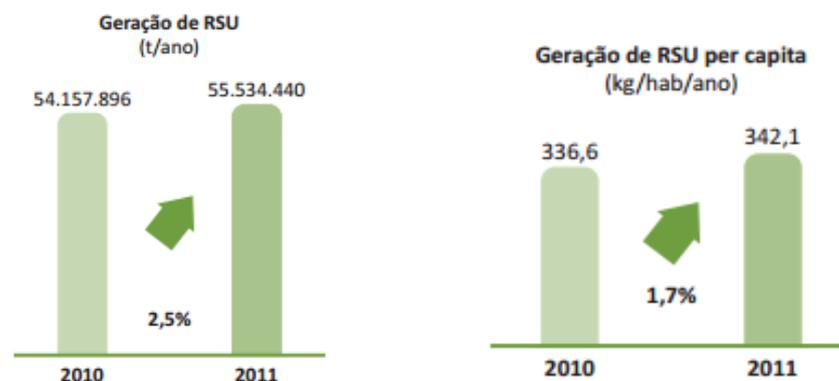


Figura 2. Coleta global e per capita de RSU no Brasil para os anos 2010 e 2011.  
Fonte: ABRELPE, 2013.

Neste cenário, foi necessária uma intervenção do governo federal, que em 02 de agosto de 2010 publicou a Lei nº 12.305/10, a qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que objetiva amenizar problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Esta lei prevê a redução dos RSU empregando os princípios da sustentabilidade com o aumento da reciclagem e reutilização. Quando estas práticas não forem possíveis, deverá ocorrer uma destinação ambientalmente adequada desses rejeitos, ou seja, o uso de aterros sanitários torna-se indispensável no contexto das cidades brasileiras. No Brasil, a disposição final dos RSU pode ser vista na Figura 3.

A Figura 2 expõe a quantidade de volume de lixo em toneladas produzidas no Brasil anualmente por um aspecto global e por pessoa. Diante desses dados é incontestável a questão da necessidade de um planejamento correto para a destinação desse volume de lixo.



Figura 3. Disposição final dos RSU coletados no Brasil.  
Fonte: ABRELPE, 2013.

A Figura 3 aborda a forma como o lixo é destinado no Brasil. Os dados mostram que a realidade nacional distancia bastante dos índices desejáveis, pois a natureza não tem suporte para receber tanto volume de lixo em um ano. Tanto é verdade que a Lei PNRS teve que ser criada para obrigar as cidades a mudarem sua atitude perante esta situação.

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) apresenta a seguinte definição para aterro sanitário: “técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os RSU a menor área possível e reduzi-los 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”. Esta técnica minimiza a

proliferação de micro e macro vetores, diminuindo os riscos de contaminação direta, além de permitir o controle efetivo da poluição do ar, fumaça e odores, reduzir os riscos de incêndio, poluição das águas superficiais e subterrâneas e ainda da poluição estética.

Um fator importante a ser analisado quanto aos aterros é a classificação do resíduo a ele destinado, pois cada resíduo possui seu tempo de decomposição, sendo que alguns podem ser reciclados enquanto outros (principalmente material orgânico) podem produzir outra forma de produto energético tal como o biogás do processo de decomposição. A Figura 4 mostra a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

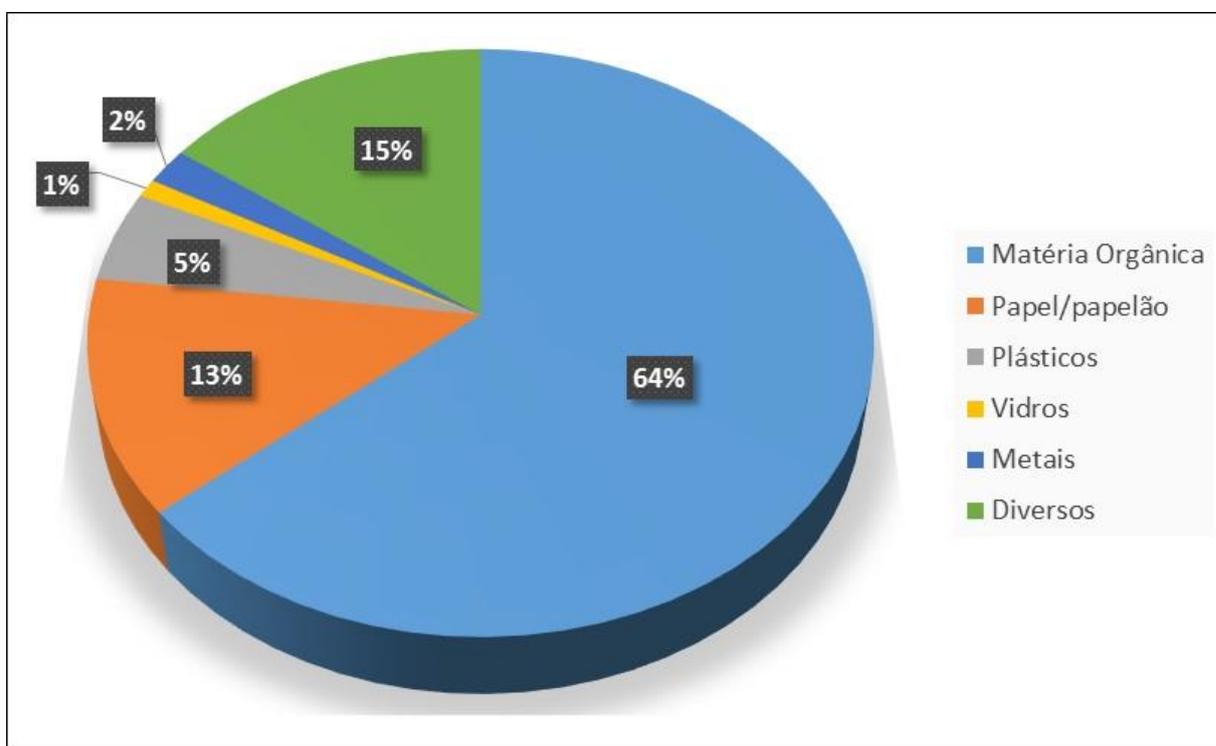


Figura 4. Composição gravimétrica dos RSU no Brasil.  
Fonte: CEMIG GT e FEAM, 2011.

A Figura 4 quantifica graficamente a respectiva porcentagem de cada tipo de RSU. Logo é possível perceber a maior demanda por matéria orgânica produzida e, por consequência, o alto índice de biogás gerado.

Segundo dados da PSR (2014), consultoria especializada em estudos energéticos, com o crescimento do país e da classe média na última década, a demanda por energia no Brasil aumenta em uma média anual de 4,5%. Este crescimento é menor do que a China e Índia, cujo

valor fica entre 8% e 10%, porém maior do que os Estados Unidos e Europa, onde essa média fica entre 2% e 3%.

Portanto, é interessante a utilização desse biogás para a produção de energia elétrica em máquinas térmicas sendo possível fazer sua captação no projeto da planta de um aterro sanitário. Máquinas térmicas são equipamentos que transformam a energia térmica fornecida na queima de um combustível (biogás, por exemplo) em energia elétrica. Assim, tem-se duas categorias principais: os motogeradores e as turbinas (TORRALBO, 1983).

Motogerador é a designação de um motor de combustão interna acoplado ao gerador elétrico com o propósito de gerar energia elétrica a partir do equipamento. Motor de combustão interna é uma máquina térmica que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. O processo de conversão se dá através de ciclos termodinâmicos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperatura de gases (BRUNETTI, 2012). O motor baseado no ciclo ideal Otto caracteriza-se por ter sua ignição por faísca ou centelha. Já os motores Diesel caracterizam-se pela ignição por compressão. O fluido de trabalho (normalmente ar) é comprimido sem ser misturado ao combustível e quando o combustível é injetado no fluido comprimido e quente, ocorre sua autoignição (TILLMANN, 2013).

Segundo Varela (2015), no motor de combustão interna ciclo Otto, denominado dessa forma devido a Nikolaus August Otto, tem-se a ignição por centelha (faísca) utilizando a energia elétrica produzida pela vela de ignição para dar início à reação de combustão e o combustível utilizado é misturado com o ar fora da câmara de combustão.

Nos motores de combustão interna, um mecanismo constituído por pistão, biela e virabrequim é que transforma a energia térmica (calorífica) em energia mecânica. O movimento alternativo (vai e vem) do pistão dentro do cilindro é transformado em movimento rotativo através da biela e do virabrequim.

Stolze (1872) afirmou que em máquinas térmicas também há a turbina a gás para a geração de energia mecânica. Esta máquina é constituída de um compressor de ar, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita sendo o compressor acionado pela própria turbina. O ar entra no compressor e passa por vários estágios de compressão até chegar a câmara de combustão. O combustível é adicionado ao fluxo de ar, promovendo a reação de combustão. Os gases de combustão são expandidos na turbina causando o giro do rotor, produzindo energia mecânica. Esta energia pode ser convertida em energia elétrica através do acoplamento do rotor a um gerador elétrico. O ciclo termodinâmico ideal que rege as turbinas a gás é o ciclo de

Brayton. Neste ciclo ocorrem quatro processos: processo de compressão isentrópica do ar, processo de adição de calor a pressão constante na câmara de combustão, processo de expansão isentrópica do gás de combustão na turbina e processo de rejeição de calor isobárica do sistema.

Diante de todas as informações apresentadas, o Brasil tem um desafio energético a enfrentar, portanto, novas alternativas devem entrar em vigor para atender a demanda por energia elétrica no país. O biogás de aterro sanitário é uma ótima opção, pois além de atender a expectativa de geração de energia também visa a sustentabilidade e esta é indispensável em qualquer planta de engenharia no mundo moderno.

Desta forma, tem-se a proposta do uso do biogás de aterro sanitário em motores de ciclo diesel e em turbina a gás a fim de analisar a viabilidade técnica de seu uso e também a melhor configuração para atendimento das expectativas de geração de energia elétrica. Dessa maneira, chega-se a meta do trabalho:

### **O uso de biogás de aterro sanitário possibilita a viabilidade técnica em termos de eficiência energética em máquinas térmicas?**

#### **1.2 Justificativa**

Num país como o Brasil onde encontram-se aproximadamente 206 milhões de habitantes segundo dados do IBGE (2016), o volume de lixo gerado, por consequência, é significativo e fica a questão do uso desse material para produzir energia elétrica.

A Tabela 1 quantifica o volume de biogás gerado por região e seus respectivos potenciais energéticos a partir do biogás.

Tabela 1. Potencial de geração de eletricidade a partir de biogás.

Região	Estado	Emissões Totais (m <sup>3</sup> biogás)	Emissões (m <sup>3</sup> /h)	Potencial (MW)
<b>Sul</b>	Paraná	1.994.920.684	7.401	9,3
	Rio Grande do Sul	1.832.307.728	6.972	8,7
	Santa Catarina	1.000.130.733	3.806	4,8
	<b>Total</b>	<b>4777359145</b>	<b>18.179</b>	<b>23</b>
<b>Centro-Oeste</b>	Distrito Federal	1.359.811.798	5.174	6,5
	Goiás	1.848.266.726	7.033	8,8
	Mato Grosso	752.404.045	2.863	3,6
	Mato Grosso do Sul	613.531.491	2.335	2,9
	<b>Total</b>	<b>4.574.014.060</b>	<b>17.405</b>	<b>22</b>
<b>Sudeste</b>	Espírito Santo	1.315.949.632	5.007	6,3
	Minas Gerais	6.471.007.946	24623	30,8
	Rio de Janeiro	8.492.025.426	32314	40,4
	São Paulo	19.425.511.703	73.917	92,4
	<b>Total</b>	<b>35.704.494.708</b>	<b>135861</b>	<b>170</b>
<b>Nordeste</b>	Alagoas	667.223.613	2.539	3,2
	Bahia	2.544.495.326	9.628	12,1
	Ceará	2.261.537.648	8.606	10,8
	Maranhão	1.278.098.633	4.863	6,1
	Paraíba	775.124.398	2.949	3,7
	Pernambuco	1.520.345.972	5.785	7,2
	Piauí	398.217.457	1.515	1,9
	Rio Grande do Norte	502.021.225	1.910	2,4
	Sergipe	439.542.538	1.673	2,1
	<b>Total</b>	<b>7.714.887.872</b>	<b>39.523</b>	<b>49</b>
<b>Norte</b>	Acre	197.241.579	751	0,9
	Amapá	223.131.550	849	1,1
	Amazonas	1.070.330.917	4.073	5,1
	Pará	1.563.842.901	5.951	7,4
	Rondônia	284.328.413	1.082	1,4
	Roraima	100.126.034	381	0,5
	Tocantins	39.719.432	1.494	1,9
	<b>Total</b>	<b>3.831.720.826</b>	<b>14.580</b>	<b>18</b>
			<b>225.548</b>	<b>282</b>

Fonte: Abrelpe, 2015.

A partir desses dados fica evidente a potencialidade brasileira para geração de energia elétrica justificando seu uso para atender a demanda energética do país.

Tem-se também incentivos do uso de biogás para geração de energia elétrica de órgãos nacionais que visam a sustentabilidade, como o Ministério do Meio Ambiente (MMA) que

apoia desde 2007, a elaboração dos Planos Estaduais de Gestão Integrada de Resíduos Urbanos visando organizar a gestão integrada de resíduos sólidos nos estados brasileiros e apoiar o consórcio entre os entes federados. Estes planos preveem a realização de um estudo de regionalização individualizado por estado propondo infraestrutura necessária para equacionar o problema relacionado à disposição inadequada de resíduos sólidos. Dentre as ações previstas nesses planos, estão a construção de aterros sanitários com previsão de uso de tecnologia adequada para a recuperação de metano (para geração de energia), a eliminação de lixões, a compostagem e a reciclagem.

Outro fator relevante a ser levantado são as mudanças climáticas que estão afetando o regime pluviométrico nacional. Por maior que seja o potencial hidrelétrico brasileiro, ficar tão dependente dessa forma de energia torna o abastecimento energético nacional vulnerável. Tal fato é tão verdade que o Senado Federal publicou o Boletim Legislativo nº 27 em 2015, no qual pode-se notar que:

A falta de chuvas tem conduzido o Brasil e, em particular, a região Sudeste, a uma situação difícil. A crise hídrica que estamos vivendo neste final de período úmido 2014/15 é inédita e traz sérias consequências econômicas e sociais. Em vários campos, como na geração de energia elétrica, no abastecimento das cidades, e na agricultura, vivem-se muitas dificuldades decorrentes da falta de chuvas.

Diante dos argumentos explanados, o uso do biogás de aterro sanitário é uma alternativa justificável.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Geral**

Analisar tecnicamente a utilização de biogás gerado na decomposição de resíduos sólidos urbanos destinados aos aterros sanitários como combustível para geração de energia elétrica em máquinas térmicas com vistas à sustentabilidade.

### **1.3.2 Específicos**

- Realizar revisão bibliográfica acerca da estimativa de geração de biogás em aterros sanitários, máquinas térmicas acionadas a gás pobre, geração de resíduos sólidos urbanos em cidades mineiras, geração de energia através do biogás e sustentabilidade;

- Identificar e fundamentar as variáveis para a estimativa de geração de biogás em aterros sanitários;
- Identificar e fundamentar as variáveis de operação do sistema de geração de energia usando o biogás;
- Detalhar os ciclos termodinâmicos Diesel e Brayton;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar os instrumentos de coleta e tabulação de dados obtidos;
- Avaliar termodinamicamente os resultados das configurações adotadas utilizando motores de combustão interna e turbina a gás;
- 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; biogás (gás pobre); geração de energia; motogeradores; turbinas 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 termodinâmicas realizadas nos motogeradores e na turbina. E por fim, o trabalho é encerrado com as suas respectivas conclusões e recomendações futuras de trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo irá tratar da revisão bibliográfica de alguns conceitos e equipamentos abordados neste trabalho, dentre eles, sustentabilidade, aterro sanitário, biogás, produção de eletricidade a partir do gás, turbina a gás e motor diesel.

### 2.1 Sustentabilidade

Taschner (1996) afirma que devido à Primeira Revolução Industrial na Inglaterra por volta de 1750, o mundo vivenciou a era da urbanização na qual as pessoas deixaram o campo e se direcionaram para as cidades. Nesse contexto de industrialização, o mundo passou por várias transformações, dentre elas a intensa exploração dos recursos minerais, hídricos, vegetais e biológicos voltados a suprir a demanda das indústrias por matérias primas. Tais fenômenos acarretaram no fortalecimento do capitalismo que visa o consumo como combustível da economia mundial.

Esse processo é resultante de modificações sociais e econômicas substanciais que estão na base do desenvolvimento do capitalismo. Segundo Sporito (1989), o capitalismo é a base do processo desenvolvido na indústria:

A expressão de urbanização via industrialização não deve ser tomada apenas pelo elevado número de pessoas que passaram a viver em cidades, mas sobretudo porque o desenvolvimento do capitalismo industrial provocou fortes transformações nos moldes da urbanização (Sporito, 1989).

Logo, segundo Barbosa (2004), devido à ideia de consumo desenfreado incentivado pelo modelo capitalista vigente, o meio ambiente, até meados do século XX, era tratado como um campo de livre exploração do homem. Porém, em 1972, ocorreu a Conferência das Nações Unidas (ONU) em Estocolmo que falava pela primeira vez sobre o Meio Ambiente Humano que referenciava às questões ambientais no cenário global com ênfase na formulação de políticas de instituições oficiais do governo de vários países. A Declaração das Nações Unidas (1972, P.1) dessa conferência informa:

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, reunida em Estocolmo de 5 a 16 de junho de 1972 se atenta à necessidade de um critério e de princípios comuns que ofereçam aos povos do mundo inspiração e guia para preservar e melhorar o meio ambiente humano (ONU, 1972).

De acordo com Novaes (1992), a partir de então o conceito de sustentabilidade ganhou força chegando ao Brasil por definitivo durante a ECO 1992, Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada no Rio de Janeiro. Esse é o marco histórico do Brasil quanto as questões ambientais.

Claro (2008) conceitua sustentabilidade, termo usado para definir ações e atividades humanas que visam suprir as necessidades atuais dos seres humanos, sem comprometer o futuro das próximas gerações. Ou seja, a sustentabilidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico e material atenuando os impactos ao meio ambiente, usando os recursos naturais de forma inteligente para que eles se mantenham no futuro.

Segundo Paula *et al* (1997), é importante salientar que os impactos sobre o meio ambiente, como a emissão de gases poluentes, a erosão, a desertificação, o desmatamento, a poluição de recursos hídricos, a disposição de resíduos tóxicos, entre outros, afeta a biodiversidade da flora e da fauna. O conceito de biodiversidade é bastante amplo, envolvendo a diversidade genética, a diversidade de espécies e a diversidade de ecossistemas. Entretanto, abrange tanto a dimensão quantitativa, quanto a qualitativa, ou seja, engloba o número e a variedade de genes, espécies e ecossistemas, assim como a qualidade de vida dos seres e a saúde do ambiente em que eles estão inseridos.

Portanto, o crescimento econômico sem uma preocupação adequada com a preservação do meio ambiente gera exaustão da biodiversidade acarretando perdas econômicas aos próprios processos produtivos como nas indústrias farmacêuticas, cosméticas e médicas.

Segundo Claro (2008), quando o termo sustentabilidade foi conotado pela primeira vez, somente as questões ambientais foram analisadas. Porém, logo observou-se a necessidade de uma visão mais ampla que atendesse as demandas mundiais. Não se pode considerar o desenvolvimento sustentável de forma desmembrada sem agregar os componentes econômicos, ambientais e sociais com a finalidade de desenvolvimento sustentável.

O embaixador Machado (2010), subsecretário-geral de Meio Ambiente, Energia, Ciência e Tecnologia do Ministério das Relações Exteriores (MRE), afirma:

Todos sabem que é impossível colocar uma cerca em volta da floresta e esperar que, por conta disso, não haja desmatamento. Se a decisão de proteger a floresta não for acompanhada de perspectivas de desenvolvimento econômico, de inclusão social e de geração de empregos não há como se garantir a proteção ambiental.

Dessa forma, é possível ver na Figura 5 que somente a interseção de dimensões ambientais, sociais e econômicas formam a sustentabilidade. Em outras palavras, a coerência e adesão dessas três dimensões são suas bases fundamentais.

