

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

LARISSA BRITO PINHO

ESTUDO SOBRE A COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

LARISSA BRITO PINHO

ESTUDO DA COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dra. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Larissa Brito Pinho

Estudo da cogeração de energia a partir do biogás

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30 hs do dia 10/03/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto -
Presidente (Orientador)

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - (Membro)

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio -
(Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

PINHO, Larissa Brito. **ESTUDO DA COGERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS** 2019. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Um problema muito importante que a sociedade enfrenta é o acelerado aumento na produção de resíduos sólidos (lixo) e o conseqüente uso de lixões nos grandes centros urbanos, o que acarreta problemas de saúde e ambientais. Diante disso, este trabalho explora a obtenção de energia elétrica utilizando como fonte os gases provenientes dos resíduos sólidos. É apresentado a forma de obtenção dos gases, da geração da energia elétrica a a partir desta fonte e as vantagens e desvantagens de se produzir energia elétrica desta forma.

Palavras-chave: Cogeração, Biogás, Resíduos Sólidos e Aterros Sanitários.

ABSTRACT

BRITO PINHO, Larissa. **STUDY OF ENERGY COGERATION FROM BIOGÁS** 2019. 84f. Course Completion Work (Undergraduate) - Software Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

A very important problem facing is the accelerated increase in the production of solid waste and the consequence use of landfills in large urban centers, which causes health and environmental problems. Therefore, this work explores the obtaining of electric energy using as source the gases coming from solid waste. It presents the way to obtain the gases, the generation of electric energy from this source and the advantages and disadvantages of producing electricity in this way.

Keywords: Cogeneration, Biogas, Solid Waste and Sanitary landfills.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Teresa Faustino e Pedro Luis Pinho, e a minha irmã Letícia Pinho, que nunca me deixaram desistir dos meus sonhos, sempre me apoiaram em todos os momentos da minha vida e fizeram de tudo para que eu chegasse até aqui.

A Deus, por me manter sempre firme na direção certa e pelas bênçãos conquistadas até agora.

*“Na Roma Negra à beira mar, César é cego de um olho.
Me dê motivos para sonhar que eu te devolvo em dobro.”
(Pitty)*

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a Gabriela Helena Bauab Shiguemoto, pelos ensinamentos, esclarecimentos e sugestões.

Aos meus amigos que compartilharam comigo esses anos na UTFPR com quem tive a oportunidade de trocar experiências, momentos felizes e de superação.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Matriz Energética Brasileira em 2016.....	6
Gráfico 2 – Geração de RSU no Brasil.....	10
Gráfico 3 – Variação da umidade relativa ao longo de um dia típico.....	33
Gráfico 4 – Variação da vazão do biogás.....	34
Gráfico 5 – Fases da geração do biogás em aterros sanitários.....	38
Gráfico 6 - Taxa de recuperação do biogás ao longo de 15 anos.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de municípios por tipo de disposição final adotada.....	11
Tabela 2 - Composição do biogás gerado nos aterros.....	12
Tabela 3 - Comparação entre a cogeração tradicional e da cogeração moderna.....	15
Tabela 4 - Composição do biogás.....	30
Tabela 5 - Matérias primas que geram o biogás.....	31
Tabela 6 - Poder calorífico de alguns combustíveis.....	32
Tabela 7 - Comparação entre o biogás e outras fontes energéticas.....	32
Tabela 8 – Produção do metano (%) sob influência da área da geomembrana.....	37
Tabela 9 – Custos de implantação dos componentes de uma usina.....	45
Tabela 10 – Matriz energética brasileira a partir do biogás gerado em aterros...	46
Tabela 11 – Custo para implantação de uma usina.....	66
Tabela 12 – Taxa da recuperação do biogás.....	67
Tabela 13 – Leilões de créditos de carbono do Aterro Bandeirante.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos resíduos sólidos.....	13
Figura 2 - Cogeração com produção de energia simultânea.....	16
Figura 3 – Produção de energia separadamente.....	17
Figura 4 – Faixas de temperaturas para os dois tipos de cogeração.....	18
Figura 5 – Cogeração tipo topping.....	18
Figura 6 – Cogeração tipo bottoming.....	19
Figura 7 – Turbina a gás, Alisson 601 – KB9 de 6,5MW.....	20
Figura 8 – Geração combinada de calor e eletricidade.....	21
Figura 9 – Geração combinada.....	22
Figura 10 – Geração combinada.....	23
Figura 11 – Lixão e poluição do solo.....	25
Figura 12 – Aterro controlado e poluição do solo.....	26
Figura 13 – Vista da escavação do dreno vertical.....	36
Figura 14 – Geomembrana no dreno vertical.....	37
Figura 15 – Camada de impermeabilização na base do cabeçote.....	38
Figura 16 – Vista de instalação da manta geotêxtil.....	39
Figura 17 - Vista de instalação da manta PEAD.....	39
Figura 18 – Instalação do cabeçote no Aterro Sanitário.....	40
Figura 19 – Implantação de tubulações para condução de biogás.....	41
Figura 20a- Queimador flare tipo aberto.....	43
Figura 20b- Queimador flare tipo fechado	43
Figura 21 – Sistema de armazenamento do biogás (gasômetro)	46
Figura 22 – Sistema típico de cogeração.....	47
Figura 23 – Esquema simplificado da máquina de Otto.....	49
Figura 24- Válvula de admissão aberta. 1º Fase.....	49
Figura 25 – Válvula de admissão aberta. 2º Fase.....	50
Figura 26 – 3º Fase.....	51
Figura 27 – Fase: Expansão.....	51
Figura 28 – 5º Fase: Descarga.....	51
Figura 29 – Sistema de cogeração com microturbinas a gás.....	54
Figura 30 – Esquemático de um microturbina a gás.....	55
Figura 31 – Diagrama esquemático de uma microturbina a gás.....	56
Figura 32 – Esquema do ciclo de Rankine.....	59
Figura 33 - Sistema de iluminação a gás.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
1.1	Matriz Energética do Brasil.....	5
1.2	Problema.....	6
1.2.1	OBJETIVOS.....	9
1.2.2	Objetivo geral.....	9
1.2.3	Objetivos específicos.....	9
2	RESÍDUOS SÓLIDOS	10
2.1	Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	12
2.2	Lixão.....	14
2.3	Aterro controlado.....	15
2.4	Aterro Sanitário.....	16
3	COGERAÇÃO.....	18
3.1	Tecnologias de Cogeração.....	20
3.2	Turbinas a Gás.....	22
4	BIOGÁS.....	27
4.1	Poder Calorífico.....	29
4.2	Fatores que Influenciam na Produção do Biogás.....	30
4.3	Fases da Produção do Biogás.....	32
5	COMPONENTES NECESSÁRIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE BIOGÁS.....	34
5.1	Drenos Verticais.....	34
5.2	Cabeçote.....	36
5.3	Tubulações de Condução.....	38
5.4	Exaustores.....	39
5.5	Unidade de Tratamento.....	40
5.6	Sensores/Monitoramento.....	40
5.7	Queimadores (Sistemas Flare)	41
5.8	Gasômetro.....	42
5.9	Custos dos equipamentos necessários ao funcionamento de uma usina.....	43
6	TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA E TÉRMICA DO BIOGÁS.....	44
6.1	Motores de Combustão Interna.....	45
6.2	Funcionamento do Ciclo de Otto.....	46
6.2.1	Admissão.....	46
6.2.2	Compressão.....	47