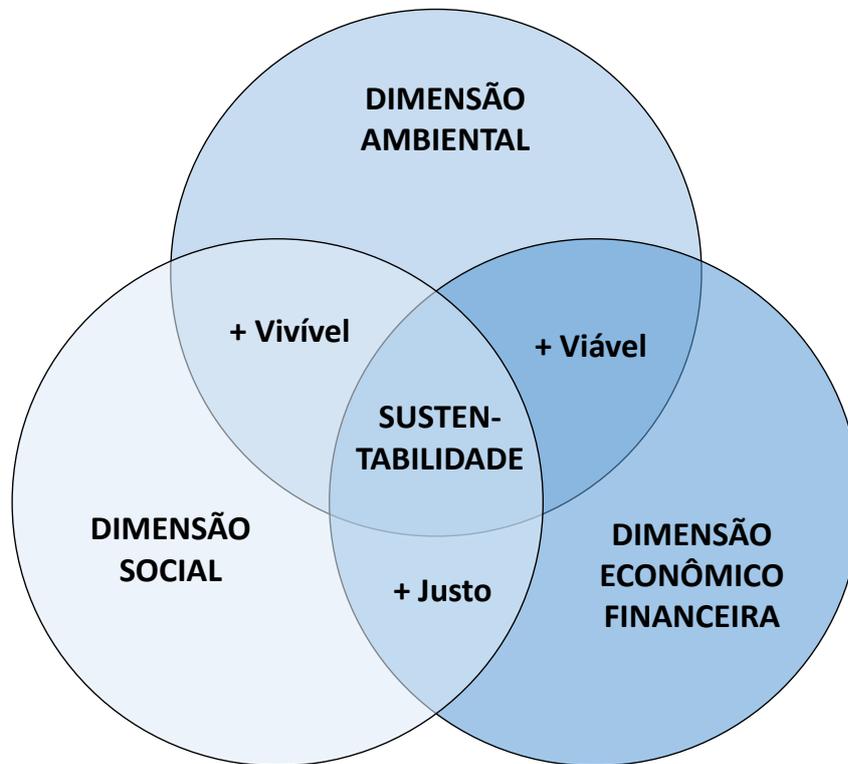


Figura 5. Bases da sustentabilidade.  
Fonte: Alledi, 2002.

Se refere às ações ou condutas que possuam, direta ou indiretamente, algum impacto no meio ambiente, seja a curto, médio ou longo prazo. O desenvolvimento sustentável busca, primeiramente, minimizar esses impactos ambientais causados pela produção industrial a fim de assegurar a sobrevivência do próprio planeta tanto no presente quanto no futuro. Dentre as ações que são feitas no Brasil, está a busca por energias renováveis como a eólica.

De acordo com Melo (2016), presidente executiva da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), num país com tantos recursos renováveis como o Brasil, é fundamental encontrar fontes complementares às hidrelétricas. A energia eólica tem todas as condições de atender à necessidade por energia brasileira.

Trata-se de todo capital humano que está relacionado às atividades desenvolvidas por uma empresa. Incluindo seus funcionários, seu público alvo, seus fornecedores, a comunidade

no entorno e a sociedade em geral. Essa ação vai muito além de dar férias e benefícios aos funcionários. Deve-se proporcionar um ambiente que estimule a criação de relações de trabalho legítimas e saudáveis além de favorecer o desenvolvimento pessoal e coletivo dos envolvidos.

Segundo Antinarelli (2013), para que uma empresa seja economicamente sustentável, ela deve ser capaz de produzir, distribuir e oferecer seus produtos ou serviços de forma que estabeleça uma relação de competitividade justa em relação aos demais concorrentes do mercado. E o principal, esse desenvolvimento não deve existir às custas de um desequilíbrio dos ecossistemas ao redor. Dentre as ações que são feitas estão o tratamento de todos os resíduos orgânicos e materiais gerados no processo produtivo priorizando a reciclagem; uso racional de água e de energia elétrica; tratamento adequado dos poluentes gerados na produção das mercadorias; incentivos fiscais governamentais para que empresas desenvolvam infraestruturas que consigam atenuar a agressão ao meio ambiente e punições (multas) severas às empresas que causarem algum dano ambiental.

## **2.2 A Evolução da Questão Ambiental no Brasil**

De acordo com Viola *et al* (1995), o primeiro órgão brasileiro com antecedentes ambientais data de 1958, a Fundação Brasileira para a Conservação da Natureza. Formada por associações ambientalistas civis, eram as principais instituições preocupadas com a temática do meio ambiente baseando-se em denúncias e na conscientização pública sobre a degradação ambiental num objetivo de controle de poluição urbano-industrial.

Segundo Albagli (1995), aconteceu, em 1972, a Conferência de Estocolmo, com destaque negativo para o Brasil que junto aos outros países subdesenvolvidos apresentou resistência ao reconhecimento da problemática ambiental. Assim, em 1973, foi fundada a Secretaria Especial do Meio Ambiente para atenuar a imagem negativa internacional adquirida pelo Brasil na conferência.

De acordo com Souza (2010), em 1987, por iniciativa do deputado Fábio Feldmann, fundou-se o bloco parlamentar verde evidenciando uma preocupação política nacional. E pela primeira vez, em 1989, o governo associou a proteção ambiental ao uso conservacionista de alguns recursos naturais com a criação do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

De acordo com Mukai (2007), atualmente, a preocupação governamental com questões ambientais tornou-se mais evidente. Organizações públicas estaduais são mais frequentes como a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) em Minas Gerais. A FEAM é um dos órgãos seccionais de apoio do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e atua vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). No âmbito federal, o órgão integra o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

Segundo Barbosa (2004), conforme mencionado anteriormente, devido à larga produção de industrializados associado ao modelo capitalista de mercado, a alta taxa de consumo de produtos propicia num enorme volume de lixo produzido que sem a destinação correta acarreta em poluição do meio ambiente o que vai de contra a sustentabilidade tão enraizada nas empresas hoje.

Segundo dados da ABRELPE (2011), estima-se que no Brasil foram geradas aproximadamente 198 mil toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos (RSU) dos quais cerca de 90% foram coletados. Desses 90%, 58% eram destinados a aterros sanitários, 24% a aterros controlados e 17% a lixões.

De acordo com Juras (2011), devido à destinação até então incorreta do lixo no Brasil, o governo sancionou a Lei nº 12.305/10 ou Política Nacional de Resíduos Sólidos em 02 de agosto de 2010 com o objetivo de encerrar os lixões; forçar a destinação final ambientalmente adequada até 2014 (a aterros sanitários); elaborar planos municipais de resíduos sólidos a fim de orientar municípios e cidadãos quanto ao manejo adequado de resíduos; e elaborar acordos setoriais envolvendo toda a cadeia de geração e de consumo, visando a implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto.

Marco Maia (2012), Presidente da Câmara dos Deputados, na Apresentação do documento da Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos – 2ª Edição, disse:

A crescente preocupação com a preservação dos recursos naturais e com a questão de saúde pública associada a resíduos sólidos indica que políticas públicas para tratar desses temas a ser cada vez mais demandadas pela sociedade.

Reflexo exatamente dessas demandas, foi sancionada em agosto e regulamentada em dezembro de 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que reúne o conjunto de diretrizes e ações a ser adotado com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento adequado dos resíduos sólidos (MAIA, 2012).

Dessa maneira, as cidades brasileiras foram forçadas a se adaptarem e pela primeira vez o termo aterro sanitário se disseminou no país.

## 2.3 Aterro Sanitário

Segundo IPT (1995), um aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos no solo sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais.

A UNESP (1999), cita as etapas necessárias para preparação de um aterro sanitário:

Na preparação da área são realizados a impermeabilização e o nivelamento do terreno, as obras de drenagem para captação do chorume para conduzi-lo ao tratamento, além das vias de circulação. As áreas limítrofes do aterro devem apresentar uma cerca para evitar ou diminuir a proliferação de odores e a poluição visual.

Na execução os resíduos são separados de acordo com suas necessidades e depositados separadamente. Antes de ser depositado todo o resíduo é pesado com a finalidade de acompanhamento da quantidade para suporte do aterro.

Atingida a capacidade de disposição de resíduos em um setor do aterro, esse é revegetado. Ao longo dos trabalhos de disposição e mesmo após a conclusão de um setor do aterro, os gases produzidos (gás de aterro) pela decomposição do lixo devem ser queimados ou captados para geração de eletricidade e o chorume deve ser drenado para tratamento (UNESP, 1999).

A Figura 6 mostra a disposição geral de um aterro sanitário. Há o setor de preparação onde os canais de dreno de chorume e biogás são instalados, depois com o aterro já em funcionamento (setor de execução) o lixo vai sendo depositado e compactado até que a capacidade do aterro se esgote. Quando isto acontece, chega a etapa do setor concluído, nessa fase faz-se a revitalização do local com preenchimento do território com vegetação.

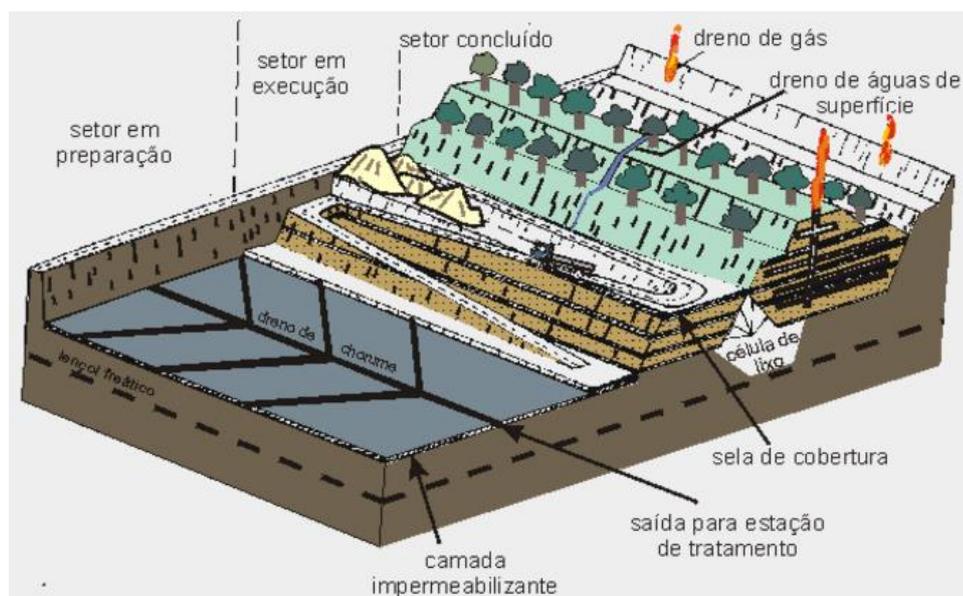


Figura 6. Figura esquemática de um aterro sanitário.  
Fonte. Proin/Capes, 1999

De acordo com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (2006), a infraestrutura básica de um aterro sanitário é composta por:

**Guarita/Portaria:** local onde são realizados os trabalhos de recepção, inspeção e controle dos caminhões e veículos que chegam à área do aterro.

**Balança:** local onde é realizada a pesagem dos veículos coletores para se ter controle dos volumes diários e mensais dispostos no aterro.

**Isolamento:** fechamento com cerca e portão que circunda completamente a área em operação, construída de forma a impedir o acesso de pessoas estranhas e animais.

**Sinalização:** Placas indicativas das unidades e advertências nos locais de risco.

**Cinturão Verde:** cerca viva com espécies arbóreas no perímetro da instalação.

**Acessos:** vias externas e internas, construídas e mantidas de maneira a permitir sua utilização sob quaisquer condições climáticas.

**Iluminação:** ligação à rede de energia para uso dos equipamentos e ações de emergência no período noturno, caso necessário.

**Comunicação:** ligação à rede de telefonia fixa, celular ou rádio para comunicação interna e externa, principalmente em ações de emergência.

**Abastecimento de água:** ligação à rede pública de abastecimento de água tratada ou outra forma de abastecimento para uso nas instalações de apoio e para umedecimento das vias de acesso.

**Instalações de apoio operacional:** prédio administrativo contendo, no mínimo, escritório, refeitório, copa, instalações sanitárias e vestiários.

**Área de disposição de resíduos:** local destinado ao aterramento dos resíduos, previamente preparado, em conformidade com as normas técnicas e ambientais vigentes, com adoção de sistemas de impermeabilização de base e das laterais e de drenagens de chorume, de águas pluviais e de gases.

**Sistema de tratamento de chorume:** sistema para tratamento dos líquidos percolados do aterro (chorume), visando ao atendimento dos padrões de lançamento de efluentes em cursos d'água.

**Instrumentos de monitoramento:** equipamentos para o acompanhamento e controle ambiental do empreendimento como poços de monitoramento de águas subterrâneas, medidores de vazão, piezômetros e medidores de recalque horizontais e verticais.

**Sistema de drenagem e tratamento de gases:** um subproduto gerado na decomposição dos RSU nos aterros sanitários são os gases. Esses gases são basicamente metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Como ambos contribuem para o agravamento do efeito estufa, eles precisam ser drenados e tratados adequadamente. De acordo com Lange *et al* (2013), para o sistema de drenagem de gases de aterros, são utilizados tanto drenos verticais quanto horizontais para a retirada do gás dos aterros. Os drenos verticais são interligados com os horizontais de lixiviados. E depois de drenado, o biogás é encaminhado para tratamento. A forma mais usual e barata é queimá-lo, pois o metano é 21 vezes mais nocivo ao efeito estufa que o gás carbônico ou outra alternativa mais inteligente é usá-lo como combustível a fim de gerar energia elétrica.

## 2.4 Sistemas de Coleta, Extração e Tratamento do Biogás de Aterro

A forma mais simples de coletar gases do aterro é através da extração do biogás por meio de tubos verticais perfurados. Podem ser colocados tubos de sucção horizontais quando o lixo ainda está sendo depositado no aterro e assim ele poderá ser extraído desde o início da sua produção (WILLUMSEN, 2001).

Um sistema padrão de coleta do biogás de aterro é composto por poços de coleta e tubos condutores, sistema de compressão e sistema de purificação do biogás. O sistema de coleta possui tubos verticais perfurados ou canais e em alguns casos membrana protetora. Além disto, a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética possui *flare* para queima do excesso do biogás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos (TOLMASQUIM, 2003). A seguir é mostrado uma breve explicação de cada sistema.

**Captação do biogás:** A coleta de gás normalmente começa após uma porção do aterro ser fechada. Cada uma das pontas do tubo é conectada a uma tubulação lateral que transporta o gás para um coletor principal. O sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás se necessário (MUYLAERT, 2000). O biogás é succionado do aterro por meio de pressão nos tubos de transmissão.

**Sistema de compressão:** A sucção do gás dos poços de coleta é realizada por um compressor. Os compressores também podem ser necessários para comprimir o gás antes de entrar no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários dependerão da taxa do fluxo de gás e do nível de compressão desejado, que pode ser determinado pelo equipamento de conversão energética (TOLMASQUIM, 2003).

**Sistema de tratamento do condensado:** Quando o biogás (quente) produzido pelo aterro passa pela tubulação, acaba resfriando formando então um condensado. Caso não se remova esse condensado, o sistema de coleta pode ser bloqueado interrompendo, então, o processo de recuperação de energia. O controle do condensado tem início no sistema de coleta onde são utilizados conectores e tubos inclinados para permitir a drenagem em tanques e após a coleta o condensado é removido. Os métodos para disposição do condensado são: descarga no sistema público de esgoto, sistema de tratamento local, e recirculação para o aterro sanitário (MUYLAERT, 2000).

**Queima do biogás:** O *flare* é um dispositivo utilizado na ignição e na queima do biogás. É considerado um componente de recuperação de energia, visto que pode ser necessário durante as etapas de início do processo e manutenção do sistema. Também pode ser utilizado para queima do biogás excedente entre os upgrades de sistemas, podendo ser abertos ou enclausurados (WILLUMSEN, 2001).

**Sistema de tratamento do biogás:** Após a coleta e antes da sua utilização no processo de conversão de energia, o biogás é tratado para a remoção de algum condensado que não foi coletado, assim como particulados e impurezas em geral. Para sua utilização em caldeiras, um tratamento mínimo é requerido; em gasodutos é indispensável um tratamento extensivo para remover o CO<sub>2</sub>. No caso da geração de energia podem ser utilizados filtros para a remoção de impurezas, visto que estas podem danificar os componentes do motor ou da turbina, reduzindo a eficiência do sistema. (TOLMASQUIM, 2003).

## **2.5 Biogás**

O biogás, até pouco tempo, era considerado um subproduto obtido por meio da decomposição de lixo urbano, do tratamento de efluentes domésticos e resíduos animais. Porém, a alta dos preços dos combustíveis convencionais e o crescente desenvolvimento econômico vem estimulando pesquisas de fontes renováveis para produção de energia tentando

criar, deste modo, novas formas de produção energética que possibilitem a redução da utilização dos recursos naturais esgotáveis. A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica, agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (COSTA, 2002).

Segundo Coelho (2001), a descoberta do biogás, também denominado gás dos pântanos, foi atribuída a Shirley em 1667. Já em 1776, Alessandro Volta reconheceu a presença de metano no biogás. No século XIX, o aluno de Louis Pasteur Ulysse Grayon realizou a fermentação anaeróbia (decomposição sem presença de oxigênio) de uma mistura de estrume e água, a 35°C, obtendo então 100 litros de gás/m<sup>3</sup> de matéria. No ano de 1884, ao apresentar os trabalhos do seu aluno à Academia das Ciências, Louis Pasteur considerou que a fermentação podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação (PECORA, 2006).

Nas décadas de 1950 e 1960, Índia e China foram os primeiros países a utilizar o processo de biodigestão, sendo que desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores. A tecnologia da digestão anaeróbia foi trazida para o Brasil com a crise do petróleo na década de 70. Diversos programas de difusão foram implantados no nordeste, porém os resultados não foram satisfatórios e os benefícios obtidos não foram suficientes para dar continuidade ao programa (COELHO, 2001).

De acordo com Pecora (2006), com a crise do petróleo, diversos países buscaram alternativas para sua substituição, acarretando em um grande impulso na recuperação de energia gerada pelos processos de tratamento anaeróbio. Porém, as soluções para os problemas de desenvolvimento devem ser apropriadas às necessidades, capacidades e recursos humanos, recursos financeiros e cultura. Deste modo, o impulso recebido durante a crise não chegou a substituir os recursos não renováveis por fontes renováveis.

O biogás é formado a partir da degradação da matéria orgânica. Sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos como lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. É composto tipicamente 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. Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano (PECORA, 2006). Até ser compactado e coberto, o lixo permanece por certo tempo descoberto no aterro, em contato com o ar atmosférico. Neste período já é verificada a presença do biogás,

que continuará sendo emitido após a cobertura e encerramento da célula do aterro (ENSINAS, 2003).

Visto que no biogás as concentrações de outros gases são muito pequenas se comparados ao metano e gás carbônico, pode-se restringir as propriedades físico-químicas apenas a esses dois componentes. Porém, os gases presentes em menor quantidade, como por exemplo, o gás sulfídrico, influenciam na escolha da tecnologia de operação, limpeza e combustão (PECORA, 2006).

O principal componente do biogás é o metano, quando se trata de utilizá-lo como combustível. Segundo Alves (2000), a presença de substâncias não combustíveis no biogás (água, dióxido de carbono) prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente. Estas substâncias entram com o combustível no processo de combustão e absorvem parte da energia gerada. O poder calorífico do biogás se torna menor à medida que se eleva a concentração das impurezas.

A capacidade de um aterro gerar gás vai depender de muitos fatores, dentre eles a composição do resíduo, umidade, potencial hidrogeniônico (pH), tamanho das partículas no resíduo, idade, temperatura, entre outros. Filho (2005) explica, a seguir, cada um desses fatores.

**Composição do resíduo:** quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior será o potencial de produção de biogás no aterro. Resíduos de alimentos são exemplos de matéria orgânica facilmente decomposta, o que acelera a taxa de produção do gás. Materiais que se decompõem lentamente, como grandes pedaços de madeira, não contribuem significativamente com a geração de gás.

**Umidade:** Depende da umidade inicial do resíduo, da infiltração da água da superfície e do solo, e da água produzida na decomposição. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção do biogás.

**Potencial Hidrogeniônico (pH):** um pH abaixo de 6 ou acima de 8 está dentro de uma faixa ótima de produção do metano. Fora desse intervalo, a produção de metano fica estritamente limitada.

**Tamanho das partículas:** quanto menor a unidade da partícula, maior será a área da superfície de contato e, portanto, a decomposição será mais rápida se comparada a uma partícula de menor área. Por exemplo, a decomposição de um tronco de madeira ocorrerá mais rápida se este for cortado em pedaços menores ao invés de ser disposto inteiro.

**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).

**Temperatura:** as condições de temperatura de um aterro sanitário influenciam os tipos de bactérias predominantes e o nível de produção de gás. As máximas temperaturas do aterro frequentemente são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição dos resíduos, como um resultado da atividade aeróbia microbológica. Elevadas temperaturas de gás dentro de um aterro são o resultado da atividade biológica. As temperaturas típicas do gás produzido em um aterro variam, tipicamente, entre 30°C a 60°C.

**Outros possíveis:** Outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são os tipos de nutrientes, as bactérias, a compactação dos resíduos, as dimensões do aterro (área e profundidade), a operação do aterro sanitário e o processamento de resíduos variáveis.

Como pode ser visto na Figura 7, existem diversas alternativas para viabilizar o aproveitamento do biogás em aterros sanitários.

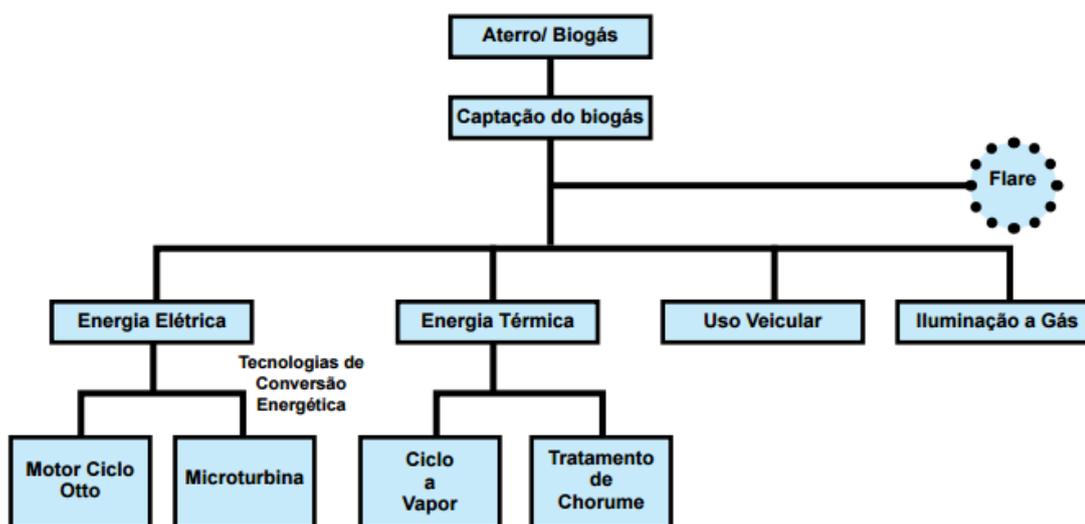


Figura 7. Diagrama com as alternativas de aproveitamento do biogás.  
Fonte. ICLEI, 2009.

A Figura 7 mostra o objetivo do aproveitamento energético do biogás de aterro produzido pela decomposição de matéria orgânica e as maneiras de convertê-lo em uma forma

de energia útil tais como: eletricidade, iluminação a gás, combustível para caldeiras, veículos ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

O foco deste trabalho será a geração de energia a partir de turbinas e motores ciclo diesel acionados a gás pobre.

## **2.6 Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás**

Segundo Filho (2003), no Brasil, por conta de a matriz energética estar fundamentada na energia hídrica, não se incentivou da mesma forma a geração de novas formas de energia elétrica. O próprio setor privado não manifestou interesse em tais investimentos oriundos de fontes diversas das tradicionais por conta de uma série de particularidades como: o elevado custo do capital nacional; a limitada capacidade para o desenvolvimento de projetos de financiamento externo; as limitadas fontes de pesquisas tecnológicas; e as restrições de barreiras regulatórias, principalmente porque as fontes renováveis (como no caso do biogás) geralmente transitam por diversos âmbitos da administração pública.

De acordo com Esparta (2004), os investimentos em energia renovável apresentam, em sua maioria, custos superiores aos necessários para a adoção de fontes tradicionais. Porém, investir na geração de energia que utiliza o biogás como combustível pode ser viável economicamente devido à apropriação de receitas oriundas da venda da energia elétrica e da comercialização dos créditos de carbono.

Se SEBRAE (2017), a redução de gases do efeito estufa é o principal objetivo do mercado de créditos de carbono, criado a partir da assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997. Créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE) são certificados emitidos quando ocorre a redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE). Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) corresponde a um crédito de carbono. A RCE cria um mercado para a redução de GEE dando um valor monetário à redução da poluição. O mercado ficou estabelecido a partir da assinatura do Protocolo de Quioto que estabeleceu metas de redução de emissões de dióxido de carbono para os países mais industrializados do planeta. Para que esses países consigam atingir suas metas, o protocolo lhes permite comprar os créditos de carbono de outras nações, como o Brasil, que também é signatário do acordo.

Nesse contexto, incentivos públicos para a elaboração e implantação de projetos de recuperação e queima de biogás são justificáveis sob a ótica do desenvolvimento sustentável.

Segundo MMA – Ministério do Meio Ambiente (2010), o regimento que vigora sobre 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).

Pecora (2006) afirma que a conversão energética do biogás é um processo de transformação da energia química das moléculas do biogás, por meio de uma combustão controlada, em energia mecânica, que por sua vez será convertida em energia elétrica.

As tecnologias convencionais para a transformação energética do biogás são as turbinas a gás e os motores de combustão interna. Existem também tecnologias emergentes como as células combustíveis que, ainda em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento, pode ser considerada uma tecnologia promissora (CASTRO, 2006).

Segundo o Work Bank (1999), existe uma metodologia chamada IPCC que estima quantidade de metano produzida explicada a seguir.

De acordo com a CETESB (2003), existem vários métodos para calcular a quantidade de metano gerado a partir de métodos mais crus para métodos que levam em conta parâmetros importantes, tais como condições climáticas, concentração de nutrientes no solo e composição de resíduos.

Uma metodologia para o cálculo da emissão de metano a partir de resíduos sólidos em países ou regiões específicos, a metodologia do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), é apresentada pelas Equações de (1) a (8). Para este cálculo, são necessários os dados

estatísticos de população e MSW. Se não houver dados disponíveis para o cálculo, podem ser utilizados dados padronizados fornecidos pelo IPCC; No entanto, a qualidade do resultado pode ser prejudicada.

$$\dot{Q}CH_4 = \frac{Popurb \times TaxaRSD \times RSDf * L_0}{\rho CH_4} \quad (1)$$

Na qual:  $\dot{Q}CH_4$  é a taxa de produção de metano [ $m^3 CH_4 / ano$ ]; Popurb é o número de habitantes em uma área urbana [habitantes]; TaxaRSD é a taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano [kg de MSW / habitante.ano]; RSDf é a fração de lixo doméstico que é depositado em locais de descarte de resíduos sólidos [%];  $\rho CH_4$  é 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 da Equação (2):

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

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

De acordo com CETESB (2003), o fator de correção de metano (FCM) varia dependendo do tipo de lugar. O IPCC (1996) define quatro categorias de locais: 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). Uma vez que o cálculo da quantidade de carbono degradável (COD) se baseia na composição de resíduos e na quantidade de carbono em cada componente da massa residual. A Tabela 2 mostra o valor de COD para alguns componentes de resíduos sólidos municipais.

Tabela 2. 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:USEPA,1997.

A equação (3) é usada para calcular a COD:

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

Na qual: COD é o carbono orgânico degradável [kg de C / kg de RSD]; A é a fração de papel e cartão nos resíduos; B é a fração de resíduos de parques e de jardins; C é a fração de resíduo alimentar; D é a fração de restos de tecidos; e E é a fração de madeira dos RSU's.

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):

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

Na qual:  $COD_f$  é a fração de COD dissociada [%]; e T é a temperatura na zona anaeróbia [°C].

Para uma avaliação mais detalhada da geração de metano em aterros, recomenda-se métodos que levem em consideração a geração de biogás ao longo dos anos. Os dois métodos

usados aqui são do IPCC e da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*): método de projeto e metodologia teórica de decomposição de primeira ordem. Ambos os métodos 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 3.

Tabela 3. Sugestão de valores para taxa de geração de metano.

<b>Zona boreal e zona de clima temperado</b>			
Temperatura média anual $\leq 20^{\circ}\text{C}$			
Seco		Úmido	
Média de pluviosidade anual		Média de pluviosidade anual	
$< 1\text{mm}$		$> 1\text{mm}$	
Padrão	Extensão	Padrão	Extensão
0,05	0,05 - 0,06	0,09	0,08 - 1,0
<b>Zona de clima tropical</b>			
Temperatura média anual $\geq 20^{\circ}\text{C}$			
Seco		Úmido	
Média de pluviosidade anual		Média de pluviosidade anual	
$< 1000\text{mm}$		$> 1000\text{mm}$	
Padrão	Extensão	Padrão	Extensão
0,065	0,05 - 0,08	0,17	0,15 - 0,2

Fonte. IPCC, 1996.

O método de projeto é recomendado para aterros na fase de projeto, porque é desconhecido o que será a vazão anual de resíduos. Este método é dividido em duas etapas, a parte na qual o aterro recebe resíduos de materiais e após o seu encerramento. Enquanto o aterro é aberto, o termo cinético ( $e^{-k.c}$ ) será igual a 1. Após o aterro ter sido fechado, este termo deve ser considerado.

A Equação (5) calcula a geração de metano durante o tempo de recebimento de resíduos.

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

A Equação (6) calcula a geração de metano após o fechamento do aterro sanitário.

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

Na qual: Q é a taxa de geração de metano [m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> / ano]; F é a fração de metano no biogás [%]; R é a taxa média anual de recebimento de resíduos durante a vida ativa do aterro [ton / ano]; L<sub>0</sub> é o potencial de geração de metano [m<sup>3</sup> / tonelada de lixo]; k é a constante de taxa de geração de metano [ano<sup>-1</sup>]; C é o tempo desde o encerramento dos locais de eliminação de resíduos sólidos (SWDS) [anos]; T é o tempo desde que o SWDS foi aberto [anos].

A metodologia teórica de decaimento de primeira ordem considera a geração de metano de uma quantidade de resíduos depositados no ano "x" nos próximos anos. Como cada ano são depositadas novas quantidades de resíduos, 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, o ano referenciado "T" Como mostrado na Equação (7):

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

Na qual: QT é o total de emissões no ano T de resíduos eliminados em anos anteriores (incluindo o ano T) [m<sup>3</sup> / ano]; F é a fração de metano em gás de aterro [%]; R<sub>x</sub> a quantidade de resíduos depositados no ano x [kg]; K é a constante de taxa de geração de metano [ano<sup>-1</sup>]; L<sub>0</sub> o potencial de geração de metano [m<sup>3</sup> / tonelada de lixo]; T é o ano atual; x é o ano de entrada de resíduos.

Os resíduos eliminados anualmente (R<sub>x</sub>) são variáveis e dependem de fatores como a taxa de crescimento populacional, a taxa de RSU produzida por habitante por ano e a porcentagem de resíduos que são recolhidos e depositados no aterro. A Equação (8) calcula a soma das correspondentes quantidades de resíduos de metano depositados no aterro a cada ano.

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

Portando, usando esta estimative, as emissões de metano do aterro sanitário é obtida todo ano ao longo de seu tempo de abertura e depois de seu fechamento.

## 2.7 Turbina a Gás

Segundo Unesp (2016), as turbinas a gás são turbomáquinas que, em geral, pertencem ao grupo de máquinas térmicas geradoras e cuja gama de funcionamento vai desde baixas potências (30 kW para microturbinas) até 500 MW para os mais recentes desenvolvimentos. Assim, competem tanto com motores alternativos (ciclos termodinâmicos Otto e Diesel) como com instalações de vapor de pequena e média potência.

Essa máquina térmica compõe basicamente 3 equipamentos primordiais: o compressor, a câmara de combustão e a turbina propriamente dita. Esse conjunto opera em ciclo aberto, ou seja, o fluido de trabalho (ar) é admitido na pressão atmosférica e os gases de escape, após passarem pela turbina, são descarregados de volta na atmosfera sem que retornem à admissão. A palavra gás não se refere à queima de gases combustíveis, mas ao fluido de trabalho da turbina que é, neste caso, a mistura de gases resultantes da combustão. O combustível pode ser gasoso como o gás natural ou líquido como querosene, óleo diesel, entre outros (KAUTZ *et al*, 2007).

Para Meneses (2011), uma turbina a gás é um motor térmico rotativo de combustão interna, onde a partir da energia fornecida por um combustível se produz energia mecânica e se gera uma importante quantidade de calor em forma de gases quentes e com alta porcentagem de oxigênio. São equipamentos complexos com inúmeras peças e elementos que necessitam de sofisticado sistema de lubrificação e um ótimo e preciso controle eletrônico para a conversão de energia em potência de eixo.

A primeira patente de uma turbina a gás foi obtida por John Barber em 1791, porém, somente em 1903, Aegidius Elling conseguiu construir uma turbina que realizasse trabalho com uma potência de eixo de 44HP e temperatura máxima de 500°C (GUEDES, 2016).

Mas o grande avanço nas turbinas a gás ocorreu na época da 2ª Guerra Mundial devido à aeronáutica que tinha a necessidade de aumentar a velocidade de seus aviões. Por fim, com o desenvolvimento da metalurgia nos últimos 30 anos, foi possível obter materiais que suportam temperaturas mais elevadas (superiores a 500°C) e que permitiram o desenvolvimento das turbinas a gás modernas (UNESP, 2016).

Atualmente, há vários fabricantes de turbinas a gás, tais como Siemens, Rolls Royce, GE, entre outras. Como pode ser observado na Figura 8, o ar entra a pressão atmosférica, passa pelo compressor na qual vários estágios de compressão são feitos e, dessa maneira, o ar sai a uma pressão superior à de entrada. Posteriormente, o ar comprimido é direcionado à câmara de combustão onde ocorre a combustão causando forte expansão do ar que por sua vez gira a turbina a gás propiciando propulsão veicular ou geração de energia elétrica.



Figura 8. Turbina a gás mostrando seus componentes.  
Fonte: Cayuela, 2016.

Segundo Pacheco (2011), um compressor é um equipamento concebido para aumentar a pressão de um fluido em estado gasoso (ar, vapor, hidrogênio, entre outros), ou seja, compressores são máquinas operatrizes que transformam trabalho mecânico em energia sob forma de pressão a um gás. O compressor de ar da turbina a gás pode ser centrífugo ou axial e ambos estão constituídos por um rotor e um difusor, o que constitui um salto (estágio).

Geralmente, são constituídos por vários saltos (estágios), o que permite a instalação de resfriadores intermediários que melhoram o rendimento da instalação ao reduzir a temperatura do ar entre uma compressão e outra.

Já para Queiroz *et al.* (2003), a câmara de combustão é responsável por receber o ar comprimido onde o combustível, a alta pressão, é injetado e queimado a uma pressão aproximadamente constante. A ignição da mistura ar/combustível ocorre durante a partida, através ignitores. Posteriormente a combustão se auto sustenta. A câmara de combustão pode ser simples ou múltipla. As múltiplas são sempre tubulares e as simples podem ser tubulares e anulares. Por sua vez todos estes tipos podem ser de construção horizontal ou vertical. As de construção horizontal são montadas em cima ou ao redor da turbina a gás; as de construção vertical são montadas ao lado da turbina a gás. A câmara de combustão realiza as operações de pulverização do combustível; vaporização do combustível; mistura ar-combustível; inflamação e combustão da mistura; e diluição dos produtos da combustão. As câmaras de combustão tubulares se adaptam melhor aos compressores centrífugos e as câmaras de combustão anulares aos compressores axiais.

O sistema de alimentação de combustível é constituído de um reservatório e um pulverizador de refluxo. Geralmente, a quantidade de combustível que chega ao injetor é constante e as variações na quantidade injetada se efetuam variando a quantidade de refluxo mediante uma válvula intercalada no conduto de retorno ao depósito (UNESP, 2016).

Trocadores de calor (ou regeneradores) podem ser utilizados para aquecer o ar que sai do compressor e vai para a câmara de combustão, às custas do calor contido nos gases de escape que saem da turbina a gás, aumentando o rendimento do conjunto (ÇENGEL *e al.*, 2013).

Segundo Queiroz *e al.* (2003), a turbina a gás propriamente dita pode ser axial ou radial. As axiais são as mais utilizadas. São constituídas de forma parecida às turbinas a vapor e podem ser de ação ou reação.

Os elementos construtivos de uma turbina estão explicados a seguir e as partes da turbina a gás, material e modo de produção são mostradas na Figura 9.

Partes separadas de uma turbina a gás						
<b>Fotos</b>						
<b>Nome</b>	1º estágio Bocal	1º e 2º estágio PT Lâmina de turbina	Guia de Palhetas	Discos de turbina		Guia de Palhetas
<b>Material</b>	Inconel738LC	NIMONIC 80A	Inconel713Lc	Inconel713LC/Inconel713c		Inconel718
<b>Produção</b>	Fundição de precisão por cera perdida a vácuo					
<b>Fotos</b>						
<b>Nome</b>	2º estágio Bocal	3º estágio Bocal	1º e 2º estágio CT Lâmina de turbina	PT Lâmina	SGT600 Roda do compressor	
<b>Material</b>	Fsx-414	Inconel738LC	N155	Inconel738LC		1.4542
<b>Produção</b>	Fundição de precisão por cera perdida a vácuo					Usinagem de cinco eixos

Figura 9. Partes de uma turbina a gás, materiais de construção e forma de produção.  
Fonte. CEFET-CE, 2006.

**Estator (roda fixa):** é o elemento fixo da turbina a gás (envolve o rotor) cuja função é transformar a energia potencial (térmica) do gás em energia cinética através dos distribuidores (MARTINELLI, 2002).

**Rotor (roda móvel):** é o elemento móvel da turbina (envolvido pelo estator) responsável por transformar a energia cinética do gás em trabalho mecânico através dos receptores fixos. (FERRAZ, 2008).

**Expansor:** tem função de orientar o jato do gás sobre as palhetas móveis, além de provocar a perda de pressão e o aumento de velocidade do gás (MARTINELLI, 2002).

A Figura 9 ilustra componentes isolados de uma turbina a gás definindo o nome do componente, o material e o processo de fabricação usados na sua produção.

**Palhetas:** são divididas em palhetas móveis (fixadas ao rotor) e as palhetas fixas (fixadas ao estator). As fixas orientam o gás para a coroa de palhetas móveis seguinte. Podem ser encaixadas diretamente no estator (carcaça) ou em rebaixos usinados em peças chamadas de anéis suportes das palhetas fixas que são, por sua vez, presas à carcaça. Já as palhetas móveis

têm a finalidade de receber o impacto do gás proveniente dos expansores (palhetas fixas) para a movimentação do rotor. São fixadas ao aro de consolidação pela espiga e ao disco do rotor pelo “malhete” e, ao contrário das fixas, são removíveis. É importante ressaltar que essas palhetas da turbina a gás, que podem ser demonstradas na Figura 13, devem ser refrigeradas para não sofrerem perda de resistência mecânica devida as altas temperaturas do processo (FERRAZ, 2008).

***Diafragmas:*** quando se está comprimindo o ar para a admissão, a pressão excedente atua no diafragma que movimenta a haste que libera parte dos gases produzidos pelo motor antes que passe pelo rotor da turbina, o que limitaria a rotação e a pressão, retornando assim ao estado inicial. São constituídos por dois semicírculos que separam os diversos estágios de uma turbina de ação de multi-estágio. São fixados no estator, suportando os expansores e envolvendo o eixo sem tocá-lo. Entre o eixo e o diafragma, existe um conjunto de anéis de vedação que reduz a fuga de gás de um para outro estágio através da folga existente entre diafragma-base do rotor, de forma que o gás só passa pelos expansores. Estes anéis podem ser fixos no próprio diafragma ou no eixo. Este tipo de vedação é chamado de selagem interna (MARTINELLI, 2002).

***Carcaça:*** direciona o fluxo de gás para as palhetas do rotor da turbina, fazendo-as girar e, posteriormente, ser liberado para a atmosfera. Também dá o suporte para as partes estacionárias tais como diafragmas, palhetas fixas, mancais, válvulas, entre outros (FERRAZ, 2008).

***Mancais de apoio (radiais):*** são distribuídos, normalmente, um em cada extremo do eixo da turbina com a finalidade de manter o rotor numa posição radial exata. Os mancais de apoio suportam o peso do rotor e também qualquer outro esforço que atue sobre o conjunto rotativo permitindo que o mesmo gire livremente com um mínimo de atrito. São na grande maioria mancais de deslizamento, constituídos por casquilhos revestidos com metal patente, com lubrificação forçada (uso especial) o que melhora sua refrigeração e ajuda a manter o filme de óleo entre eixo e casquilho (MARTINELLI, 2002).

***Mancais de Escora:*** responsável pelo posicionamento axial do conjunto rotativo em relação às partes estacionárias da máquina, ou seja, pela manutenção das folgas axiais (FERRAZ, 2008).