6.2.3	Explosão.....	47
6.2.4	Expansão.....	48
6.2.5	Descarga.....	48
6.2.6	Vantagens na utilização do motor ciclo de Otto.....	49
6.2.7	Desvantagens.....	49
6.2.8	Exemplo de aplicabilidade.....	49
6.2.9	Ordem da grandeza de investimentos.....	50
7	MICRO TURBINAS A GÁS.....	51
7.1	Princípio de Funcionamento.....	52
7.1.2	Vantagens na utilização da microturbina.....	54
7.1.3	Desvantagens.....	54
7.1.4	Exemplos de aplicabilidade.....	55
8	TURBINAS A VAPOR.....	56
8.1	Princípio de Funcionamento do Ciclo de Rankine.....	56
8.2	Vantagens na Utilização da Turbina à Gás.....	57
8.3	Desvantagens.....	57
9	ILUMINAÇÃO A GÁS.....	58
9.1	Vantagens de Usar a Iluminação à Gás.....	58
9.2	Desvantanges.....	58
9.3	Exemplos de Aplicabilidade.....	59
9.4	Grandeza dos Investimentos.....	59
10	VIABILIDADE ECONÔMICA PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS.....	60
10.1	Créditos de Carbono.....	65
11	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Matriz Energética do Brasil

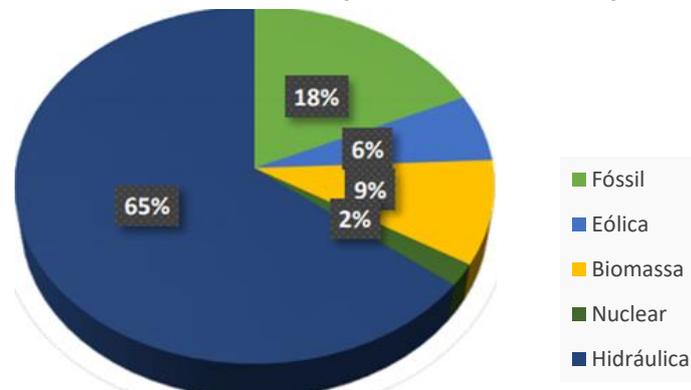
A partir da Revolução Industrial, o desenvolvimento de um país passou a ser impactado diretamente pela produção de energia, com isso sua produção ganhou prioridade para o crescimento industrial. Para manter o desenvolvimento econômico de um país observa-se cada vez mais o aumento da demanda energética. É necessário desenvolver tecnologias para utilização de novas fontes energéticas, as chamadas fontes alternativas de energia (ELETROBRAS, 2014). A oferta interna de energia, também conhecida como matriz energética, é a quantidade de energia disponibilizada para posterior transformação, incluindo as perdas na distribuição (BEN,2016). As fontes renováveis têm participação na esfera brasileira bem acima da média mundial. Atualmente a participação das energias renováveis no Brasil representa 43,8%, enquanto que a matriz mundial de fontes renováveis representa apenas 13%.

A matriz energética do Brasil é composta por: Biomassa (bagaço de cana, lenha, lixo, biocombustíveis), hidráulica que é a maior fonte de produção de energia elétrica no Brasil, derivados de petróleo, carvão mineral e derivados, gás natural, energia nuclear, energia eólica e outras, que pode incluir a energia solar.

Segundo dados da Secretaria de Energia e Mineração, atualmente a matriz energética se divide, em porcentagem, de acordo com o Gráfico 1

Gráfico 1 – Matriz energética brasileira em 2018.

Matriz Energética Brasileira 2018 (dados de 2017)



Fonte: Adaptado de Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (2018)

As fontes alternativas de energia vêm para diminuir a responsabilidade ambiental do maior potencial de geração da atualidade. A inundação de áreas para a construção de barragens gera problemas de realocação das populações ribeirinhas, comunidades indígenas e pequenos agricultores. Os principais impactos ambientais ocasionados pelo represamento da água para a formação de imensos lagos artificiais são: destruição de extensas áreas de vegetação natural, matas ciliares, o desmoronamento das margens, o assoreamento do leito dos rios, prejuízos à fauna e à flora locais, alterações no regime hidráulico dos rios, possibilidades da transmissão de doenças, como esquistossomose e malária, extinção de algumas espécies de peixes. (Ambiente e Energia, 2016).

1.2 Problema

No Brasil, água e energia têm uma histórica interdependência. A contribuição da energia hidráulica ao desenvolvimento econômico do País tem sido expressiva, seja no atendimento das diversas demandas da economia – atividades industriais, agrícolas, comerciais e de serviços – ou da própria sociedade, seja na melhoria do conforto das habitações e da qualidade de vida das pessoas. Também

desempenha papel importante na integração e no desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais. (ANEEL, 2015).

Para a construção de uma usina hidrelétrica e a construção das barragens, é necessário o alagamento de grandes áreas. Essa construção acaba acarretando problemas a fauna e flora local, tais como: destruição da vegetação natural, desmoronamento de barreiras, extinção de espécies de peixes além dos impactos sociais observa-se também os impactos sociais, que são visíveis com o deslocamento das populações ribeirinhas e indígenas, que são obrigadas a se deslocarem de suas casas devido aos alagamentos causados com a construção dos lagos artificiais. E como são construídas distantes dos centros de consumo, o processo de transmissão de energia acaba sendo mais caro.

Quando o nível de chuvas é menor que o esperado, as hidrelétricas ficam com os níveis de água bem abaixo do requisitado para a geração normal de energia, com isso, a produção é transferida para as usinas termelétricas e nucleares, o que torna a conta do consumidor mais cara no final.

Diante disso é necessário a exploração de novas fontes de energias renováveis que possam ter uma produção contínua e, que muitas vezes acabam sendo desperdiçadas, quando na verdade poderiam estar gerando energia elétrica para o próprio consumo ou até mesmo vender o excedente para uma concessionária de energia.

A crescente demanda de energia, a elevação do preço dos combustíveis, a poluição ambiental, o fato de o petróleo ser um combustível não renovável e o aumento do desenvolvimento econômico vêm estimulando pesquisas para se descobrir fontes de energia renováveis.

Além disso, outro problema muito importante que a sociedade enfrenta é o acelerado aumento na produção de resíduos sólidos (lixo) e o conseqüente uso de lixões nos grandes centros urbanos, o que acarreta problemas de saúde e ambientais.

Esses problemas de demanda de energia e do crescimento de aterros na produção de lixo podem ter como uma possível solução uma única fonte: o biogás. (Revint,2017).

Com o modelo atual de geração de energia elétrica, o país se torna dependente de chuvas, se houver um período de estiagem, é possível que haja uma crise energética. Isso aponta para investimentos a longo prazo para o desenvolvimento de tecnologia para geração, buscando outras possibilidades de fontes renováveis.

A população mundial está em pleno crescimento, com o destino correto para os resíduos sólidos urbanos e com níveis de reciclagem ideais, em um contexto mundial, as utilizações corretas de tais estruturas podem proporcionar avanços consideráveis para a população mundial e tornar o convívio mais eficiente de uma forma geral (United States Census, 2015).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil a geração de resíduos urbanos (RSU) no Brasil em 2016 foi de 78 milhões de toneladas. O brasileiro produziu, em 2016, 1,071kg de lixo por dia. De todo o resíduo coletado no país, o estudo apontou que mais de 81 mil toneladas de resíduos sólidos por dia tem destinação inadequada, sendo enviados para aterros controlados ou lixões, evidenciando uma queda na destinação adequada de 58,7% para 58,4%.

Há três formas de disposição final dos resíduos sólidos, que são, lixões, aterros controlados e aterros sanitários. O aterro sanitário é a forma adequada de disposição final dos resíduos sólidos, visto que atende à norma ambiental, de modo a evitar danos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais.

Segundo Johanneson (2016), para cada tonelada de resíduo sólido disposto em aterros sanitários, são gerados em média 200m³ de biogás.