***Válvula de controle de admissão:*** após estabilizada, a turbina opera entre condições de gás estáveis nas quais as variações da carga devem ser atendidas por meio do controle da vazão

de gás admitida na máquina. Esta função é executada pelas válvulas de controle de admissão automaticamente, sob controle de um dispositivo, o regulador (governador). O regulador é ligado ao eixo da turbina, diretamente ou por meio de uma redução, girando, portanto, a uma rotação igual ou proporcional à rotação da turbina, e sente as flutuações de carga por intermédio de seu efeito sobre a velocidade da turbina. Assim, quando ocorre, por exemplo, um aumento de carga, se a vazão do gás permanecer inalterada, haverá uma queda da velocidade da turbina (MARTINELLI, 2002).

**Válvula de bloqueio automático:** a maneira usual de parar uma turbina a gás é pelo fechamento rápido de uma válvula, chamada válvula de bloqueio automático, colocada em série com válvula de controle de admissão, o que corta totalmente a admissão de gás para a turbina. Esta válvula é também conhecida como válvula de desarme rápido e como válvula de *trip*. O dispositivo de desarme protege a turbina impedindo que opere em velocidades superiores à velocidade de *trip* nas quais as tensões resultantes da força centrífuga poderiam ser perigosas para a resistência mecânica do conjunto rotativo da turbina (FERRAZ, 2008).

### 2.7.1 Ciclo Ideal Brayton

Pereira (2014) afirma que o ciclo Brayton foi proposto por George Brayton para ser utilizado no motor alternativo desenvolvido por ele em 1870. Hoje, é apenas usado em turbina a gás, em que os processos de compressão e expansão ocorrem em um maquinário rotativo. Em geral, as turbinas a gás operam em um ciclo aberto, ou seja, o fluido de trabalho é admitido na pressão atmosférica e os gases de escape, após passarem pela turbina, são descarregados de volta na atmosfera sem que retornem à admissão.

De acordo com Meneses (2011), o ciclo da turbina a gás se inicia quando o ar fresco, em condições ambientes, é admitido no compressor, onde a pressão e a temperatura são elevadas. O ar à alta pressão entra na câmara de combustão, na qual o combustível é queimado, adicionando calor à mistura ar-combustível à pressão constante. Em seguida, os gases provenientes da queima, em alta temperatura, entram na turbina, onde se expandem até a pressão atmosférica enquanto produzem potência. Os gases de exaustão que deixam a turbina são jogados no meio ambiente, caracterizando um ciclo aberto.

A Figura 10 mostra o esquema de uma turbina a gás (a esquerda), no qual o ar atmosférico é admitido continuamente no compressor em regime permanente para que se alcance uma alta pressão de fluido antes de sua entrada no combustor, equipamento onde é misturado com combustível, resultando em uma mistura a alta temperatura após o processo de combustão. Este

fluido, que agora apresenta uma nova composição química, sofre então um processo de expansão na turbina, gerando trabalho de eixo, e logo após é descartado para o ambiente. Esses processos podem ser descritos idealmente em dois diagramas: um diagrama de pressão versus volume específico e outro diagrama de temperatura versus entropia (vide Figura 10 a direita).

Segundo Alves (2011), o modelo desse ciclo baseia-se em algumas hipóteses que devem ser consideradas para a sua utilização: o fluido de trabalho é uma massa fixa de ar modelada como gás ideal; o processo de transferência de calor a partir de uma fonte externa substitui o processo de combustão; para a ocorrência de um ciclo fechado considera-se que ocorre transferência de calor para o meio ambiente, excluindo assim os processos de alimentação e descarga; os processos são internamente reversíveis; e o calor específico pode ser considerado constante (análise de ar padrão frio).

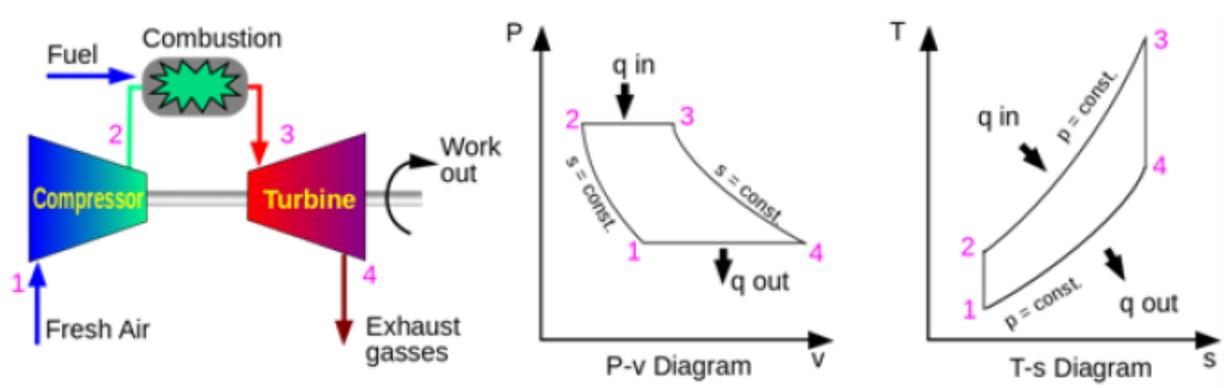


Figura 10. Ciclo ideal Brayton: a esquerda o esquema da turbina a gás e a direita os diagramas P-v e T-s. Fonte. Eribera, 2015.

A Figura 10 (diagrama P-v) demonstra as fases do Ciclo Brayton na qual os processos representam: 1-2 (processo de compressão isentrópica), processo de 2-3 (processo de adição de calor a pressão constante), processo 3-4 (processo de expansão isentrópica do gás) e processo 4-1 (processo de rejeição de calor isobárica do sistema). É possível também, na Figura 10 (diagrama T-s), observar a existência de dois processos de entropia constante (compressão e expansão) e dois isobáricos (aquecimento e resfriamento do fluido).

### 2.7.2 Equações - Ciclo Ideal Brayton

De acordo com Borgnakke *et al.* (2009) as equações que regem o ciclo Brayton estão descritas a seguir.

Para o processo isentrópico, tem-se a Equação (9) e (10) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (9)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (10)$$

Sendo a razão de pressão definida pela Equação (11) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (11)$$

Relacionando a razão de pressão com a razão de temperatura, tem-se a Equação (12) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = r_p^{\frac{k-1}{k}} \quad (12)$$

A eficiência energética do Ciclo Brayton será dada pela Equação (13) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \quad (13)$$

A energia térmica absorvida pela câmara de combustão é calculada pela Equação (14) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$Q_H = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (14)$$

A energia térmica rejeitada pela turbina será dada pela Equação (15) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$Q_L = m \cdot C_p \cdot (T_4 - T_1) \quad (15)$$

E o trabalho líquido do ciclo será dado pela Equação (16) por (BORGNAKKE *et al.*, 2009):

$$Q_H - Q_L = m \cdot C_p \cdot [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad (16)$$

## 2.8 Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna são classificados em relação ao princípio de funcionamento em dois tipos: do ciclo Otto e do ciclo Diesel. O ciclo de funcionamento é o conjunto de transformações na massa gasosa no interior da câmara, desde a sua admissão, até a sua eliminação para o exterior. O ciclo Otto foi descrito por Nikolaus A. Otto (1876) e o ciclo Diesel por Rudolf Diesel (1893). Ambos os ciclos podem ser completados em dois ou quatro cursos do pistão. Quando o motor completa o ciclo em dois cursos do pistão é chamado de motor de dois tempos e quando completa o ciclo em quatro tempos é chamado motor de quatro tempos. (VARELLA, 2012).

Rudolf Diesel nasceu em Paris em 1858, mas tem também nacionalidade alemã. Quando Diesel se interessou pelo motor térmico, procurou realizar industrialmente um motor concebido segundo o ciclo de Sadi Carnot. Sabe-se que a realização deste primeiro motor se manifestou

impossível, por isso e devido aos perigos que o mesmo apresentava pela compressão elevada demais (250kg), Diesel abandonou este ciclo e o substituiu por um mais simples, conhecido como o nome de “ciclo Diesel” (CLUBE DO DIESEL, 2009).

De acordo com Rache (2004), o motor Diesel, que também é conhecido como motor de ignição por compressão é um motor de dois ou quatro tempos de combustão interna. Esse motor recebeu a patente como motor de autoignição em nome de Rudolf Diesel no dia 23 de fevereiro de 1893. Esse motor, ainda nos dias de hoje ainda tem grande destaque por sua grande economia de combustível. Outra importante característica desse motor é a sua robustez, que fica evidenciada pelas altas taxas de compressão, que variam de 15:1 a 25:1.

A seguir, há algumas definições importantes.

**Ponto Morto Superior (PMS)** e o **Ponto Morto Inferior (PMI)**: são nestas posições onde o êmbolo muda de sentido de movimento estando no seu máximo (PMS) ou no seu mínimo (PMI) (FERRAZ, 2008). A Figura 11 os ilustra.

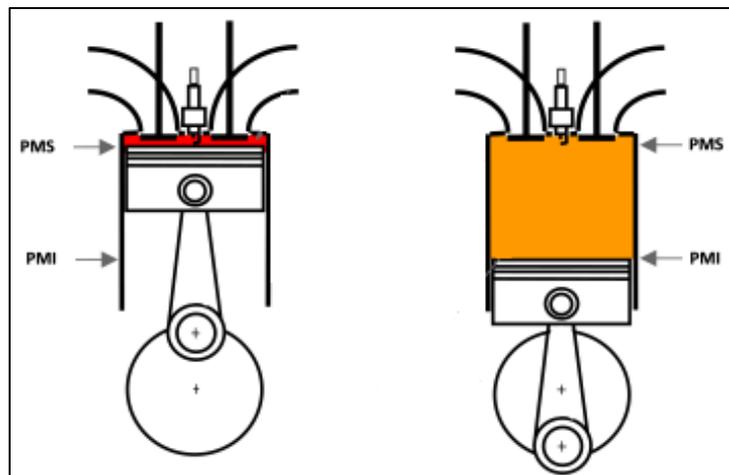


Figura 11. Ponto Morto Superior e Ponto Morto Inferior.  
Fonte: Garidalbi, 2011.

**Cilindrada (C)**: é o volume total deslocado pelo pistão entre o PMI e o PMS, multiplicado pelo número de cilindros do motor. É indicada em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>) e tem a seguinte fórmula, sendo D o diâmetro do pistão; N número de cilindros; e Curso a distância percorrida pelo pistão (COMANDOLLI, 2015). A cilindrada é calculada pela Equação (17):

$$C = \left( \frac{\pi D^2}{4} \cdot Curso \right) \cdot N_{cilindros} \quad (17)$$

**Câmara de combustão:** é o espaço livre que fica acima do pistão quando ele está no PMS. Nela, a mistura ar/combustível do motor a gasolina, que entrou pela válvula de admissão, será comprimida e, após a faísca emitida pela vela, explodirá para que a expansão dos gases movimente o pistão e dê sequência ao funcionamento do motor. Dependendo do grau de modernidade do motor, a câmara pode estar inserida no cabeçote ou na cabeça dos pistões – esse último mais comumente achados. Basicamente, o volume da câmara de combustão define a Taxa de Compressão do motor (TC). Quanto menor for seu volume, maior será essa relação e, conseqüentemente, melhor o rendimento do motor (FERRAZ, 2008).

**Octanagem:** a octanagem mede a capacidade da gasolina de resistir a detonação, ou sua capacidade de resistir às exigências do motor sem entrar em autoignição antes do momento programado. A detonação, também conhecida como “batida de pino”, leva a perda de potência e pode causar sérios danos ao motor, dependendo de sua intensidade e persistência. Um combustível de octanagem  $n$  é aquele que se comporta como se fosse uma mistura contendo  $n\%$  de isooctano e  $(100-n)\%$  de n.heptano. Por convenção, o isooctano puro tem octanagem de 100% e o n.heptano puro tem octanagem zero (BARBOSA, 2003).

**Taxa de compressão (TC):** relação matemática que indica quantas vezes a mistura ar/combustível (Otto) ou o ar aspirado (Diesel) é comprimido dentro da câmara de combustão antes que se inicie o processo de queima. Do ponto de vista termodinâmico, a taxa de compressão é diretamente responsável pelo rendimento térmico do motor. Assim, quanto maior a taxa de compressão, melhor será o aproveitamento energético que o motor estará fazendo do combustível consumido. Por esse motivo é que motores diesel consomem menos que um similar a gasolina: funcionando com taxas de compressão altíssimas (17:1 nos turbodiesel e até 22:1 nos diesel aspirados), geram a mesma potência consumindo menos combustível (FERRAZ, 2008).

A fórmula correspondente está a seguir sendo  $C$  a cilindrada e  $v$  o volume da câmara de combustão. A taxa de compressão é calculada pela Equação (18):

$$TC = \frac{C \cdot v}{v} \quad (18)$$

### 2.8.1 Motor Diesel de Quatro Tempos

Os motores do ciclo diesel de quatro tempos apresentam sistema de lubrificação sendo o cárter o depósito de óleo lubrificante do motor. Realiza o ciclo em quatro cursos, o que implica em duas voltas (720°) no eixo de manivelas conforme é descrito a seguir (VARELLA, 2010).

**Primeiro curso (admissão):** O pistão se desloca do PMS para o PMI. Neste curso, ocorre a admissão no cilindro de somente ar. Durante a admissão a válvula de admissão está aberta e a válvula de descarga está fechada. O volume admitido é o volume de admissão ou cilindrada parcial do motor. Nos motores diesel o volume de ar aspirado é sempre o mesmo. A variação da potência é obtida pela variação do volume de combustível injetado de acordo com a posição do acelerador (MARTINS, 2006).

**Segundo curso (compressão):** O pistão se desloca do PMI para o PMS. Neste curso, ocorre a compressão do ar. As válvulas de admissão e descarga estão fechadas. A compressão do ar na câmara de combustão produz elevação da temperatura. No final da compressão, o combustível é dosado e injetado na câmara de combustão. A medida exata do combustível e o momento da injeção são fatores muito importantes para o bom funcionamento dos motores diesel. A injeção do combustível na câmara de combustão é feita pelo bico injetor. Imediatamente após a injeção, o combustível se inflama devido ao contato com o ar aquecido, iniciando-se a combustão (VARELLA, 2010).

**Terceiro curso (expansão):** O pistão se desloca novamente do PMS para o PMI ocorrendo a expansão do ar. As válvulas de admissão e de descarga permanecem fechadas. A medida que o combustível é injetado, vai se inflamando, aumentando a temperatura dos gases que tendem a se dilatar cada vez mais. Durante a expansão o pistão é acionado pela força de expansão dos gases transformando a energia térmica em mecânica. A força vinda da expansão dos gases é transmitida para o virabrequim através da biela, promovendo assim o movimento de rotação do motor. A expansão é o único curso que transforma energia. Parte da energia transformada é armazenada no virabrequim e no volante do motor que será consumida durante os outros três cursos (MARTINS, 2006).

**Quarto curso (descarga):** O pistão se desloca do PMI para o PMS encerrando o ciclo. Ocorre a descarga dos resíduos da combustão com a válvula de admissão fechada e a de descarga aberta. O movimento ascendente do pistão expulsa do cilindro os resíduos da combustão através da válvula de descarga (VARELLA, 2010).

## 2.8.2 Ciclo Diesel Ideal

O ciclo Diesel representa o modelo criado por Rudolf Diesel de um motor de combustão interna. De forma geral, este modelo pode ser representado por dois diagramas, o diagrama  $P \times V$  (Pressão *versus* Volume) e pelo diagrama  $T \times s$  (Temperatura *versus* Entropia). Esses dois diagramas são mostrados na Figura 12.

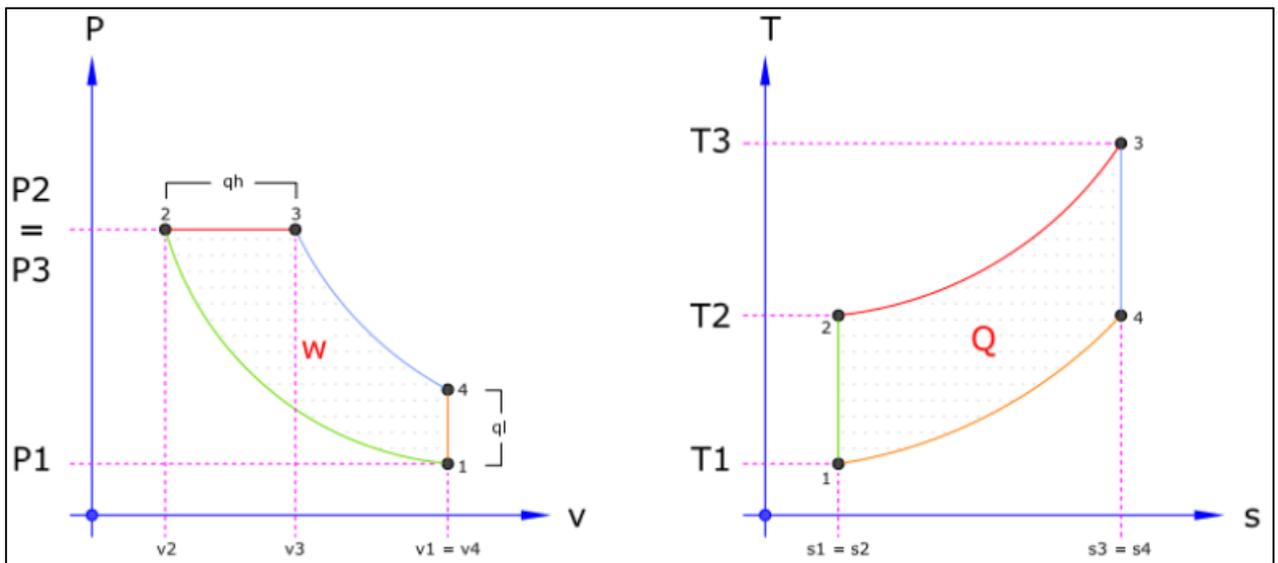


Figura 12. Diagramas  $P \times V$  e  $T \times s$  do ciclo Diesel Ideal.  
Fonte. Guimarães, 2013.

A Figura 12 apresenta o funcionamento ideológico de um motor ciclo Diesel na qual  $P$  é pressão;  $T$  temperatura;  $V$  volume; e  $W$  trabalho. Inicialmente, na etapa 1-2, tem-se uma compressão isentrópica do ar a medida em que o pistão se move do PMI (ponto morto inferior) para o PMS (ponto morto superior). O ar puro aspirado anteriormente é comprimido e atinge uma temperatura suficiente para provocar a inflamação do combustível injetado. Já em 2-3, há uma transferência de calor a pressão constante para o ar a partir de uma fonte externa. No começo da distensão, a combustão efetua-se em pressão constante, quando o volume aumenta

e a expansão dos gases compensa a queda de pressão devida ao aumento de volume. Em 3-4, ocorre a expansão isentrópica do ar conforme o pistão se move para o PMI. A expansão efetua-se sem troca de calor com as paredes do cilindro. E por fim, concluindo o ciclo na etapa 4-1, tem-se a transferência de calor a volume constante do ar enquanto o pistão está em PMI. A abertura brutal do escapamento produz uma queda rápida da pressão enquanto o pistão báscula em ponto morto (volume constante).

As equações de (19) a (22) mostradas a seguir são usadas para o cálculo teórico do ciclo Diesel. Por processo isentrópico (CARVALHO,2011):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (19)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (20)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} \quad (21)$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^k \quad (22)$$

A Primeira Lei da Termodinâmica aplicada ao processo de adição de calor a pressão constante no motor pode ser escrita pela Equação (23) por (CARVALHO,2011):

$$Q_{23} = (U_3 + p \cdot V_3) - (U_2 + p \cdot V_2) = m \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (23)$$

A Primeira Lei da Termodinâmica aplicada ao processo de rejeição de calor a volume constante no motor pode ser escrita pela Equação (24) por (CARVALHO,2011):

$$Q_{41} = (U_4 - U_1) = m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (24)$$

A eficiência térmica do motor será dada pela Equação (25) por (CARVALHO,2011):

$$n_t = 1 - \frac{Q_{23}}{Q_{41}} = 1 - \frac{1}{TC^{k-1}} \left[ \frac{(T_3/T_2)^k - 1}{k[(T_3/T_2) - 1]} \right] \quad (25)$$

Para o fluido de trabalho (ar e gases de combustão), pode-se aplicar a Equação de gás perfeito (26) por (CARVALHO,2011):

$$P \cdot v = R \cdot T \quad (26)$$

## 2.9 Considerações Finais

Algumas das equações mostradas neste serão utilizadas para obtenção de resultados do capítulo 4 que, em seguida, servirão para análises e conclusões que são o foco deste trabalho.

### **3 METODOLOGIA**

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

#### **3.1 Tipo de Pesquisa**

Segundo Gil (1999), a pesquisa tem um caráter pragmático, é uma maneira formal e sistemática de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é encontrar soluções para um problema, mediante o uso de procedimentos científicos.

De acordo com Minayo (2003), existem duas formas de realizar uma pesquisa, a qualitativa e a quantitativa. O método qualitativo é baseado 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.