A utilização do biogás apresenta efeitos positivos visto que os aterros sanitários e lixões são responsáveis por emissões de gás metano (CH_4) na atmosfera, este gás é 20 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono CO_2 e um dos grandes contribuintes para o efeito estufa (IMBELLONI). É uma matéria – prima de fácil obtenção, ajuda a evitar os lixões e diminuir a rejeição com os aterros, que passariam a ser gerenciados de forma correta. A conversão energética possibilita a recuperação

do capital e incrementa a viabilidade econômica da planta. A geração de energia pode proporcionar créditos e receitas extras para as prefeituras, advindas da comercialização de energia.

Desta forma, este trabalho busca realizar um estudo sobre as tecnologias para geração de energia elétrica utilizando o biogás, buscando uma forma de aliviar as cargas ligadas ao sistema, que possuem projeção de aumento de 5,1% até 2030, além de tratar o lixo descartado pela população.

1.2.1 Objetivos

Os objetivos gerais e específicos são mostrados nas seções abaixo, especificando o que se espera alcançar através dessa proposta de conclusão de curso.

1.2.2 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo sobre a geração de energia elétrica através do biogás, analisar essa geração em aterros sanitários e as tecnologias usadas para converter o biogás em energia elétrica.

1.2.3 Objetivos específicos

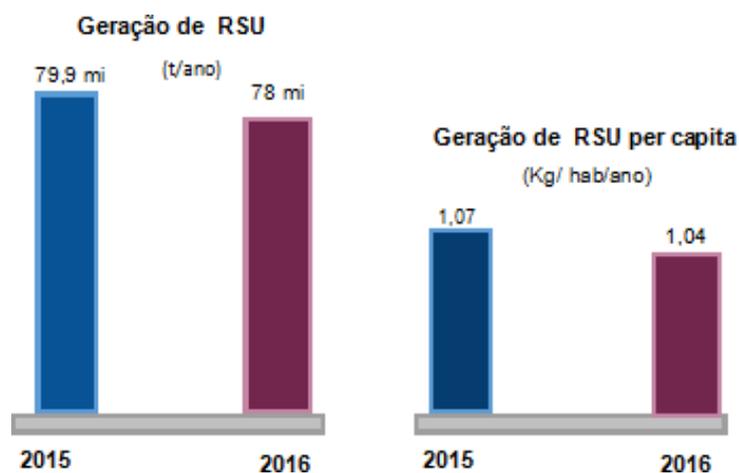
- Realizar um estudo sobre a viabilidade da cogeração de energia elétrica através do biogás;
- Analisar quais tecnologias e configurações de cogeração disponíveis para esta aplicação;
- Análise da viabilidade técnico do ponto de vista comercial;

2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Com aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamento de grandes centros urbanos, surge um grande desafio para os gestores públicos: gerenciar grandes quantidades e volumes de resíduos sólidos urbanos (RSU). Esses resíduos acumulados no meio ambiente de forma desordenada, causam graves problemas de poluição

O Gráfico 2 mostra a produção de RSU de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), nos anos de 2015 e 2016.

Gráfico 2 - Geração de RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2016) /autoria própria.

O dado do Gráfico 2 seria animador se toda a gestão de coleta, destinação e recursos aplicados no seguimento de limpeza também tivessem progredido.

Nas grandes cidades, há uma pressão da sociedade contra a instalação de aterros próximos a áreas residenciais. Com isso torna-se difícil encontrar locais próximos para a destinação de resíduos sólidos urbanos. Nem todo resíduo sólido urbano gerado é coletado pelos serviços de limpeza. Assim, boa parte dos resíduos gerados são descartados de forma incorreta, como terrenos baldios, praças públicas, praias, ruas, rios, desencadeando a proliferação de vetores de doenças, contaminação da água, entupimento de bueiros entre outros problemas de saúde pública.

A Tabela 1 mostra as unidades de destinação final dos resíduos sólidos coletados, por região, segundo dados obtidos no panorama de resíduos sólidos no Brasil (ABRELPE).

Tabela 1 – Quantidade de municípios por tipo de disposição final adotada.

Regiões do Brasil - Ano 2015							
Disposição Final	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil	Brasil 2016
Aterro Sanitário	97	456	165	820	706	2.244	2.239
Aterro Controlado	110	504	148	646	366	1.774	1.772
Lixão	243	834	154	202	119	1.552	1.559
Brasil	450	1.794	467	1.668	1.191	5.570	5.570

Fonte: ABRELPE (2016) / autoria própria.

Os dados do Panorama não revelam somente uma queda nos números de aterros sanitários de um ano para o outro, mas indicam que o tema “gestão de resíduos” ainda não está maduro em nossa sociedade, principalmente junto as prefeituras que, apesar de estarem vinculadas à Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que é uma lei bastante moderna e vigente há 7 anos que contem instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos ainda não cumpriram com as suas responsabilidades, principalmente no tocante à destinação final adequada, e ante um cenário de retração econômica, os governantes sacrificam as ações em curso, os investimentos e empregos, mesmo que isso traga prejuízos maiores no futuro e prejudique a saúde das pessoas. (SILVA, ALVES,CAVALCANTE,PEREIRA, 2013).

Pelos dados obtidos da Tabela 1 pode-se observar que na região Norte e Nordeste a existência de lixões é bastante acentuada do total de métodos de disposição final. Os lixões representam 54% no Norte e 46% no Nordeste e o Centro-Oeste vem logo atrás com 33%. Levando em conta que apenas o aterro sanitário é considerado uma forma adequada de disposição final do lixo, o cenário no Brasil como um todo é bastante preocupante, pois ainda existem muitos aterros controlados. Com isso, dentre os vários impactos causados no meio ambiente, pode-se citar continua produção do biogás, gerado pela decomposição anaeróbica dos materiais orgânicos. O biogás é altamente combustível e por isso é necessário que esse gás seja continuamente drenado para evitar explosões nesses locais. No Brasil, a maioria dos aterros utilizam o sistema de drenos abertos. Nesses drenos, há uma chama que vai queimando o biogás conforme ele vai sendo drenado. Esse método é ineficiente pois

apenas 20% do biogás é queimando e o resto é liberado para a atmosfera. A tabela 2 apresenta a composição do Biogás gerado nos aterros.

Tabela 2 – Composição do Biogás gerado nos aterros.

COMPONENTES	QUANTIDADE	OBSERVAÇÕES
Metano (CH ₄)	60%	Potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o CO ₂
Dióxido de Carbono (CO ₂)	35%	Gás causador do efeito estufa.
Outros Gases	5%	Ácido Sulfídrico - Mau odor e chuva ácida.

Fonte: Autoria própria.

O metano possui um elevado potencial energético que quando reage com o oxigênio, libera grande quantidade de calor biogás possui poder calorífico na faixa de 5000 e 7000 kcal/Nm³, se for considerado 45 a 80% para a concentração do metano. O biogás possui fácil combustão, por isso nos locais que ele é gerado, sempre existe o risco de explosão, com isso é de suma importância mitigar os impactos que esse gás pode causar e para isso, é possível realizar a captação forçada do biogás gerado no interior dos aterros para aproveitá-lo como uma fonte renovável e disponível de energia.

2.1 Caracterização dos Resíduos Sólidos Urbanos

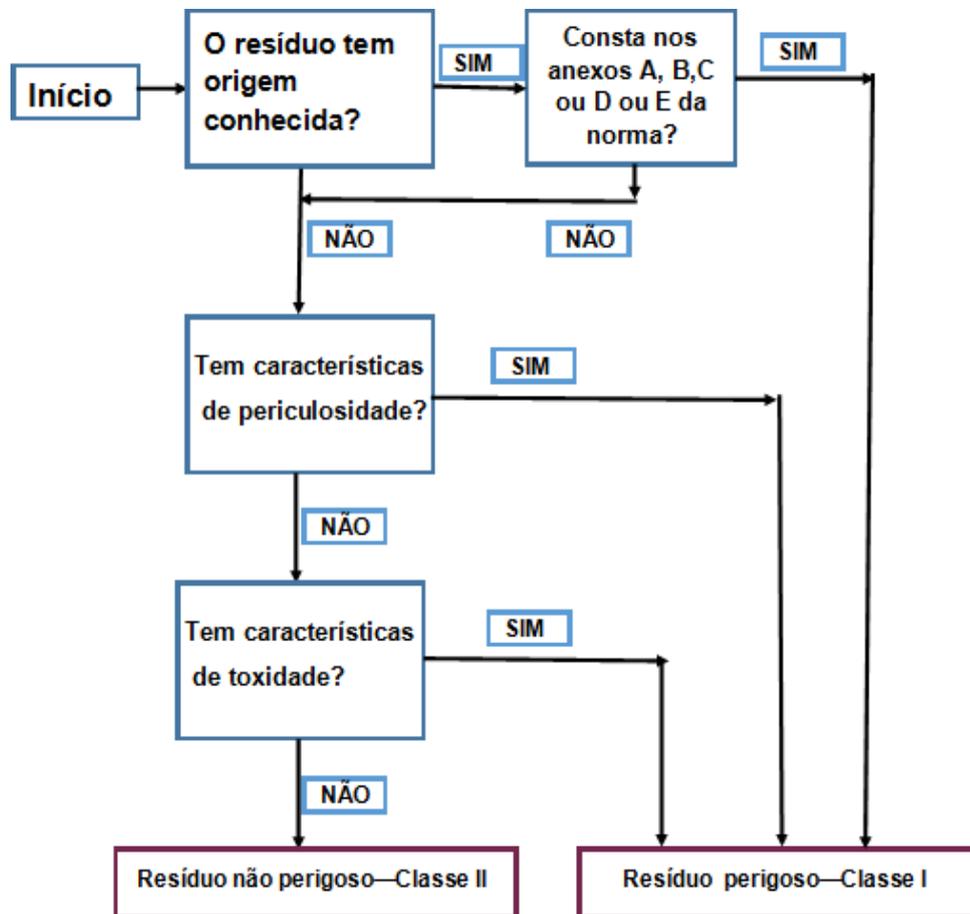
Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2004), os resíduos sólidos são resíduos nos estados sólidos ou semissólidos que são resultantes de atividades: industrial, hospitalar, comercial, doméstica, agrícola e serviços de varrição.

A NBR 10.004 divide os resíduos sólidos em classes de acordo com sua periculosidade, e eles podem ser agrupados conforme abaixo:

- Classe I – Perigosos
- Classe II – Não perigosos
- Classe II A – Não inertes.
- Classe II B – Inertes.

A classificação dos resíduos sólidos pode ser realizada de acordo com a Figura 1

Figura 1 – Classificação dos resíduos sólidos.



Fonte: ABNT 2014/autoria própria.

Resíduos Classe I – Perigosos são aqueles que podem apresentar riscos à saúde da população ou ao meio ambiente, quando sua disposição for feita de forma inadequada. Esses resíduos possuem uma das características abaixo:

- Toxicidade;
- Patogenicidade;
- Corrosividade;
- Inflamabilidade;
- Reatividade;

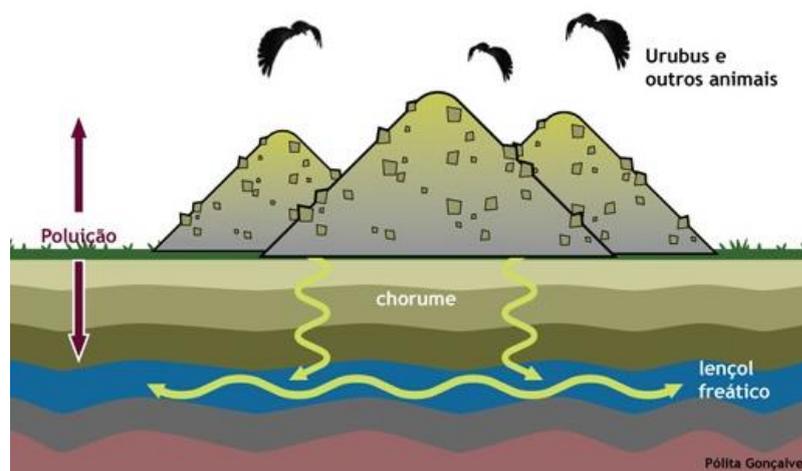
Resíduos Classe II A – Não inertes, possuem características tais como: solubilidade em água, biodegradabilidade, combustibilidade, alguns exemplos desse tipo de resíduos são sucata de metais ferrosos, plásticos polimerizados, comida.

Resíduos Classe II B – São resíduos sólidos que não apresentam risco ao ser humano e ao meio ambiente. Exemplos: madeiras, tijolos, resíduos de entulho, rochas.

2.2 Lixão

O lixão ou vazadouro, consiste no modo mais inadequado de disposição final, onde os resíduos são depositados a céu aberto, sem nenhuma medida de proteção ambiental e de saúde pública. A proliferação de vetores de doença e a emissão de poluentes gasosos e líquidos são frequentes, resultante da decomposição dos diferentes materiais que contaminam o ar, o solo e os lençóis freáticos (REIS; FADIGAS; CARVALHO, 2012).

Figura 11 – Lixão e poluição do solo.



Fonte: Lixo (2010)

Em um lixão não há tratamento prévio do solo e nem um sistema de tratamento ao chorume, que é o grande causador da poluição no solo. Entre os vários prejuízos ao meio ambiente causado por essa prática, pode-se citar:

- A) Poluição dos solos: O chorume altera as características físico-químicas do solo, tornando-o indisponível para outros usos;

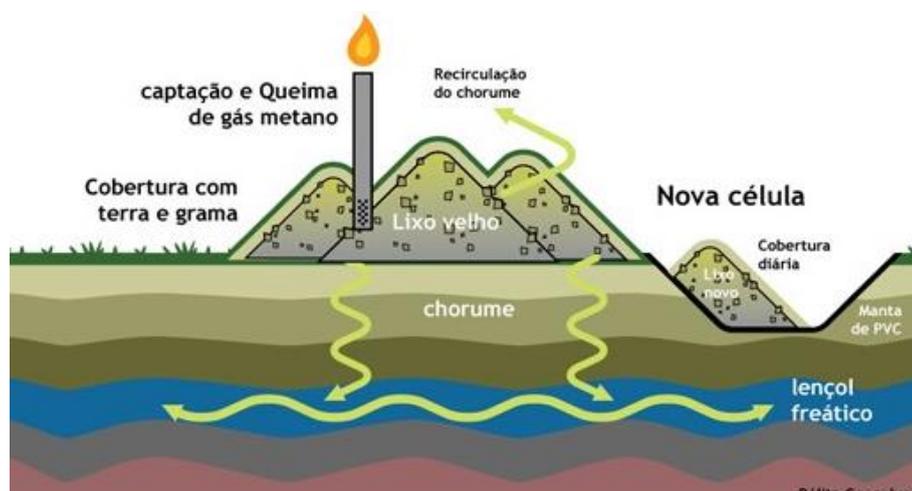
- B) Poluição do Ar: Com a decomposição dos resíduos, ocorre a formação dos gases, como o dióxido de carbono, metano e ácido sulfídrico, ocasionando poluição na atmosfera, explosões, risco à saúde das pessoas, etc.
- C) Poluição Visual: O lixo espalhado desordenadamente, descartado de maneira incorreta, gera um impacto visual na população;
- D) Poluição das águas: O chorume, ao percorrer o solo, acaba poluindo os mananciais de água subterrâneas

Segundo o relatório da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2018), O Brasil ainda possui cerca de 3 mil lixões funcionando em 1.600 cidades. Por lei, todos os lixões deveriam ter sido fechados até 2014, segundo a Abrelpe o prazo já venceu à 4 anos. Segundo Carlos Silva Filho, presidente da Abrelpe, o país gasta cerca de 3 bilhões por ano com tratamento de saúde de pessoas que ficaram doentes por causa da contaminação provocada pelos lixões.