A pesquisa qualitativa explora as características e cenários que não podem ser facilmente descritos numericamente. Os dados são coletados pela observação, descrição e gravação.

Já a pesquisa quantitativa, para Silva (2001), 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.

Com relação ao objetivo da pesquisa, Gil (1999) classifica a pesquisa como exploratória, na qual sua finalidade é esclarecer, desenvolver e modificar ideias e conceitos, tendo em vista, hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores, envolvendo levantamento bibliográfico, documental, entrevistas e estudos de caso. E ainda proporcionar uma visão geral, aproximada acerca de determinado fato; descritiva, em que se observa, analisa, e descreve as características

de determinada população ou fenômeno ou estabelece relações entre variáveis, tendo como principal técnica, 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.

Fonseca (2002) especifica pesquisa documental 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.

Já a pesquisa-ação é realizada e concebida 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.

Baseado nas informações apresentadas, este trabalho consiste, quanto à abordagem, é uma pesquisa quantitativa, pois utiliza dados numéricos, cálculos e processo de análise estatística, deixando de lado resultados alcançados por observações e interpretações. Quanto ao objetivo, é uma pesquisa descritiva, devido ao fato de que irá se observar e analisar o princípio de funcionamento de um ciclo térmico a gás, a fim de descrever, registrar e comparar os resultados obtidos pela eficiência térmica de acordo com as mudanças nas variáveis do sistema. 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 do ciclo a gás ainda compete a um estudo de caso aos quais serão feitas observações e detalhamentos para que o investigador possa mostrar seu ponto de vista sem intervir sobre o objeto a ser estudado.

### **3.2 Materiais e Métodos**

Para o presente trabalho foi necessário um estudo bibliográfico a fim de apresentar o equacionamento e a modelagem dos principais parâmetros intervenientes na determinação da eficiência térmica do ciclo analisado, com a utilização de motores Ciclo Diesel e turbina a gás, além de descrever e detalhar os principais componentes do ciclo do biogás.

Deve-se coletar os dados do aterro sanitário como composição química e quantidade dos resíduos sólidos coletados e do biogás gerado para futuro uso nos cálculos para análise da eficiência dos ciclos termodinâmicos em questão.

A modelagem da turbina visa à determinação da pressão e da temperatura na saída nestes equipamentos, do trabalho específico e da eficiência térmica global do ciclo.

O equacionamento e a modelagem termodinâmica do ciclo, conforme mencionado anteriormente permite o desenvolvimento de rotinas computacionais para a análise da sensibilidade dos ciclos e comparação energética dos mesmos.

Para a realização dos cálculos necessários foi utilizado o *software Microsoft Excel*, além de geração de gráficos importantes permitindo, assim, a análise dos resultados obtidos entre eles.

### **3.3 Variáveis e Indicadores**

Segundo Gil (1999) pode-se dizer que variável é 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.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Variáveis e Indicadores de Pesquisa.

<b>Variáveis</b>	<b>Indicadores</b>
Eficiência térmica do ciclo a gás ( $\eta_t$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabalho fornecido ao compressor;</li> <li>• Fornecimento de energia do combustível;</li> <li>• Trabalho realizado pela turbina.</li> </ul>
Eficiência térmica do Ciclo Diesel ( $\eta_t$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variáveis operacionais;</li> <li>• Fornecimento de energia do combustível.</li> </ul>
Características Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de turbina a gás;</li> <li>• Tipo de motor Ciclo Diesel;</li> <li>• Biogás de aterro sanitário;</li> <li>• Massa de resíduo por tempo;</li> <li>• Composição química do resíduo e do biogás;</li> <li>• Variáveis operacionais de cada equipamento;</li> </ul>
Câmara de combustão da Turbina a Gás	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão de entrada e de saída;</li> <li>• Temperatura de entrada e de saída;</li> <li>• Eficiência.</li> </ul>
Motor Ciclo Diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa de compressão;</li> <li>• Cilindrada;</li> <li>• Potência líquida gerada;</li> <li>• Eficiência politrópica.</li> </ul>
Turbina a Gás	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão de entrada e de saída;</li> <li>• Temperatura de entrada e de saída;</li> <li>• Potência total requerida;</li> <li>• Potência líquida gerada;</li> <li>• Eficiência politrópica.</li> </ul>

Fonte: Pesquisa Direta, 2017.

### 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, observações e experimentos.

Como já mencionado neste capítulo, esta pesquisa é de natureza bibliográfica, quantitativa e descritiva, logo todos os dados necessários para o estudos serão adquiridos através de uma profunda pesquisa bibliográfica, utilizando livros, teses, dissertações e catálogos, associada com uma observação direta a fim de alcançar dados teóricos e práticos.

### 3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos pela teoria, o *Microsoft Excel* será utilizado para resolução dos cálculos necessários além da geração dos gráficos necessários para análise do objetivo proposto neste trabalho, facilitando, assim, o entendimento e interpretação dos resultados. 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 resultados obtidos no *software Microsoft Excel* juntamente com os gráficos gerados e tabelas, além de mostrar quais foram os procedimentos adotados para a realização dos cálculos necessários a fim de obter os valores de eficiência, e por fim será feita uma discussão dos resultados.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados da pesquisa realizada, utilizando o gás de aterro para geração de energia e máquinas térmicas. Para tal fim, foram usadas as equações disponíveis no capítulo de revisão bibliográfica e a metodologia fornecida no capítulo 3.

### 4.1 Seleção das tecnologias de geração de energia

Foram feitos cálculos para os três motores da *Jenbacher* dos seguintes modelos: J.316; J.320 e J.412. Os dados destes motores podem ser visualizados no Anexo I; II; e III, respectivamente. Já para turbinas, foram realizados os cálculos para a turbina da *OPRA Turbines* do modelo OP16. Estes equipamentos foram selecionados devido à possibilidade de usar gás pobre para acioná-los.

E para cada um destes equipamentos, simulou-se análises de geração de biogás e de produção de energia elétrica e térmica para as cidades mineiras de: Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim. Escolhidas devido aos municípios possuírem portes (população) distintos variando, dessa maneira, a quantidade de RSUs produzidos e, por consequência, a taxa de geração de biogás.

Ou seja, 16 combinações foram feitas a fim de se obter os resultados almejados no trabalho, como pode ser visto na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5. Combinações possíveis utilizadas no trabalho.

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

Fonte: Pesquisa direta, 2017.

## 4.2 Estimativa de geração de metano

Neste trabalho foi adotado que todas as cidades do estudo de caso têm abertura do aterro sanitário no ano de 2007 e encerramento das atividades do aterro no ano de 2040. O ano de 2055 foi utilizado como o último ano para a análise de dados.

As Figuras de 13 a 16 mostram a geração de metano [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{h}$ ] para as 4 cidades mineiras: Contagem; Uberlândia; Uberaba; e Betim, respectivamente. Do ano de 2007 ao ano de 2055 com pico de produção em 2040.

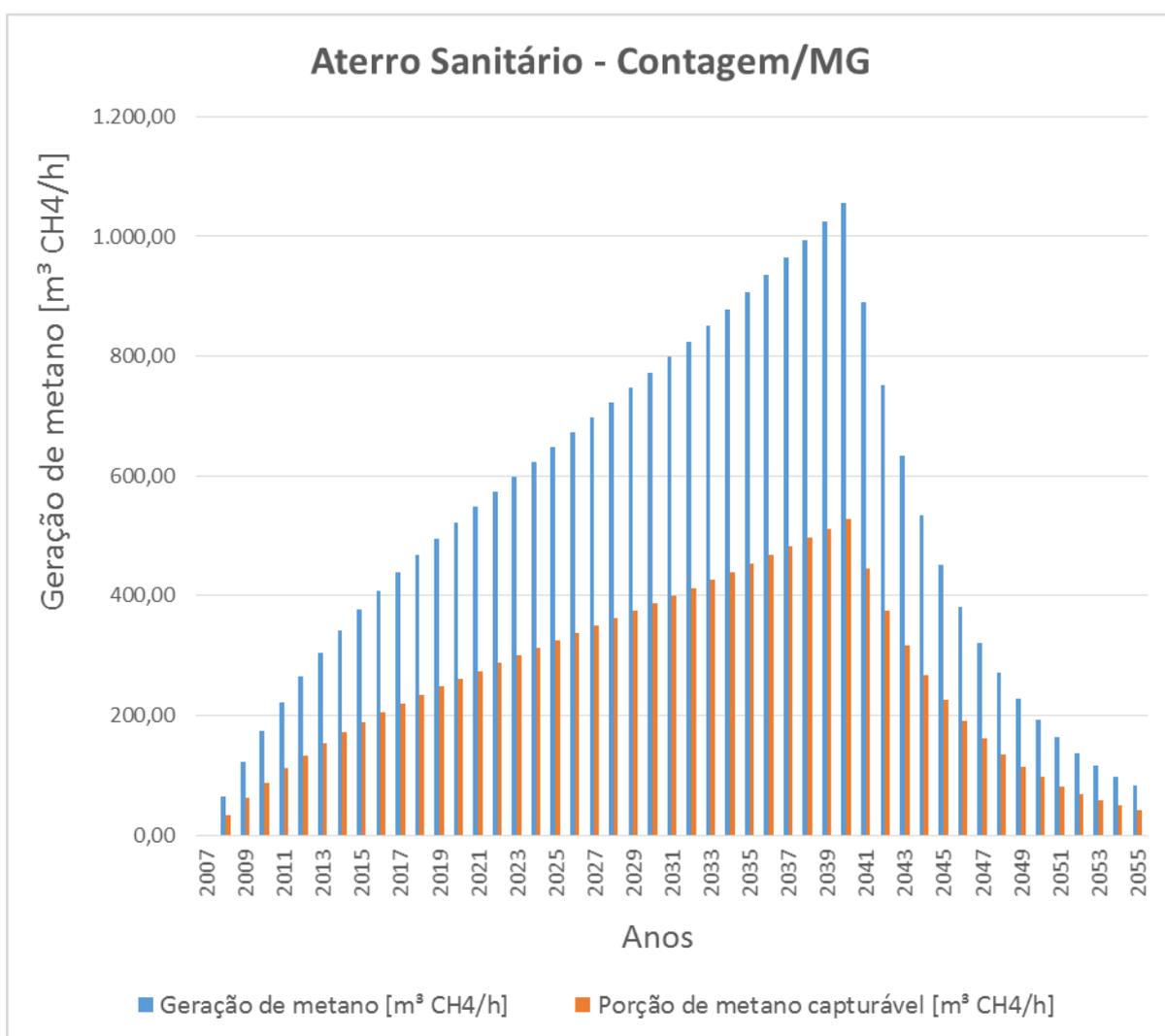


Figura 13. Geração de metano para a cidade de Contagem.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

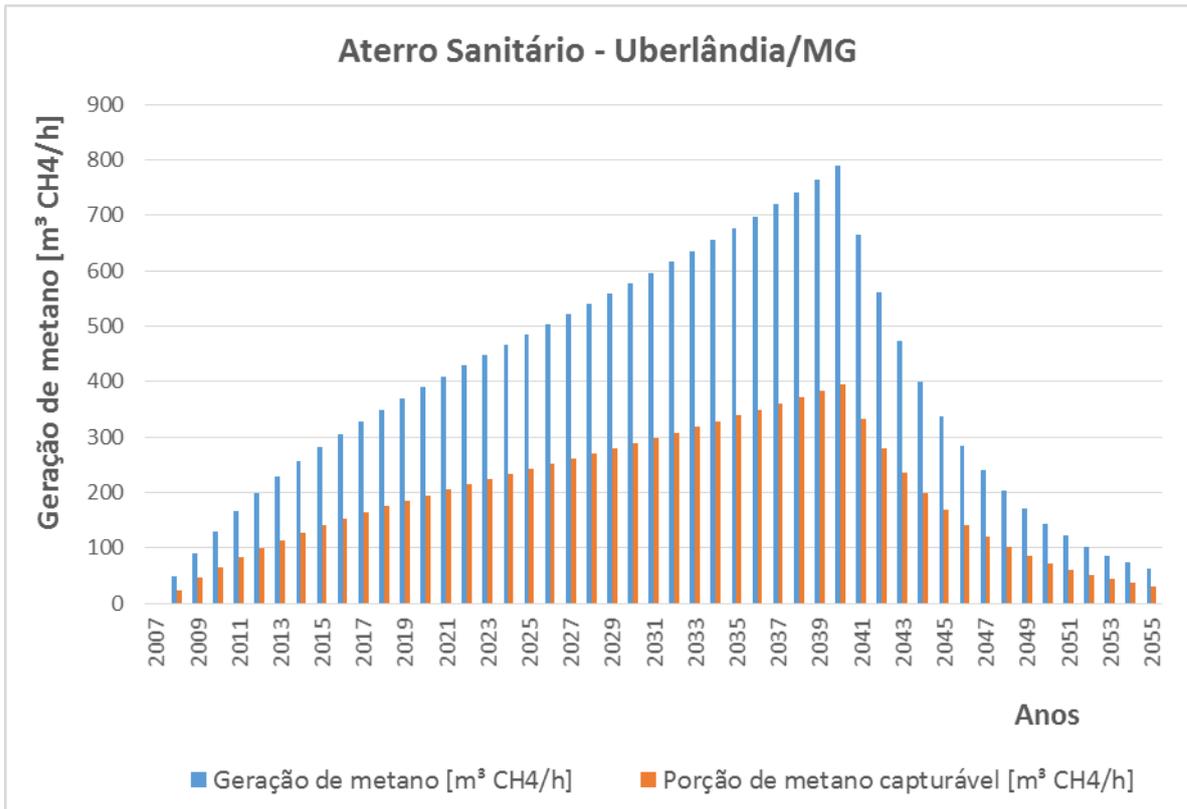


Figura 14. Geração de metano para a cidade de Uberlândia.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

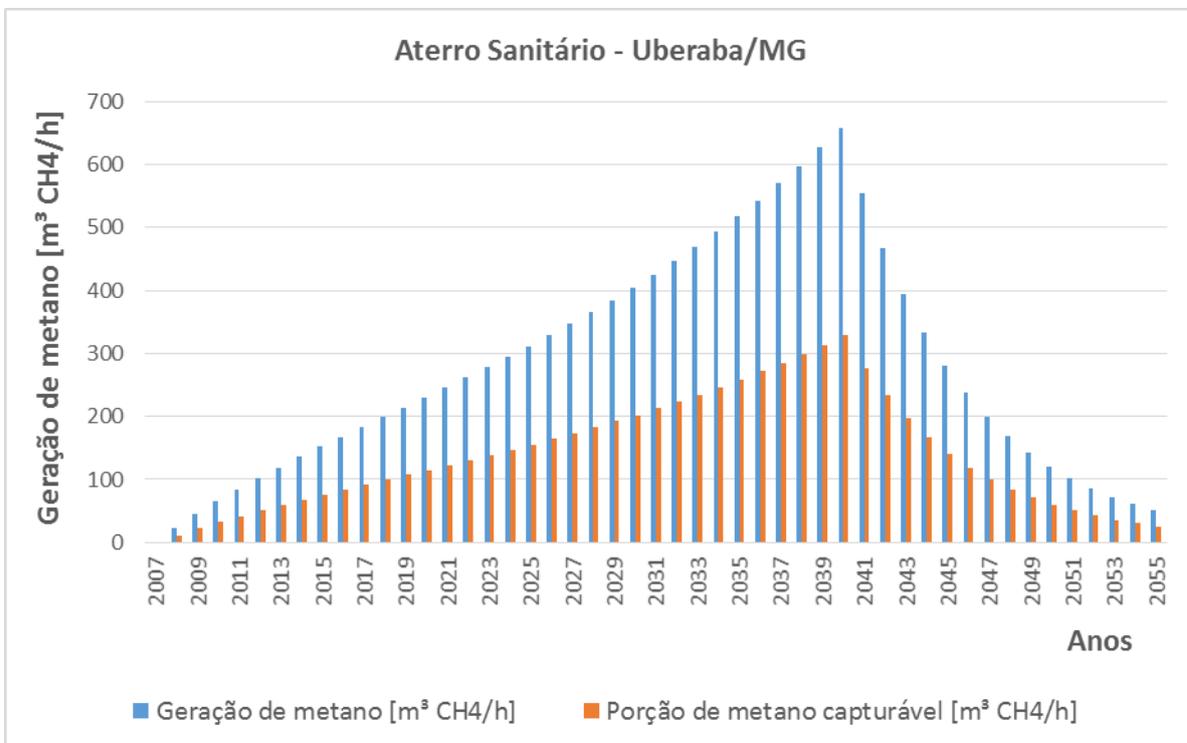


Figura 15. Geração de metano para a cidade de Uberaba.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

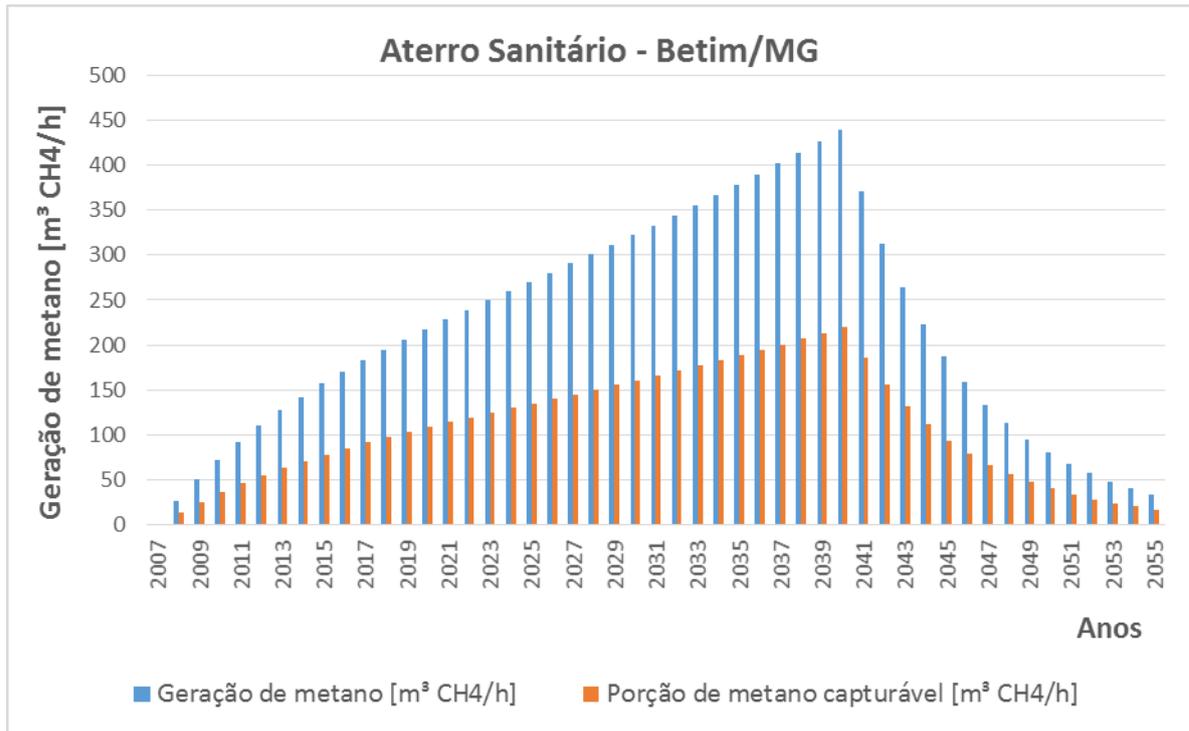


Figura 16. Geração de metano para a cidade de Betim.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

Conforme as Figuras de 13 a 16, o pico de produção se deu em 2040 para os quatro casos, porque o aterro sanitário encerra suas atividades neste ano, ou seja, tem-se o maior volume de rejeitos recebido pelo local até então. Porém, a produção de metano não termina, pois o volume de lixo acumulado continua se decompondo, mas de forma decrescente uma vez que não há mais deposição de RSU.

A cidade de Contagem é a maior geradora de RSUs, conseqüentemente, é a maior geradora de metano, seguida da cidade de Uberlândia pela mesma razão. Já Uberaba mesmo tendo uma quantidade de rejeitos menor que Betim, possui uma taxa de crescimento anual de RSU superior. Dessa maneira, Uberaba ultrapassa o volume de lixo recebido por seu aterro em 2027 gerando um volume de CH<sub>4</sub> superior à Betim.

### 4.3 Produção de energia elétrica

Devido ao recebimento de resíduos sólidos urbanos variar de uma cidade para outra e cada equipamento exibir uma eficiência elétrica distinta ( $\eta_{el}$ ), os resultados de produção de energia elétrica a partir dos motores e também da turbina são de acordo com os resultados de geração de metano a partir dos resíduos sólidos urbanos de cada cidade. Nesta seção, foram considerados os valores informados pelos fabricantes de variação de eficiência do equipamento devido a variação de vazão mássica de combustível em comparação a vazão mássica de projeto do equipamento.