2.3 Aterro Controlado

Aterro controlado é a fase intermediária entre o lixão e o aterro sanitário. O resíduo é coberto por uma camada de argila e grama. Essa cobertura é realizada diariamente, Além disso, é realizada a recirculação do chorume, afim de diminuir sua absorção pela terra. Porém, essas são medidas de contenção, pois não há impermeabilização nem sistema de tratamento do chorume, e não é possível evitar a contaminação do solo. (MONTAGNA,2016)

Figura 12 – Aterro controlado e poluição do solo.



Fonte: Lixo (2010)

2.4 Aterro Sanitário

De acordo com a norma da ABNT NBR 8.419/1992, o aterro sanitário é definido como: técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à 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 necessário.

A Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1984) trás algumas restrições para a instalação de aterros sanitários, tais como:

- O solo deve ser argiloso;
- Deve existir um monitoramento para verificar se estão ocorrendo contaminações ao lençol freático;
- A arborização deve se adequada para retenção de odores;
- O aterro não pode ser construído em áreas passíveis de inundação;
- O aterro deve ter uma distância mínima de 200 metro de qualquer curso de água;

Para a operação de um aterro, deve ser realizado previamente um estudo da área, uso futuro da área, elementos do projeto, monitoramento e operação [MONTAGNA, 2016].

Estudo da área:

Inicialmente realiza-se um levantamento dos dados do meio físico e biótico. Para a escolha da área são considerados critérios econômicos, sociais, políticos e técnicos.

Os critérios econômicos referem-se a custos com a aquisição e manutenção do aterro, os critérios sociais e políticos versam sobre aceitação da população para a construção do aterro e os técnicos são impostos pela ABNT 10.157

Elementos do projeto:

O projeto de um aterro sanitário deve ter um sistema de impermeabilização e elementos de captação e armazenamento do biogás.

Sistema de drenagem do chorume:

A drenagem do chorume pode ser realizada por uma rede de drenos verticais composta de tubos perfurados e preenchidos com brita, levando o lixiviado drenado para um sistema de tratamento.

Sistema de drenagem dos gases:

O objetivo desse sistema é evitar que os gases escapem do subsolo e atinjam edificações, fossas e esgotos.

Cobertura intermediária e final:

O sistema de cobertura diário (intermediário e final) tem por finalidade eliminar a proliferação de vetores, reduzir a formação de lixiviados, diminuir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás. A cobertura diária é feita no final do período de trabalho. Já a cobertura intermediária é realizada nos locais onde a superfície de disposição ficará inativa por mais tempo, e a cobertura final tem a intenção de impedir a infiltração de águas pluviais (MONTAGNA, 2016).

3 COGERAÇÃO

Segundo o Dicionário de Terminologia Energética (2001), do Conselho Mundial de Energia, o conceito de cogeração significa a produção simultânea e sequencial de duas ou mais utilidades – calor de processo e potência mecânica e (ou) elétrica, a partir da energia disponibilizada por um ou mais combustíveis.

A cogeração de energia é a produção simultânea de duas formas de energia, elétrica e térmica, a partir de um insumo energético. É um processo de conversão de energia no qual se disponibiliza calor e trabalho mecânico, convertido em eletricidade por meio do uso de um gerador, a partir da combustão energia química (SOUZA, ROMERO 2015).

Até a década de 40, mais ou menos, a cogeração de energia era um processo bastante comum, pois não haviam grandes centrais hidroelétricas ou outras fontes centralizadas de geração de energia. Portanto o próprio consumidor procurava ter sua fonte geradora de energia. Com o tempo e a evolução das técnicas de geração centralizada de energia, a cogeração foi perdendo espaço e passou a ser uma exceção.

Entretanto, com a atual instabilidade dos sistemas de abastecimento de energia e a evolução dos sistemas que possibilitam este tipo de geração de forma mais simples, segura e barata, a cogeração passa a ser um atrativo principalmente para as indústrias por aliar economia e benefícios ambientais. (FARIAS, 2016). Esse processo busca a maximização dos rendimentos da produção de energia. Em um processo termoelétrico, a maior parte da energia é perdida com a cogeração, há o aproveitamento dessa energia, que seria perdida na forma de calor e aumenta a eficiência do ciclo térmico. Existem duas eras da cogeração de energia elétrica, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre a cogeração tradicional e da cogeração moderna.

Características	Cogeração Tradicional	Cogeração Moderna
Motivação Básica	Auto-suficiência de energia elétrica	Redução de emissões
Equipamento de geração predominante	Turbinas a Vapor	Turbinas a gás e ciclos combinado
Combustíveis empregados	Residuais (bagaço, cascas)	Todos
Relação com a concessionária	Operação independente	Operação interligada

Fonte: Autoria própria.

Para um processo industrial de produção, em que exista a demanda simultânea

de energia térmica e energia mecânica, a aplicação da cogeração é uma alternativa, com a vantagem do uso racional de combustível.

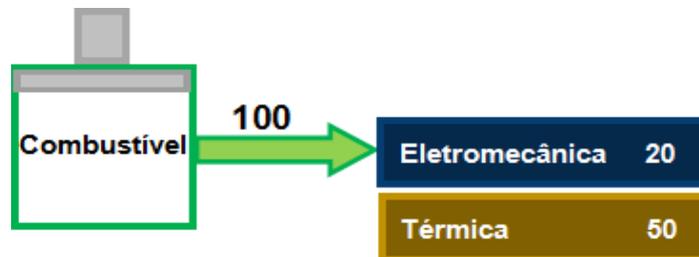
Em um sistema de cogeração, com a produção simultânea de energia térmica e energia eletromecânica, segundo (CARVALHO,2016) é possível a redução de 16% no consumo de combustível se comparado com a produção convencional, onde a produção da energia térmica e eletromecânica são feitas separadamente.

A Figura 2 representa uma central de cogeração em que é utilizado cem unidades de um combustível (C_1) que resulta em 20 unidades de energia eletromecânica (E_m) e 50 unidades de energia térmica (E_t), neste caso a eficiência do sistema vai ser dado pela equação 1.

$$n = \frac{E_m + E_t}{C_1} \quad (1)$$

Que resultado em uma eficiência de 70%.

Figura 2 – Cogeração, com produção de energia simultaneamente.

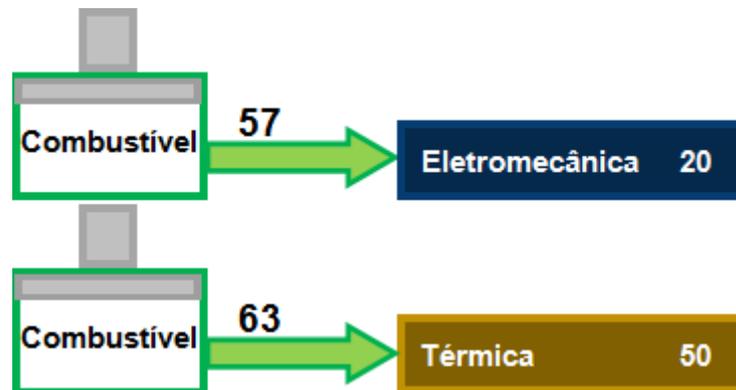


Fonte: COGEN Europe (2001). Adaptado.