Desta forma, as Figuras de 17 a 20 exibem a produção de energia elétrica [GWh] para as cidades de Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim, respectivamente, desde o ano de 2007 ao ano de 2055 com pico de produção em 2040.

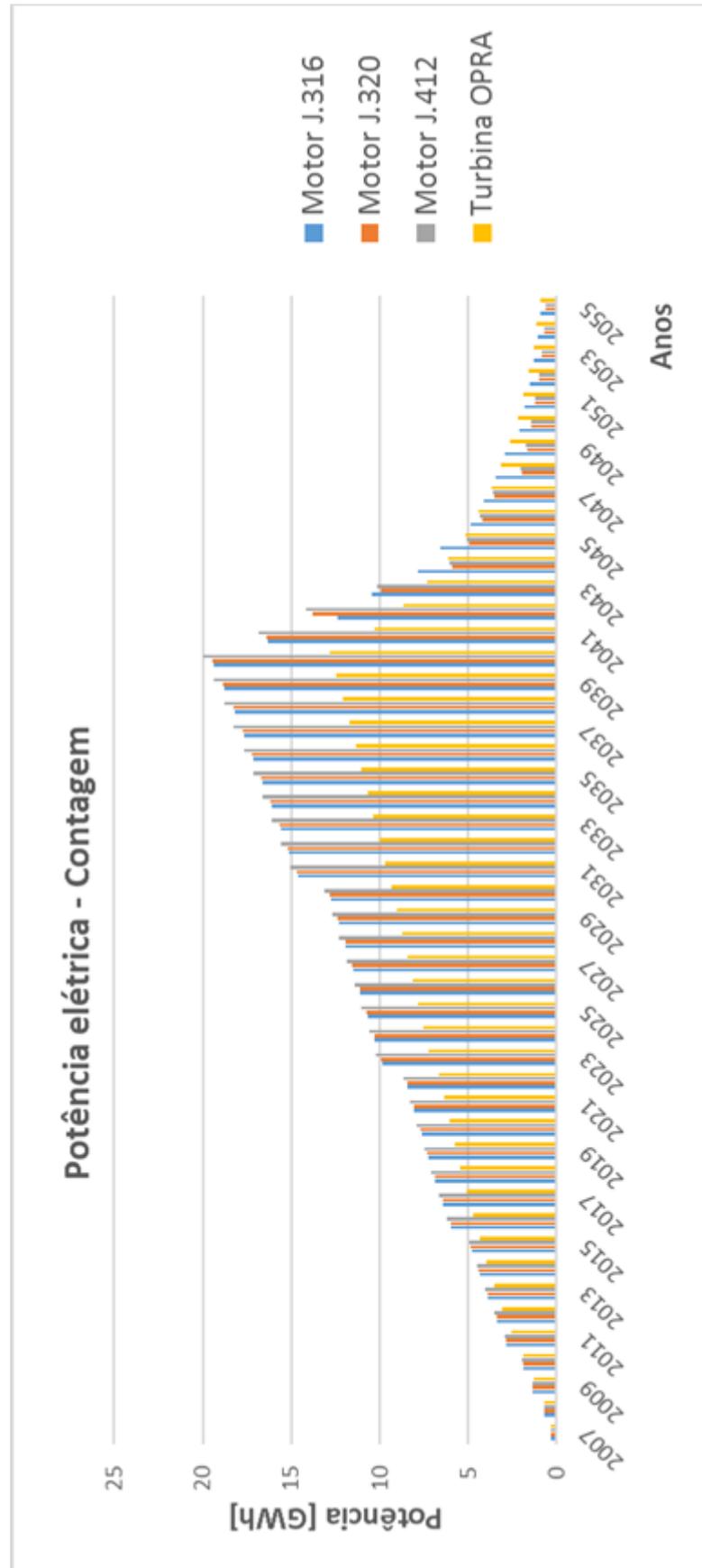


Figura 17. Produção de eletricidade para a cidade de Contagem.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

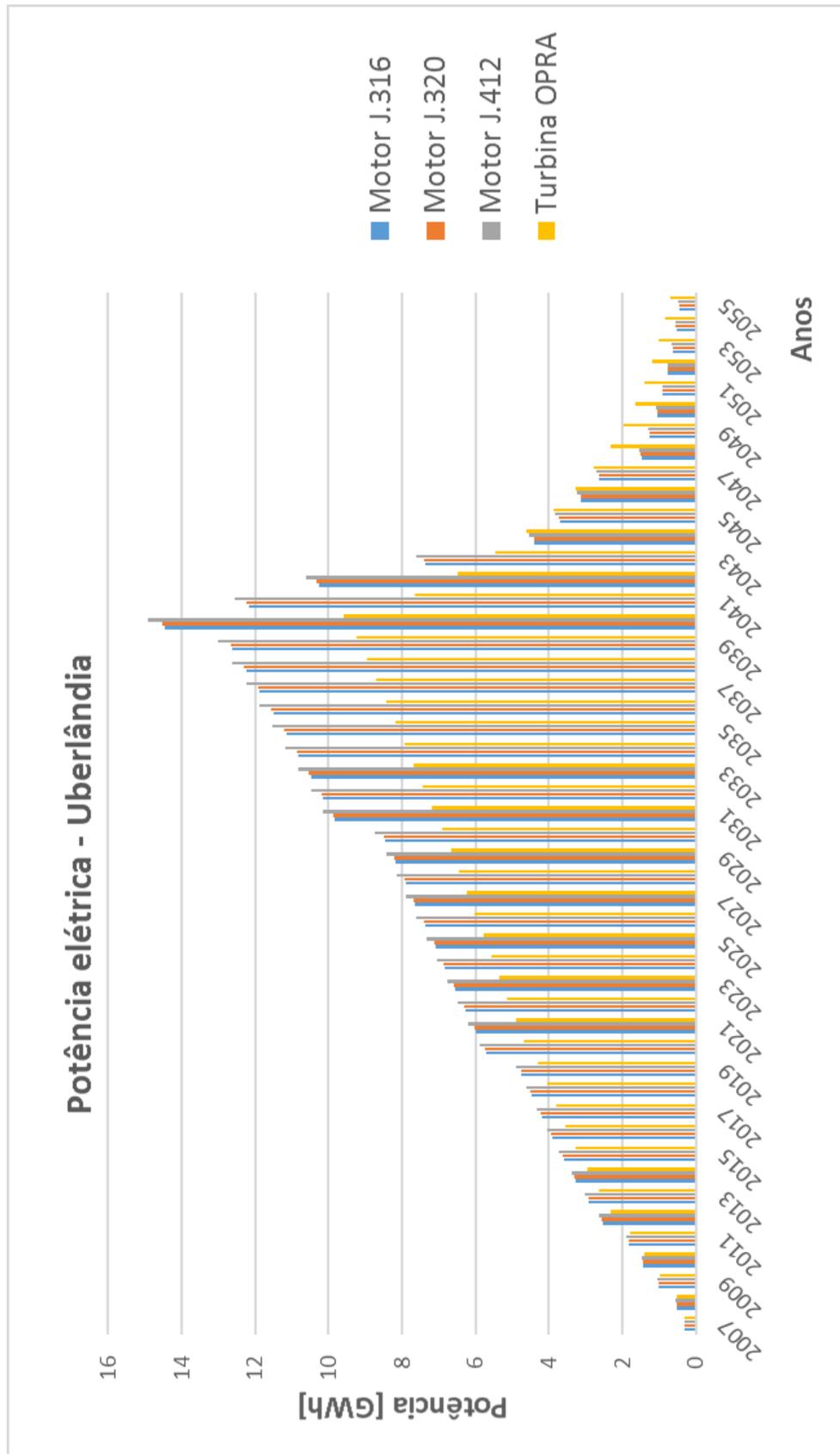


Figura 18. Produção de eletricidade para a cidade de Uberlândia.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

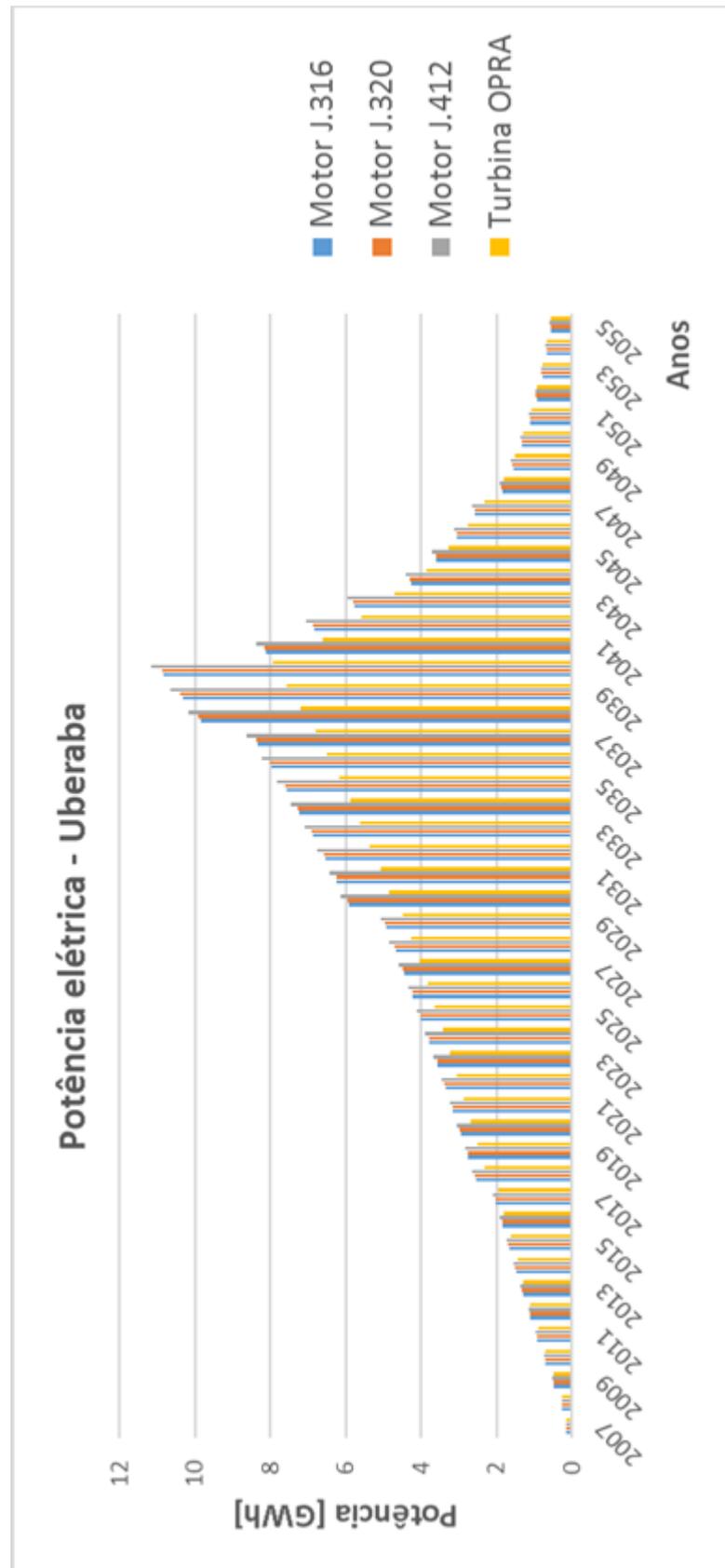


Figura 19. Produção de eletricidade para a cidade de Uberaba.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

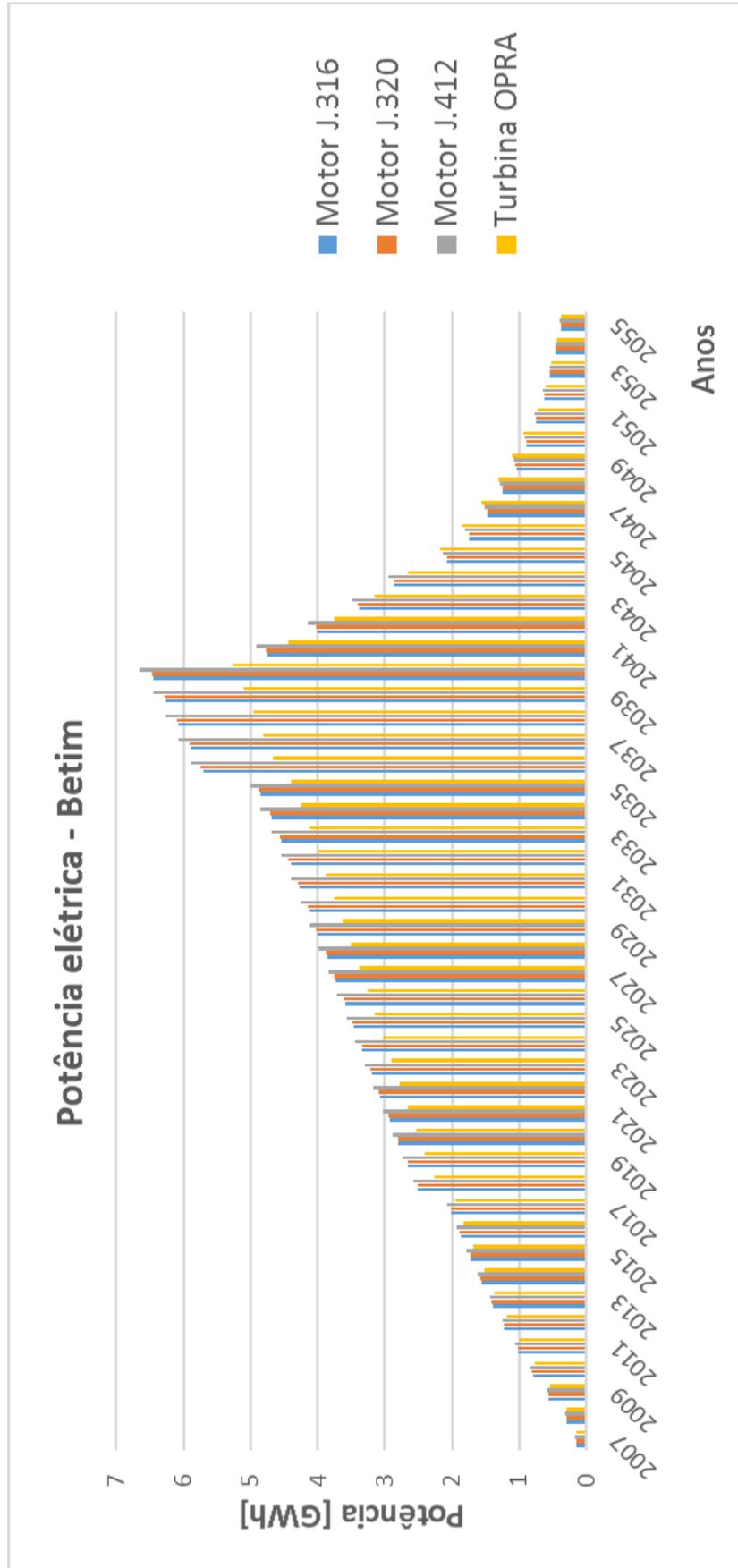


Figura 20. Produção de eletricidade para a cidade de Betim.  
 Fonte. Pesquisa direta, 2017.

Conforme as Figuras de 17 a 20, a produção de eletricidade se mostrou viável em todas as 4 cidades gerando energia da ordem de GWh, ou seja, energia que pode ajudar a suprir a demanda de eletricidade desses municípios.

Para o ano de pico de produção de metano (2040), o motor J.412 tem o melhor desempenho em Contagem com produção de 19,96GWh, seguido de Uberlândia com 14,9GWh, Uberaba com 11,18GWh e, finalizando com a cidade de Betim com 6,65GWh. Enquanto que a turbina OPRA tem o pior desempenho para o mesmo ano. Para Contagem a produção foi de 12,83GWh, Uberlândia 9,58GWh, Uberaba com 7,94GWh e Betim 5,26GWh.

Devido à vazão mássica de metano variar ano a ano, as eficiências elétricas das máquinas térmicas variam proporcionalmente e não conseguem chegar ao seu máximo de produção em todos os anos. Por consequência, Contagem é a cidade menos afetada por ser a maior produtora enquanto que Betim tem a menor eficiência. Já em relação às máquinas térmicas, a turbina é a que possui menor variação em termos de eficiência elétrica se comparado aos motores, ou seja, mesmo apresentando o pior desempenho em 2040. Em determinados anos, ela se demonstra a mais vantajosa.

#### **4.4 Produção de energia térmica**

Devido ao recebimento de resíduos sólidos urbanos variar de uma cidade para outra e a cada equipamento, em questão, apresentar uma eficiência térmica distinta ( $\eta_{th}$ ), os resultados de produção de energia térmica a partir dos motores e também da turbina são de acordo com os resultados de geração de metano a partir dos resíduos sólidos urbanos de cada cidade. Nesta seção, foram também considerados os valores informados pelos fabricantes de variação de eficiência do equipamento devido a variação de vazão mássica de combustível em comparação a vazão mássica de projeto do equipamento.

Assim, as Figuras de 21 a 24 expõem a produção de energia térmica [GWth] para as cidades de Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim, respectivamente, desde o ano de 2007 ao ano de 2055 com pico de produção em 2040.

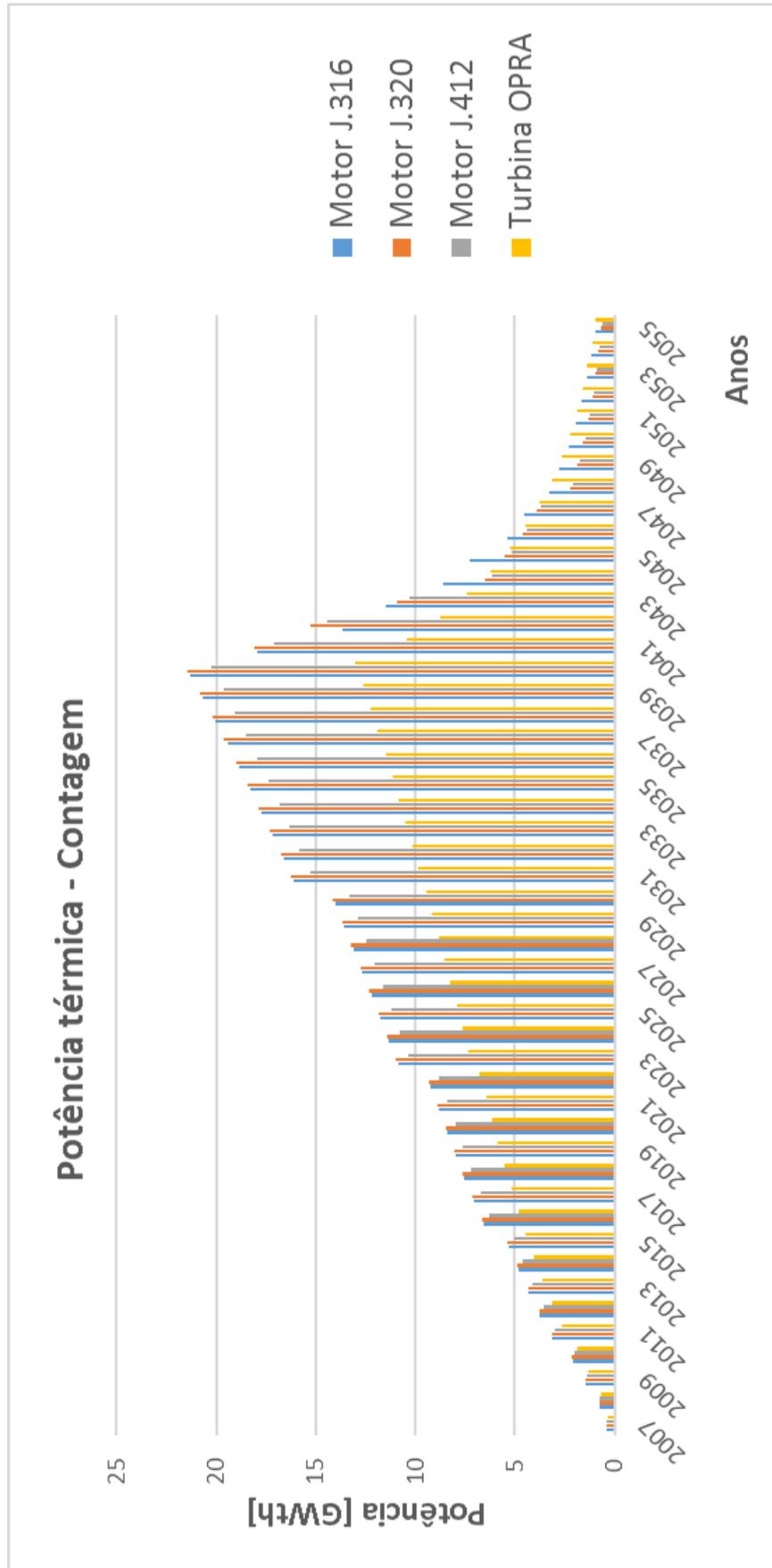


Figura 21. Produção de energia térmica para a cidade de Contagem.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