Comparando-se com a forma de produção convencional em separado, produzindo as mesmas quantidades dessas energias, seria necessária uma maior quantidade de combustível, gerando maiores custos e uma eficiência inferior. Para gerar 20 unidades de energia eletromecânica são necessárias 57 unidades de combustível e para gerar 50 unidades de energia térmica são necessárias 63 unidades de combustível e a eficiência do sistema pode ser observada na equação 2.

$$n = \frac{20 + 50}{120} = 58\% \quad (2)$$

Figura 3 – Produção de energia separadamente.



Fonte: COGEN Europe (2001). Adaptado.

Com isso é possível comparar as duas formas de produção de energia: a cogeração apresenta maior eficiência e economiza recursos frente a geração em separado, para produzir as mesmas quantidades de energia mecânica e energia térmica.

3.1 Tecnologias de Cogeração

O consumo simultâneo de energia eletromecânica (eletricidade) e energia térmica (aquecimento de água, resfriamento de água, vapor), pode ser encontrado em todos os segmentos econômicos – residência, industrial, agricultura e comercial.

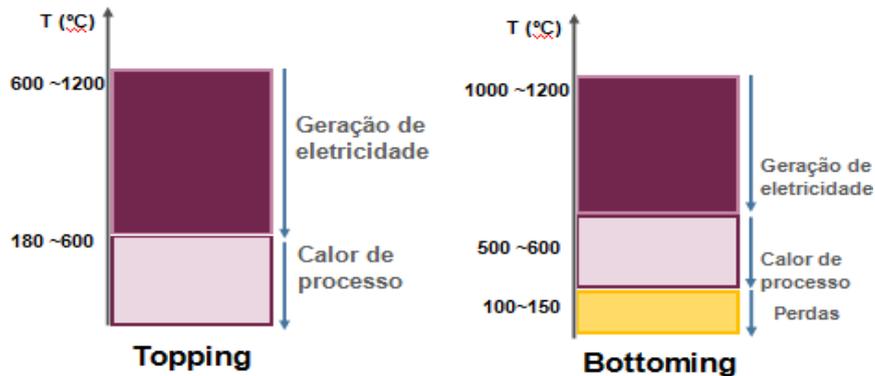
A cogeração de energia pode ser realizada de duas formas, que variam em função da sequência de geração.

Topping: Geração de energia elétrica (ou mecânica) a montante, ou seja, a produção de energia elétrica ou mecânica (altas temperaturas) precede o fornecimento de calor útil.

Bottoming: Geração de energia elétrica (ou mecânica) à jusante, ou seja, a produção de energia elétrica está situada após a demanda de energia térmica.

A figura 4 mostra os intervalos de temperatura para as duas configurações de cogeração de energia:

Figura 4 – Faixa e temperaturas para os dois tipos de configuração para a cogeração.



Fonte: COGEN Europe (2001). Adaptado.

Considerando que nas indústrias, a temperatura usual para a geração de energia elétrica varia entre 400° e 950°C e para atividades como secagem, cozimento, evaporação a temperatura varia de 120° a 200°, é natural que se pense num sistema de geração tipo topping onde o calor utilizado pelo processo industrial é aproveitado após a geração da energia elétrica. A configuração do tipo topping é a mais utilizada dentro das indústrias.

Figura 5 – Cogeração tipo Topping.



Fonte: Adaptado de NOGUEIRA (2004).

Figura 6 – Cogeração tipo Bottoming.



Fonte: Adaptado de NOGUEIRA (2004).

Os sistemas de cogeração do tipo bottoming são de utilização restrita, uma vez que o calor rejeitado pelos processos industriais se encontra em níveis de temperatura geralmente insuficientes para o seu emprego na produção de energia eletromecânica. Alguns processos industriais (siderúrgicas, fornos cerâmicos, cimenteiras, refinarias de petróleo) operam em altas temperaturas, entre 1000~1200°C. Após o processo, os gases de exaustão ainda se encontram a temperaturas elevadas (500~600°C). Ao invés de descartá-lo diretamente na atmosfera, este calor residual pode ser direcionado a um trocador de calor, para produção de vapor que alimentará uma turbina a vapor. Desta forma, a energia contida no combustível pode ser mais bem aproveitada, com o uso inicial em uma carga térmica e na sequência a produção de eletricidade num ciclo do tipo bottoming. No entanto, este tipo de cogeração apresenta, em geral, rendimentos eletromecânicos inferiores aos encontrados no tipo topping, que trabalham com temperaturas mais elevadas obtidas da queima direta de combustíveis. (NOGUEIRA,2004).

3.2 Turbinas à Gás

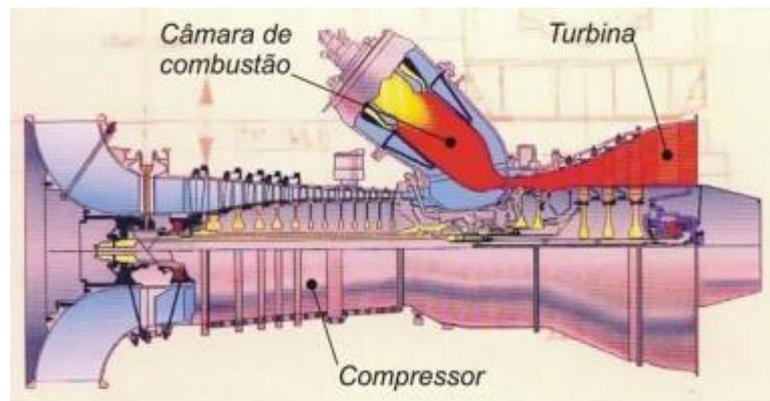
A turbina a gás é uma máquina de combustão interna, que pode usar diferentes combustíveis tanto líquidos quanto gasosos. Ela é composta pelo compressor, câmara de combustão e turbina.

O ar atmosférico é comprimido em vários estágios no compressor e posteriormente levado a câmara de combustão. Então é injetado o combustível para formar uma chama contínua, fazendo com que a temperatura e a pressão da mistura

se elevem, em seguida, há a expansão em vários estágios, convertendo a energia cinética em trabalho mecânico e fazendo girar a turbina (MOREIRA,2002).

As turbinas a gás são divididas em duas classes principais, com aplicações específicas: aero derivadas e heavy duty. As aero derivadas possuem construção compacta e rendimento superior, da ordem de 35% a 42%, encontradas com potências entre 2,5 a 50 MW. As do tipo heavy duty são turbinas que possuem propositalmente rendimentos inferiores, com a finalidade de aproveitar seus gases de exaustão a temperaturas elevadas o suficiente (~600°C) para trabalhar em ciclo combinado, ou algum processo industrial específico. São encontradas com potências superiores a 250 MW, em alguns casos. Em cogeração, a relação de produção entre eletricidade/ calor é da ordem de 0,8 a 0,5 (BARJA, 2016).

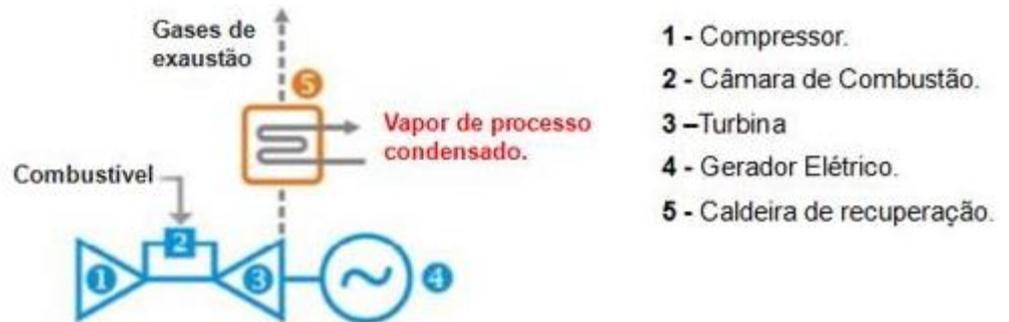
Figura 7 - Turbina a gás Allison 601-KB9, de 6,5 MW



Fonte: AZEVEDO (2006).

Na figura 8 pode-se observar a geração combinada de calor e eletricidade utilizando a turbina a gás.

Figura 8 – Geração combinada de calor e eletricidade.



Fonte: AZEVEDO adaptado (2006).

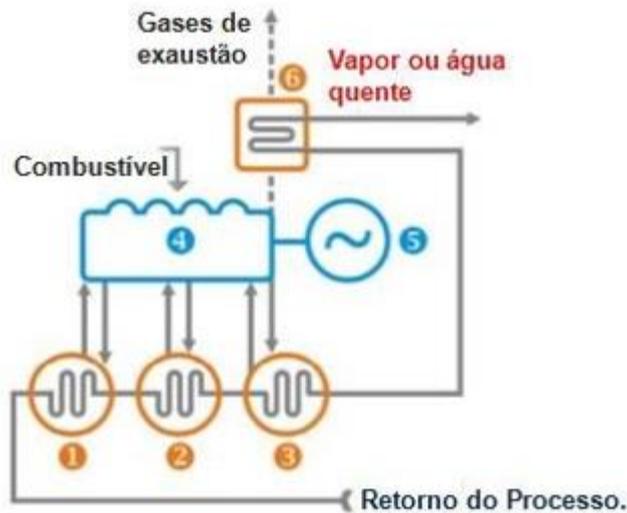
- MOTORES ALTERNATIVOS

Esses motores estão disponíveis em uma grande faixa de potência, possuem construção compacta e podem utilizar uma variedade de combustíveis líquidos e gasosos. Esses motores são bastante utilizados em hospitais, hotéis, supermercados, e sistemas de cogeração de pequeno porte, pois possuem uma elevada eficiência em ciclo simples e um bom fator de disponibilidade.

Essa máquina trabalha em ciclo aberto e usa ar como fluido. O comburente é admitido por meio de sucção que é provocada pelo deslocamento de um pistão, onde é adicionado combustível. A mistura de ar e combustível é comprimida e após isso há a conversão de energia química em energia térmica, nesse ponto a temperatura é elevada e a pressão chega a 100 atm. Com isso o pistão é forçado a sua posição final e então a pressão é transformada em trabalho mecânico (TILLMANN, 2013).

Na figura 9 observa-se a geração combinada de calor e eletricidade por meio da cogeração utilizando o motor alternativo.

Figura 9 – Geração combinada.



- 1 - Trocador de calor do óleo.
- 2 - Trocador de calor da água.
- 3 - Trocador de calor do turbo-compressor.
- 4 - Motor.
- 5 - Gerador Elétrico.
- 6 - Caldeira de Recuperação.

Fonte: AZEVEDO adaptado (2006).

- TURBINAS A VAPOR

A grande vantagem desse sistema é a possibilidade de usar qualquer tipo de combustível. Além disso, são encontradas baixas temperaturas no fluido de trabalho. Esta máquina consiste em três componentes principais: fonte de calor, turbina a vapor e sumidouro de calor.

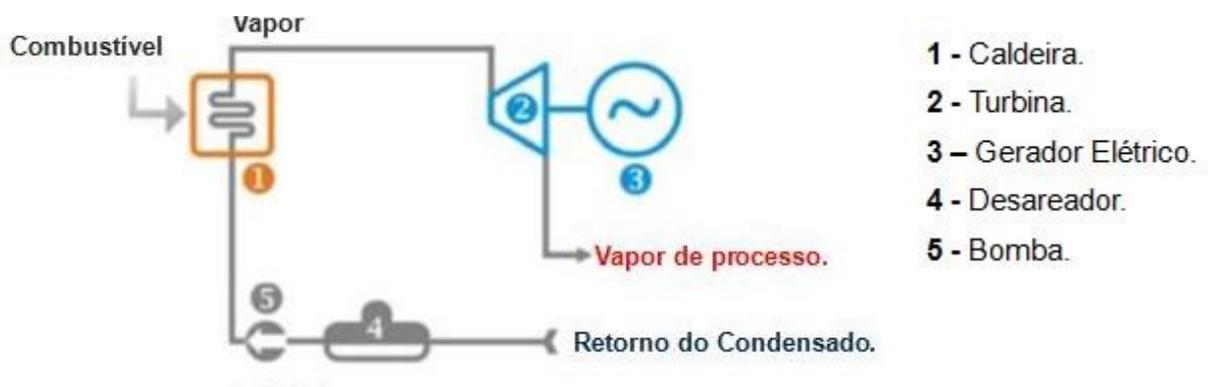
O ciclo começa com a pressurização do fluido de trabalho ou o bombeamento de água, e após isso segue para o gerador de vapor. Nele ocorre a queima do combustível e a energia térmica é liberada, que atinge temperatura acima de 500°. Em seguida, o vapor de alta pressão e temperatura é expandido na turbina, em que a energia de pressão do vapor será convertida em energia cinética (TILLMANN, 2013).

Após a saída da turbina, o vapor saturado encontra-se comumente à baixa pressão e temperatura (na maioria dos casos em condições próximas à atmosférica),

havendo a necessidade de retirada de calor para a condensação da água, que ocorre no condensador rejeitando calor ao ambiente. Este é o principal ponto onde a cogeração é agregada, no momento em que há a necessidade da rejeição de energia térmica do ciclo, que pode ser encaminhada para utilização posterior. Entretanto, o vapor de processo poderá ser extraído também de outros pontos do ciclo, como nas extrações intermediárias da turbina. Existem dois arranjos básicos de cogeração: o primeiro com a turbina em contrapressão, onde o condensador é substituído pelo próprio processo industrial; o segundo arranjo com a turbina em condensação, onde há o condensador, porém, o vapor destinado ao processo industrial é extraído em estágios intermediários da turbina, ou recuperado do condensador, e posteriormente retornado ao ciclo na forma de condensado (BRAGA, 2014).

Na figura 10 pode-se observar a geração combinada de calor e eletricidade por meio da cogeração de energia, em ciclo a vapor.

Figura 10 – Geração combinada.



Fonte: AZEVEDO adaptado (2006).