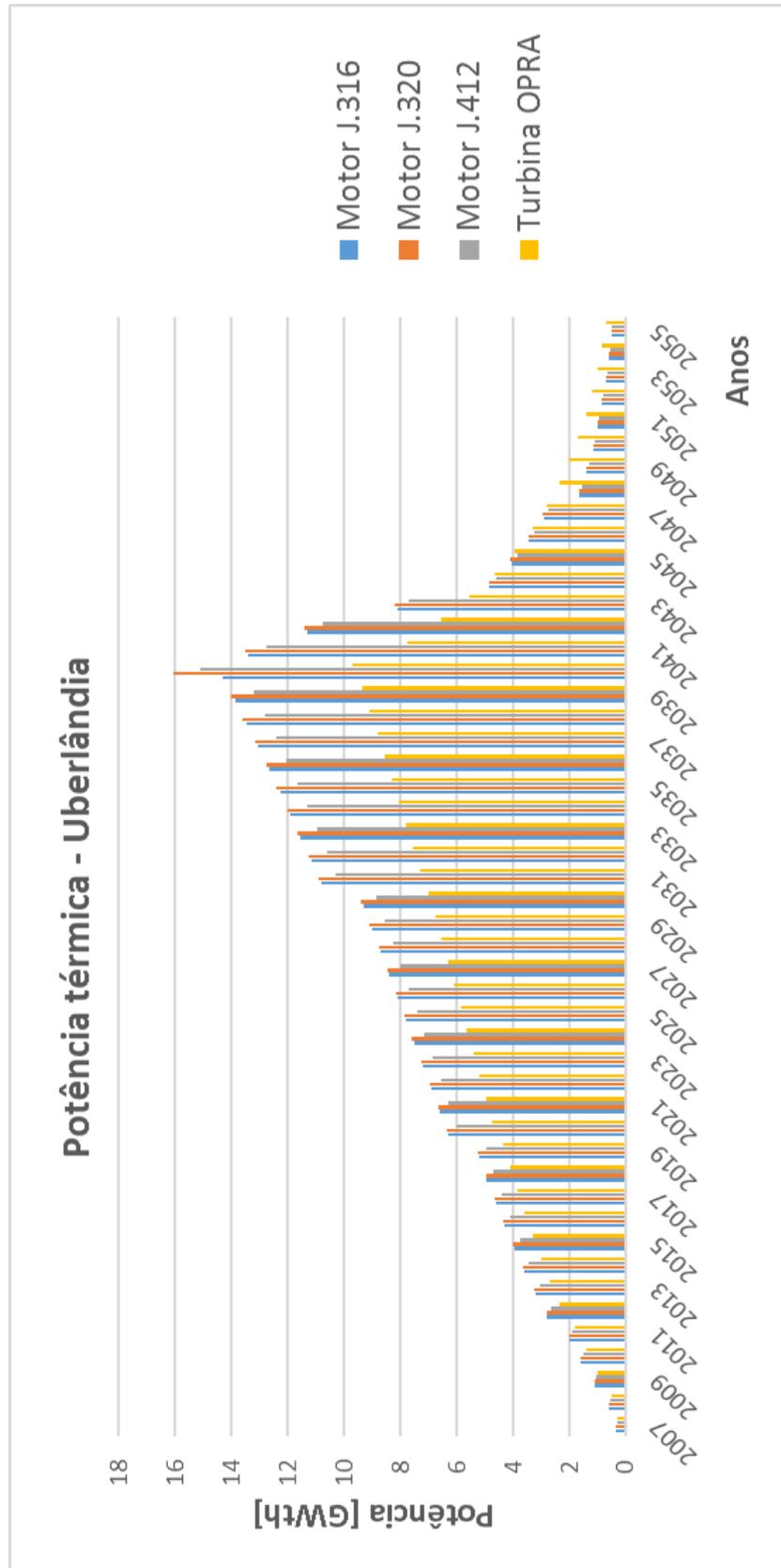


Figura 22. Produção de energia térmica para a cidade de Uberlândia.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

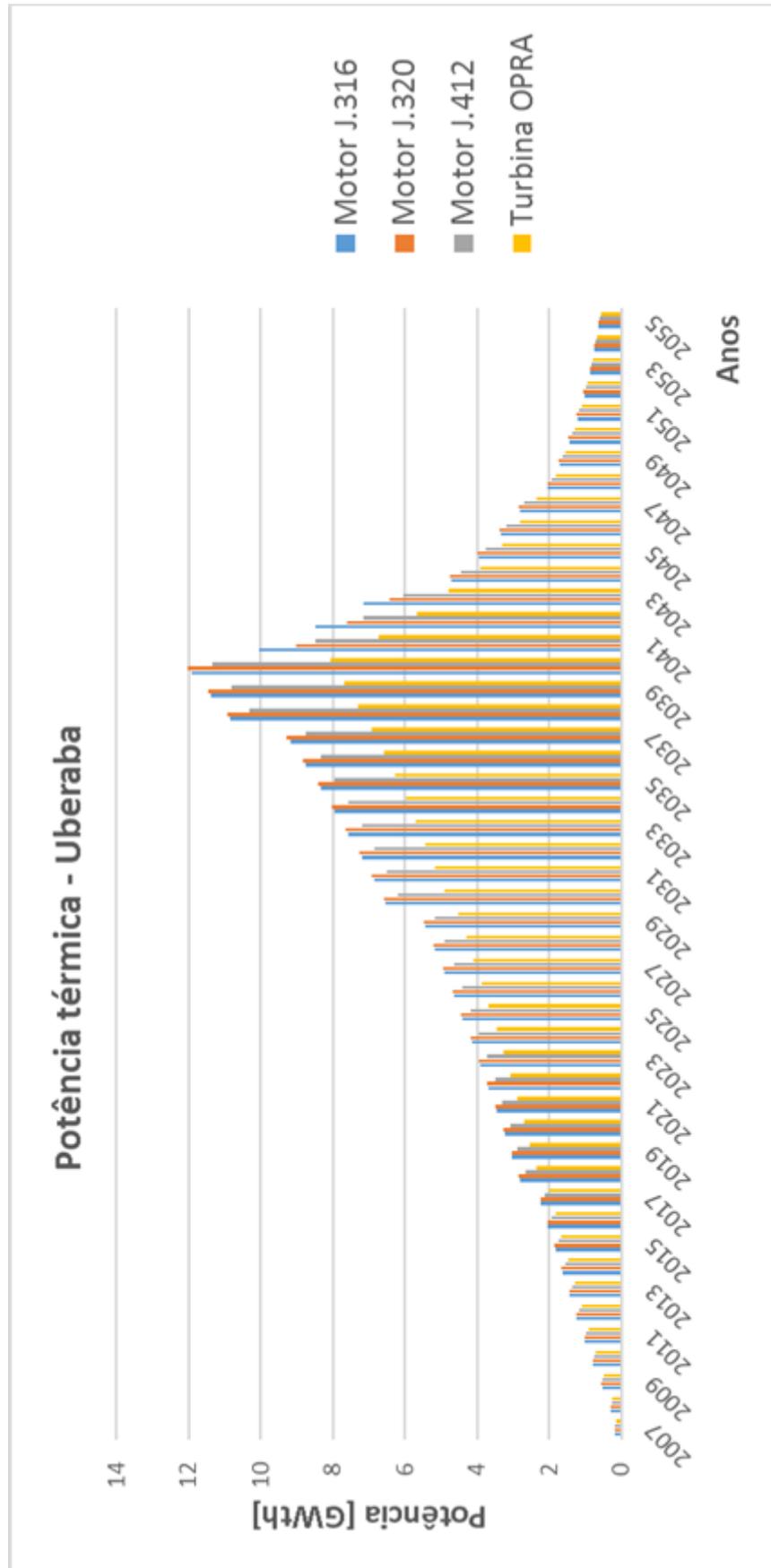


Figura 23. Produção de energia térmica para a cidade de Uberaba.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

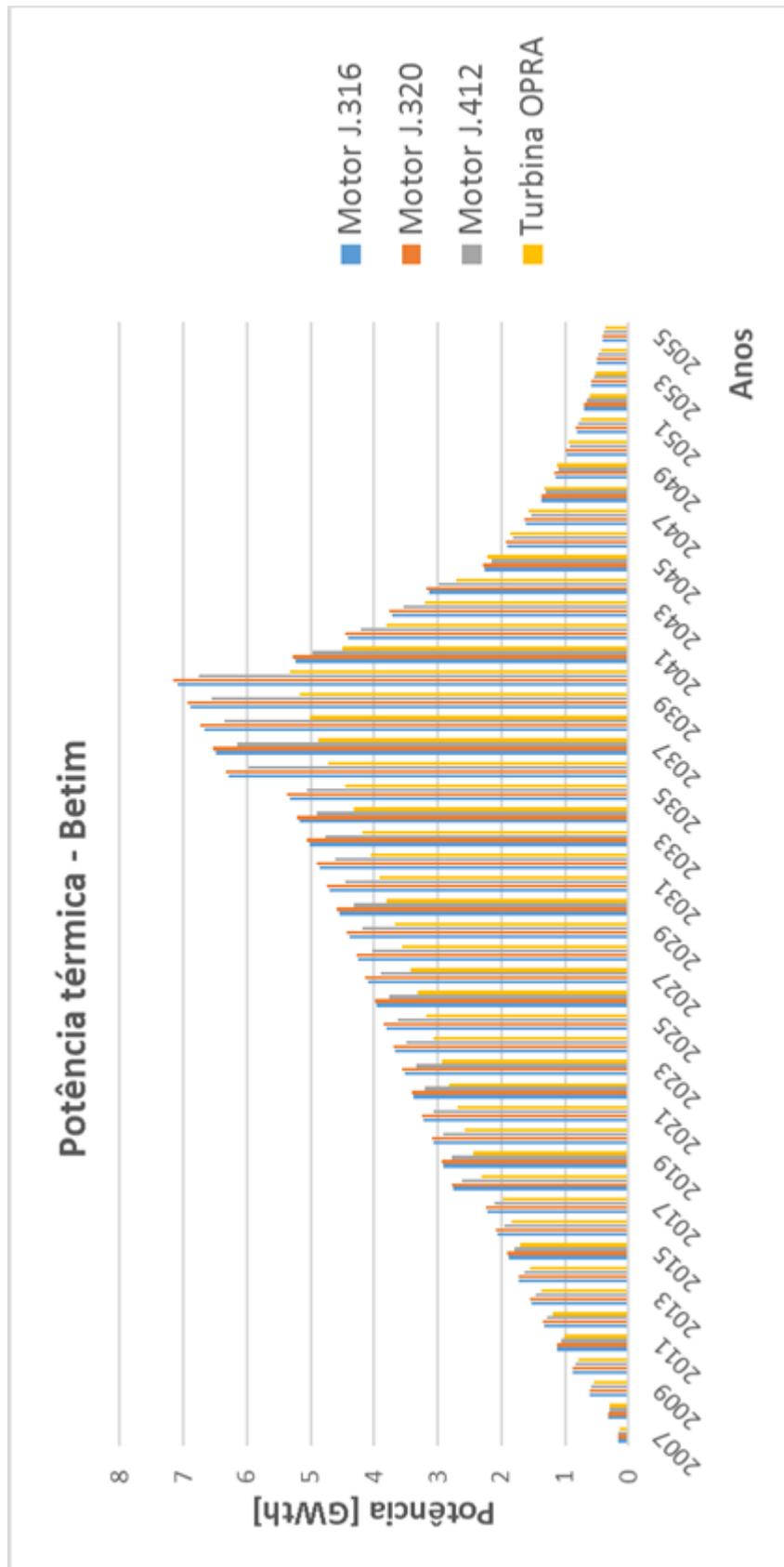


Figura 24. Produção de energia térmica para a cidade de Betim.  
Fonte. Pesquisa direta, 2017.

As Figuras de 21 a 24 mostram que em termos de produção de energia térmica, as 4 cidades novamente produziram em escala de GWth.

Para o ano de pico de produção de metano (2040), o motor J.320 tem o melhor desempenho em Contagem com produção de 21,48GWth, seguido de Uberlândia com 16,04GWth, Uberaba com 12,03GWth e, finalizando com a cidade de Betim com 7,16GWth. Enquanto que a turbina OPRA tem o pior desempenho para o mesmo ano, assim, Contagem produz 13,01GWth, Uberlândia 9,72GWth, Uberaba com 8,05GWth e Betim 5,34GWth.

Devido à vazão mássica de metano variar ano a ano, as eficiências térmicas dos equipamentos variam proporcionalmente e não conseguem chegar ao seu máximo de produção em todos os anos. Por consequência, Contagem é a cidade menos afetada por ser a maior produtora enquanto que Betim tem a menor eficiência. Já em relação aos equipamentos, a turbina é a que possui menor variação em termos de eficiência térmica se comparado aos motores, ou seja, mesmo apresentando o pior desempenho em 2040. Em determinados anos, ela se demonstra a mais vantajosa.

#### **4.5 Comparação entre as combinações**

Na Figura 25 é possível observar a ordem decrescente de geração de eletricidade dos municípios de Contagem; Uberlândia; Uberaba; e Betim para o ano de 2040.

É importante frisar que para o ano 2040, a eficiência energética de todas as máquinas térmicas alcança seu maior valor devido à vazão mássica mínima de metano ser atingida. Dessa forma, o motor J.316 chega à 40,7% de eficiência elétrica, o J.320 à 40,9%, o J.412 à 42% e a turbina OPRA à 27%.

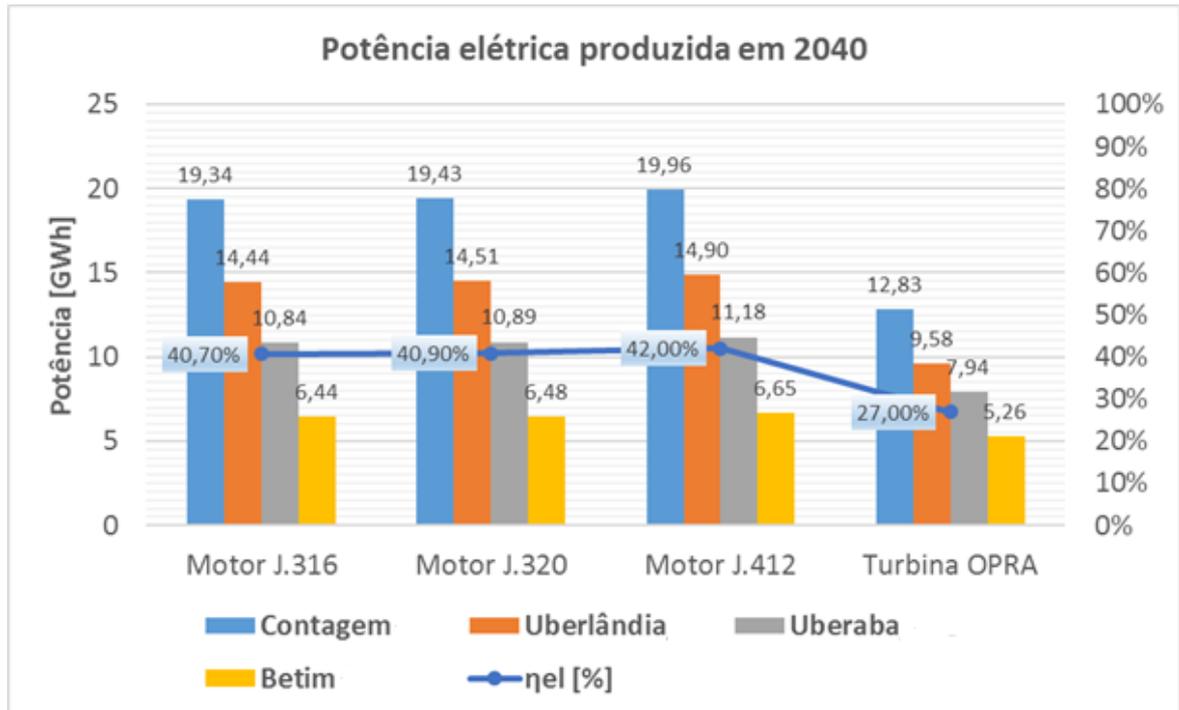


Figura 25. Energia elétrica produzida em 2040.  
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Através da Figura 25, constata-se que o motor J.412 é o o mais eficiente produzindo 19,96GWh em Contagem, 14,9GWh em Uberlândia, 12,42GWh em Uberaba e 8,31GWh em Betim. Energia que seria usada para ajudar a atender a demanda por eletricidade nestas cidades.

É relevante ressaltar também que qualquer configuração (uma cidade com um equipamento) gera energia elétrica na ordem de GWh, ou seja, apresenta produção de eletricidade relevante para auxiliar na demanda por energia local.

A Figura 26 mostra a ordem decrescente de geração de energia térmica dos municípios de Contagem; Uberlândia; Uberaba; e Betim para o ano de 2040.

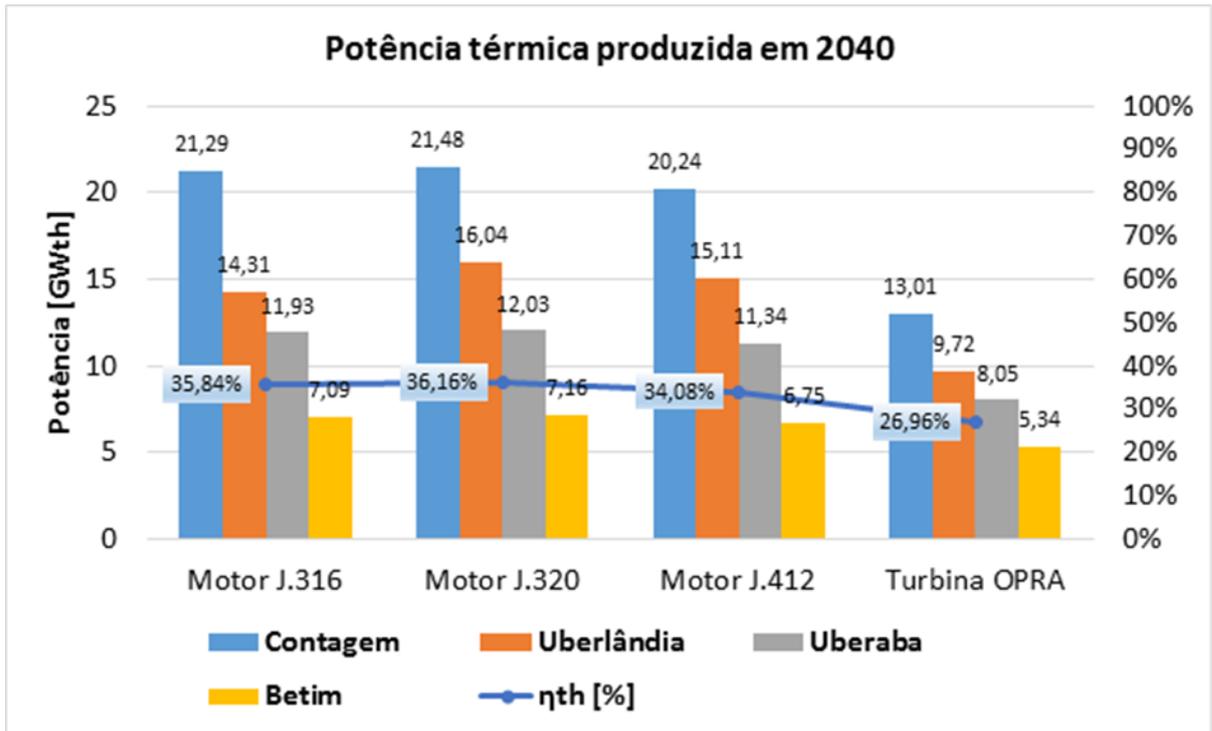


Figura 26. Energia térmica produzida em 2040.  
Fonte: Pesquisa direta, 2017.

Na Figura 26, observa-se que a eficiência energética de todas as máquinas térmicas alcança seu maior valor devido à vazão mássica mínima de metano ser atingida. Dessa forma, o motor J.316 chega à 44,8% de eficiência térmica, o J.320 à 45,20%, o J.412 à 42,60% e a turbina OPRA à 27,39%.

O motor J.320 apresenta-se como o mais eficiente produzindo 21,48GWth em Contagem, 16,04GWth em Uberlândia, 12,03GWth em Uberaba e 7,16GWth em Betim.

É relevante ressaltar também que qualquer configuração (uma cidade com um equipamento) gera energia térmica na ordem de GWth, ou seja, é viável utilizar biogás de aterro sanitário para produção de energia térmica, uma vez que o produto da decomposição do RSU pode ser facilmente captado por tubulações idealizadas na fase de projeto do aterro e que essa energia pode ser útil para as atividades humanas que necessitam desse tipo de energia.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo irá discorrer sobre as conclusões tiradas a partir dos dados obtidos no capítulo 4 através da metodologia utilizada no 3. E, também, recomendar trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusão

O Brasil possui um grande desafio a enfrentar sobre a questão energética. Logo, novas alternativas devem entrar em vigor para atender a demanda por energia elétrica no país. O biogás de aterro sanitário é uma ótima opção, pois além de atender a expectativa de geração de energia também visa a sustentabilidade e esta é indispensável em qualquer processo no mundo moderno.

Através dos resultados apresentados no capítulo 4, percebe-se que a geração de energia atinge valores na escala de GWh/GWth tanto de energia térmica quanto elétrica podendo ser de grande utilidade para as atividades humanas que necessitam de energia. A pergunta problema deste trabalho disserta sobre a viabilidade técnica do uso de biogás de aterro sanitário em máquinas térmicas, a qual, conforme resultados, foi respondida.

Já com relação aos objetivos, o objetivo principal trata da análise técnica da utilização de biogás gerado na decomposição de resíduos sólidos urbanos destinados aos aterros sanitários como combustível para geração de energia elétrica em máquinas térmicas com vistas à sustentabilidade. Pode-se afirmar que, através dos resultados mostrados no capítulo 4, o objetivo foi cumprido.

A revisão bibliográfica e o detalhamento dos ciclos termodinâmicos e das variáveis de operação do sistema de geração de energia usando o biogás foram feitas no capítulo 2. A metodologia aplicada foi explanada apresentando as variáveis, os indicadores de estudo e os instrumentos de coleta além de ser explicado como a tabulação de dados seria feita. E, finalmente, os resultados foram obtidos segundo às configurações adotadas no capítulo 4.

Através da metodologia *“Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site”*, modelo da UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), foi possível quantificar a geração de metano produzida para as quatro cidades estudadas durante os anos de 2007 ao ano de 2055.

O estudo de caso envolveu os dados de coleta de resíduos sólidos de quatro cidades do estado de Minas Gerais: Contagem, Uberlândia, Uberaba e Betim. Para cada cidade, foi analisada a produção de metano em aterro sanitário e a produção de energia elétrica e térmica através do uso de três motores *Jenbacher* dos seguintes modelos: J.316; J.320 e J.412; e uma turbina a gás OPRA. Esses motores e a turbina foram escolhidos devido à possibilidade de trabalhar com gás pobre, segundo dados dos fabricantes.

Também foi exequível a mensuração de energia elétrica e térmica produzidas pelas configurações usando quatro máquinas térmicas. As cidades analisadas adotadas no estudo pela metodologia IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) de 2007 a 2055. Observou-se que a produção de metano teve um pico no ano de 2040, atingindo o valor maior de 1000 m<sup>3</sup>/h de metano gerado para a cidade de Contagem/MG e de 400 m<sup>3</sup>/h para a cidade de Betim/MG.

Para o ano de pico de produção de metano (2040), o motor J.412 apresentou melhor desempenho para a cidade de Contagem com produção de 19,96 GWh, seguido da cidade de Uberlândia com 14,90 GWh, cidade de Uberaba com 11,18 GWh e, por último, a cidade de Betim com 6,65 GWh. Já para o caso do uso da turbina OPRA, tendo o pior desempenho para o mesmo ano, assim, Contagem apresentou uma produção de 12,83 GWh, Uberlândia de 9,58 GWh, Uberaba de 7,94 GWh e Betim a produção de 5,26 GWh.

E, uma vez que as mudanças climáticas vem ocorrendo ao longo dos anos exponencialmente devido às altas taxas de urbanização e de industrialização do mundo, a utilização de gás gerado na decomposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários para produção de energia mostra-se sustentável, pois tem-se a minimização do efeito estufa, porquanto o potencial de aquecimento global do metano é 21 vezes maior que o do gás carbônico, além de medidas sociais como a inserção de cooperativas de coletores de lixo que podem trabalhar aliadas aos aterros sanitários na seleção de materiais recicláveis, estes por não serem biodegradáveis não se decompõem e, por consequência não geram metano. Ou seja, a parte da sustentabilidade, tão em alta atualmente, é também viabilizada socialmente, economicamente e ambientalmente.

E, finalmente, em se tratando do uso de biogás em máquinas térmicas para geração de eletricidade, é notável a viabilidade técnica de sua utilização, pois a captação do biogás pode ser facilmente realizada por tubulações construídas no aterro e a quantidade de energia tanto térmica quanto elétrica geradas alcançam valores altos, energia esta que pode ser utilizada pelo próprio aterro para execução de suas atividades e também vendida para a companhia de

eletricidade local atendendo a demanda por energia nas atividades humanas que requerem eletricidade.

## **5.2 Recomendações**

Nesse trabalho, contemplou-se o uso de uma turbina a gás e três motores separadamente, porém há várias maneiras de se utilizar máquinas térmicas para geração de energia: uso de turbina a vapor; ciclos combinados; cogeração; reaquecimento; entre outros. Ou seja, outras pesquisas podem ser realizadas objetivando o aumento da eficiência dos ciclos termodinâmicos adotados nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.
- ABRELPE. **Resíduos Sólidos: Manual de boas práticas no planejamento**. Disponível em <http://www.abrelpe.com.br>. Acesso em 16/05/2016.
- ALBAGLI S. **Informação e desenvolvimento sustentável: novas questões para o século XXI**. Ciência da informação, Volume 24 – Artigos. 1995.
- ALVES F. **Ciclo de Brayton – Turbina a gás**. Departamento de engenharia mecânica – Termodinâmica aplicada. Natal, 2011.
- ALVES J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- ANTINARELLI A. **Construindo a gestão estratégica sustentável: um estudo sobre a empresa Mercur S/A**. Dissertação de mestrado. Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC. 2013.
- BARBOSA J. E. **Módulo experimental para determinação da octanagem dos combustíveis**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 2003.
- BARBOSA L. **Sociedade de consumo**. Editora Zahar, 3ª edição. Rio de Janeiro, 2004.
- BORGNACKE C.; SOONTAG R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. 7ª edição. Americana – SP. Blucher, 2009.
- BRUNETTI F. **Motores de Combustão Interna**. Vol. 1, 3ª edição. São Paulo: Blucher, 2012.
- CARNEIRO W. A. **Avaliação do comportamento dinâmico de turbinas a gás aeroderivativas na operação em ciclo combinado**. Minas Gerais, 2007.
- CARVALHO M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Salvador, 2011.
- ESPARTA A. R. J.; LUCON O. S.; UHLIG A. **Energia renovável no Brasil**. Rio de Janeiro, 2004.
- CAYUELA, M. A. *Thermodynamic, its cycles and Gas Turbine Engine*. Disponível em <http://termodinamicaymtg.blogspot.com.br/2013/06/turbinas-de-gas-gas-turbine.html>. Acesso em 17/05/2016.
- ÇENGEL Y. A.; BOLES M. A. **Termodinâmica**. 3ª edição. AMGH Editora Ltda, 2013.

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.

CLARO, P. B. O.; CLARO D. P.; AMÂNCIO R. **Entendendo o conceito de sustentabilidade nas organizações**. Revista de administração da USP. São Paulo, 2008.

CLUBE DO DIESEL. **Um pouco de história do diesel**. 2007. Disponível em <http://www.clubedodiesel.com.br/?p=315>. Acesso em 2016.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; VARKULYA, A. Jr.; AVELLAR, L. H. N.; FERLING, F. F. **Estado da arte do biogás: Relatório de acompanhamento**. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001.

COMANDOLLI G. C. **Análise numérica das condições de operação de um motor de baixa cilindrada para competição de eficiência energética**. Universidade Federal de Santa Catarina: Campus Joinville. Engenharia Automotiva, 2015.

COSTA, D. F. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

CUNHA, M.A.; CONSONI, A. J. **Os estudos do meio físico na disposição de resíduos**. Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. Associação brasileira de geologia de engenharia (ABGE) e instituto de pesquisas tecnológicas (IPT). São Paulo, 1995.

DELBONI A. **Sustentabilidade**. Disponível em <http://www.delboniauriemo.com.br/paginas/institucional/sustentabilidade-delboni>. Acesso em 17/05/2016.

Department of economic and social affairs population division. Disponível em <http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005wup.htm>. Acesso em 16/05/2016.

ELBA M. Presidente executiva da associação brasileira de energia eólica (ABBEólica). DISPONÍVEL EM: <https://nacoesunidas.org/vento-a-favor-para-as-energias-limpas-no-brasil/>. ACESSO EM 15/05/2016.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas/SP**. Universidade de Campinas, UNICAMP. Campinas, 2003.

FERRAZ F.; **Turbinas a vapor**. Unijuí, 2008.

FILHO J. A. **Matriz Energética Brasileira: da crise à grande esperança**. Mauad Editora Ltda. Rio de Janeiro, 2003.

- FILHO, L. F. B. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- 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.
- ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás em aterros sanitários**. Volume 1. São Paulo, 2009.
- JURAS S. M. V. G. **Comentários à Lei de resíduos sólidos : lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010**. Editora Pillares. 2011.
- KAUTZ, M.; HANSEN, U. *The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass - Applied Energy*. Vol. 84, 2007.
- LISÉTE, C. L. - UFMG; ÁLVARO, L. G. C. – UFRJ; TEIXEIRA, E. N. – UNICAMP. **Resíduos Sólidos – Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. 2013.
- MACHADO L. A. F. Disponível em <http://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/rio20/temas-em-discussao-na-rio20/onu-estabelece-tres-pilares-para-o-desenvolvimento-sustentavel-dos-paises-economico-social-e-ambiental.aspx>. Acesso em 27/05.2016.
- MARTINELLI L. C. Jr. **Máquinas térmicas**. DeTEC. Panambi, 2002.
- MARTINS J. **Motores de combustão interna**. Editora Publindústria, 2ª edição. 2006.
- MENESES E. L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas**. 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. **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.
- MUKAI T. **Direito ambiental sistematizado**. Editora Forense Universitária, 6ª edição. 2007.
- MUYLAERT, M. S.; AMBRAM, R.; CAMPOS, C. P.; MONTEZ, E. M.; OLIVEIRA, L.B. **Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do mecanismo de**

- desenvolvimento limpo (MDL) do Protocolo de Quioto:** Estudo de Caso. Editora COPPE, 247 p. Rio de Janeiro, 2000.
- NOVAES W. **Eco-92: Avanços e interrogações.** Secretário Estadual do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia de Brasília. Editora Scielo, volume 6. São Paulo, 1992.
- PACHECO, L. DE M. **Compressores.** SENAI – Serviço de aprendizagem industrial. São Paulo, 2011.
- PAULA, J. A (Org.). **Biodiversidade, População e Economia.** Belo Horizonte, MG: UFMG, 1997.
- PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP:** Estudo de caso. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- PEREIRA H. M. **Avaliação do sistema de medição de empuxo em turbinas a gás usando biocombustíveis.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- Pereira Neto (2007); Pereira Neto e Magalhães (1999); Oliveira (1998); Coame (2004); Magalhães e Magalhães (2008); Cançado, Lessa e Parreira (2007) apud CEMIG GT e FEAM, 2011.
- PROIN/CAPES. **Arquivos de Transparências (CD).** Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999.
- PSR - Consultoria especializada em estudos energéticos, 2014.
- QUEIROZ M.; MATIAS J. A. **Básico de turbina a gás.** Rio de Janeiro, 2003.
- RACHE A. M. **Mecânica Diesel.** Editora Hemus, ISBN 9788528903874, 2004.
- SEBRAE. **Créditos de carbono.** Disponível em <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-e-credito-de-carbono,106d438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>. Acesso em 04/04/2017.
- SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico.** Fortaleza: Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará, 2004.
- SOUZA A. C. A. **A evolução da política ambiental no Brasil do século XX.** Historiadora e Mestre em Ciência Política pelo PPGCP/IFCS/UFRJ, 2010.
- SPOSITO, M. E. B. **Capitalismo e Urbanização.** São Paulo, 1989.
- TASCHNER G. **Raízes da cultura do consumo.** Professora de Sociologia da EAESP-FGV e da FFLCH-USP. Revista USP. São Paulo, 1996.
- TILLMANN C. A. C. **Motres de combustão interna e seus sistemas.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia; Pelotas-RS, 2013.

- TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2003.
- TORRALBO M. M. **Turbomáquinas Térmicas**. Secretaria de Publicações da E.T.S.I.I. Madri, 1983.
- UNESP disponível em <http://www.dem.feis.unesp.br/intranet/capitulo12.pdf>. Acesso em 26/06/2016.
- VARELLA C. A. A. **Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.
- VIOLA, E. J.; LEIS, H. R. **A evolução das políticas ambientais no Brasil, 1971-1991: do bissetorialismo preservacionista para o multissetorialismo orientado para o desenvolvimento sustentável**. 2ª edição. Editora da UNICAMP. Campinas, 1995.
- WILLUMSEN, H. C. *Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide*. *LG Consultant*. 2001.
- YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2ª edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2001.
- WORLD BANK. (1999). **Technical Guidance Report - Municipal Solid Waste Incineration**. Disponível em [http://www.worldbank.org/urban/solid\\_wm/erm/CWG%20folder/Waste%20Incineration.pdf](http://www.worldbank.org/urban/solid_wm/erm/CWG%20folder/Waste%20Incineration.pdf). Acesso em agosto de 2014.

## ANEXOS

Jenbacher Type 3	J316	Technical data		
Electrical Output (kW)	850	<b>Configuration</b>	V 70°	
Energy Input (kW)	2086	<b>Bore (mm)</b>	135	
NOx	500	<b>Stroke (mm)</b>	170	
Thermal Efficiency	44.8%	<b>Displacement / cylinder (lit)</b>	2.43	
Electrical Efficiency	40.7%	<b>Speed (rpm)</b>	1,500 (50 Hz) 1,200 / 1,800 (60 Hz)	
Total Efficiency	85.6%	<b>Mean piston speed (m/s)</b>	8.5 (1,500 rpm) 6.8 (1,200 rpm) 10.2 (1,800 rpm)	
		<b>Scope of supply</b>	Generator set, cogeneration system, generator set / cogeneration in container	
		<b>Applicable gas types</b>	Natural gas, flare gas, propane, biogas, land-fill gas, sewage gas. Special gases (e.g., coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)	
		<b>Engine type</b>	J312	J316
		<b>No. of cylinders</b>	12	16
		<b>Total displacement (lit)</b>	29.2	38.9
				48.7

## Outputs and efficiencies

Biogas		1,500 rpm   50 Hz					1,800 rpm   60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW) <sup>1</sup>	$\eta_{el}$ (%) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>2</sup>	$\eta_{th}$ (%) <sup>2</sup>	$\eta_{tot}$ (%)	Pel (kW) <sup>1</sup>	$\eta_{el}$ (%) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>2</sup>	$\eta_{th}$ (%) <sup>2</sup>	$\eta_{tot}$ (%)
500 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	J312	526	41.3	563	44.2	85.4					
	J312	635	40.4	709	45.1	85.5	633	38.1	810	48.8	86.9
	J316	703	42.0	734	43.0	85.0					
	J316	847	41.0	935	45.0	85.0	849	38.3	1,084	48.9	87.3
	J320	1,067	40.9	1,179	45.2	86.1	1,062	39.1	1,321	48.6	87.8
250 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	J312	635	39.0	730	44.8	83.8	633	36.8	860	49.9	86.7
	J316	847	39.1	964	44.5	83.6	849	37.0	1,147	49.9	86.9
	J320	1,067	39.3	1,225	45.1	84.4	1,062	37.0	1,451	50.5	87.5

Anexo I. Informações técnicas do motor J316.

Fonte. *Jenbacher*, 2017.

Jenbacher Type 3	J320				
Electrical Output (kW)	1067				
Energy Input (kW)	2608				
NOx	500				
Thermal Efficiency	45.2%				
Electrical Efficiency	40.9%				
Total Efficiency	86.1%				
		<b>Configuration</b>	V 70°		
		<b>Bore (mm)</b>	135		
		<b>Stroke (mm)</b>	170		
		<b>Displacement / cylinder (lit)</b>	2.43		
		<b>Speed (rpm)</b>	1,500 (50 Hz) 1,200 / 1,800 (60 Hz)		
		<b>Mean piston speed (m/s)</b>	8.5 (1,500 rpm) 6.8 (1,200 rpm) 10.2 (1,800 rpm)		
		<b>Scope of supply</b>	Generator set, cogeneration system, generator set / cogeneration in container		
		<b>Applicable gas types</b>	Natural gas, flare gas, propane, biogas, land- fill gas, sewage gas. Special gases (e.g., coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)		
		<b>Engine type</b>	J312	J316	J320
		<b>No. of cylinders</b>	12	16	20
		<b>Total displacement (lit)</b>	29.2	38.9	48.7

### Outputs and efficiencies

NOx <	Type	1,500 rpm   50 Hz					1,800 rpm   60 Hz				
		Pel (kW) <sup>1</sup>	$\eta_{el}$ (%) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>2</sup>	$\eta_{th}$ (%) <sup>2</sup>	$\eta_{tot}$ (%)	Pel (kW) <sup>1</sup>	$\eta_{el}$ (%) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>2</sup>	$\eta_{th}$ (%) <sup>2</sup>	$\eta_{tot}$ (%)
500 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	J312	526	41.3	563	44.2	85.4					
	J312	635	40.4	709	45.1	85.5	633	38.1	810	48.8	86.9
	J316	703	42.0	734	43.0	85.0					
	J316	847	41.0	935	45.0	85.0	849	38.3	1,084	48.9	87.3
	J320	1,067	40.9	1,179	45.2	86.1	1,062	39.1	1,321	48.6	87.8
250 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	J312	635	39.0	730	44.8	83.8	633	36.8	860	49.9	86.7
	J316	847	39.1	964	44.5	83.6	849	37.0	1,147	49.9	86.9
	J320	1,067	39.3	1,225	45.1	84.4	1,062	37.0	1,451	50.5	87.5

Anexo II. Informações técnicas do motor J320.

Fonte. Jenbacher, 2017.

Jenbacher Type 4	J412				
Electrical Output (kW)	889				
Energy Input (kW)	2116				
NOx	500				
Thermal Efficiency	42.6%				
Electrical Efficiency	42.0%				
Total Efficiency	84.7%				
		<b>Configuration</b>	V 70°		
		<b>Bore (mm)</b>	145		
		<b>Stroke (mm)</b>	185		
		<b>Displacement / cylinder (lit)</b>	3.06		
		<b>Speed (rpm)</b>	1,200 / 1,800 (60 Hz) 1,500 (50 Hz)		
		<b>Mean piston speed (m/s)</b>	7.4 (1,200 rpm) 9.3 (1,500 rpm)		
		<b>Scope of supply</b>	Generator set, cogeneration system, generator set / cogeneration in container		
		<b>Applicable gas types</b>	Natural gas, flare gas, biogas, landfill gas sewage gas. Special gases (e.g., coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)		
		<b>Engine type</b>	J412	J416	J420
		<b>No. of cylinders</b>	12	16	20
		<b>Total displacement (lit)</b>	36.7	48.9	61.1

### Outputs and efficiencies

NOx <	Type	1,500 rpm   50 Hz					1,800 rpm   60 Hz				
		Pel (kW) <sup>1</sup>	$\eta_{el}$ (%) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>2</sup>	$\eta_{th}$ (%) <sup>2</sup>	$\eta_{tot}$ (%)	Pel (kW) <sup>1</sup>	$\eta_{el}$ (%) <sup>1</sup>	Pth (kW) <sup>2</sup>	$\eta_{th}$ (%) <sup>2</sup>	$\eta_{tot}$ (%)
500 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	J412	746	41.8	779	43.6	85.4					
	J412	901	42.3	912	42.8	85.0	850	40.2	956	45.2	85.3
	J416	999	42.2	1,029	43.4	85.6					
	J416	1,203	42.5	1,214	42.8	85.3	1,141	40.4	1,274	45.1	85.6
	J420	1,500	42.4	1,515	42.8	85.2	1,426	40.4	1,594	45.2	85.6
250 mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	J412	889	41.6	918	43.0	84.6	850	39.3	989	45.7	84.9
	J416	1,191	41.8	1,223	42.9	84.8	1,141	39.5	1,319	45.7	85.2
	J420	1,487	41.8	1,529	43.0	84.7	1,426	39.5	1,648	45.7	85.2

Anexo III. Informações técnicas do motor J412.

Fonte. Jenbacher, 2017.