4 BIOGÁS

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2008), o biogás é definido como sendo:

“ Um tipo de mistura gasosa de dióxido de carbono e metano, semelhante ao gás natural – mas com menor poder calorífico, produzido naturalmente em meio anaeróbico pela ação de bactérias em matérias orgânicas, que são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez. Pode ser produzido artificialmente com o uso de um equipamento chamado biodigestor anaeróbico e utilizando dejetos animais como fonte”

O Biogás foi descoberto por Alessandro Volta no século 18, começou a ser produzido em larga escala em biodigestores espalhados pela Índia e China na intenção de atender as necessidades energéticas da zona rural. O biogás pode ser obtido a partir de excrementos de animais e do homem, resíduos agrícolas, a partir do lixo urbano (orgânico). Esse gás é subproduto da biodigestão e atinge entre 4% e 7% do peso da matéria orgânica inicial. É resultado da digestão anaeróbica, fermentação na ausência de oxigênio, de material presente nos dejetos de animais, resíduos vegetais, lixos orgânicos residenciais, efluentes ou lixo industrial como vinhaça, restos de abatedouros e frigoríficos, curtumes e fábrica de alimentos, lodo de esgoto, em condições adequadas de umidade, temperatura, agitação da massa, alcalinidade e PH do composto (COELHO,2006;MAZZUCCHI,1980;VITORATTO). É uma mistura de gases, a composição principal é de gás metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), em quantidades menores, é composto por nitrogênio (N_2), gás sulfídrico (H_2S) e hidrogênio (H_2), a Tabela a seguir apresenta a composição do Biogás:

Tabela 4 – Composição do biogás

GASES	QUANTIDADE (%)
Metano	50 a 75
Dióxido de Carbono	25 a 40
Nitrogênio	0,5 a 2,5
Oxigênio	0,1 a 1
Sulfeto de Nitrogênio	0,1 a 0,5
Amoníaco	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono	0 a 0,1
Hidrogênio	1 a 3

Fonte: Silva (2009).

Na tabela abaixo, são apresentadas as matérias primas que geram o biogás, quando são submetidas ao processo de biodigestão:

Tabela 5 – Materias primas que geram o biogás

Fonte de resíduo
Papel e jornais
Lixo urbano, esgoto
Soro de queijo
Capins
Resíduos de grãos
Fezes de coelho
Fezes de suínos
Sobras de comida
Resíduos de cervejaria
Resíduos de abatedouro

Fonte: AZEVEDO, 2006

Sua disponibilidade não dependerá das características de cada região e a potência energética depende apenas da composição do lixo de cada região.

De acordo com o Manual para Aproveitamento de Biogás (2009), por conter um alto teor de metano (CH_4), o biogás exerce diferentes aplicações energéticas. A principal aplicação do biogás é como combustível em motor de combustão interna que movimenta um gerador de energia elétrica, porém, pode ser direcionado para outros fins, tais como: produção de calor de processo, secagem de grãos nas propriedades rurais, queima em caldeiras, iluminação a gás, tratamento do chorume.

O biogás pode ser utilizado para vários fins. Pode ser usado para geração de energia térmica, elétrica ou para cogeração. Quando submetidos a processos de tratamento, pode ainda ser utilizado como combustível em veículos ou injetado na rede de gás como substituto ao gás natural (AEROBIOM, 2009;ICLEI,2009). O biogás também pode ser utilizado para a produção de outros produtos químicos, como: hidrogênio, a gasolina e o metanol. Segundo o Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), o biogás pode ser usado dentro da realidade do pequeno produtor rural: uso em lampiões, aquecimento de fogões, combustível.

4.1 Poder Calorífico

O poder calorífico também é conhecido como poder de queima, potência calorífica ou calor de combustão. O poder calorífico é uma das principais características de um combustível, ele representa a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa. A principal característica do biogás, que possui influência direta no desempenho de um motor, é o poder calorífico, sendo que este é função do percentual de CH₄, da temperatura e da pressão absoluta. (MACHADO, 2014).

Devido à presença do hidrogênio, quando ocorre a combustão, há a formação de água como produto dessa reação. Essa água pode estar no estado gasoso, líquido ou nas duas fases juntas. Se a água estiver no estado gasoso, o poder calorífico será menor, denominado como poder calorífico inferior; se a água estiver no estado condensado, o poder calorífico será maior, e então denominado como poder calorífico superior. Baseado nisso, o metano apresenta um poder calorífico inferior (PCI) e um poder calorífico superior (PCS) e em consequência disso, o biogás (que é uma mistura de metano e gás carbônico) também apresentará.

O poder calorífico do biogás pode chegar a 12.000 kcal/m³ se eliminar todo o gás carbônico da mistura*, conforme a Tabela 6:

Tabela 6 – Poder calorífico de alguns combustíveis

Combustível	Kcal
Biogás	12.000/m ³ *
Etanol	7.129/kg
Gasolina	7.700 /litro
Querosene	8.800/litro
Madeira	4.500/kg
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	11.000/kg

Fonte: AZEVEDO, 2008

A Tabela 7 apresenta comparações entre o biogás e diferentes fontes energéticas:

Tabela 7 – Comparação entre biogás e outras fontes energéticas

1m³ de Biogás equivale energeticamente a:
0,40 kg de GLP
0,61 a 0,70 litros de gasolina
0,55 litros de óleo diesel
0,80 litros de álcool
1,25 a 1,43 kwh de energia
1,60 a 3,50 kg de lenha

Fonte: AZEVEDO, 2008

4.2 Fatores que Influenciam na Produção do Biogás

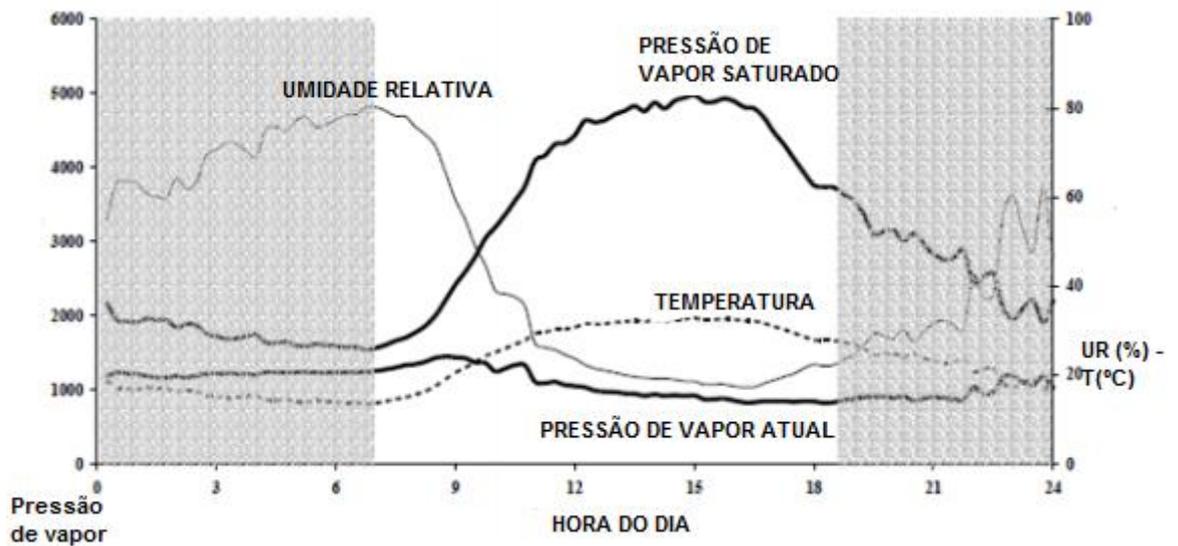
Umidade, pH e temperatura estão diretamente relacionados na produção do biogás, já que sua produção trata-se de um processo orgânico.

- a) Umidade: A produção de biogás cresce diretamente com o teor de umidade. Segundo Ferreira Thales (2011) a chuva, além de aumentar o teor de umidade, realiza um papel importante ao selar o solo, evitando assim as perdas de biogás para a atmosfera.
- b) pH: O meio ótimo para produção do metano encontra-se entre 7 e 7,2 ao atingir pH 5,5 acontece a inibição da atividade bacteriana. Se o meio estiver na presença excessiva de materiais tóxicos ou ácidos graxos, ele torna-se ácido.
- c) Temperatura: A temperatura é um fator essencial nas reações enzimáticas e produção do gás. O metano pode ser obtido em ambiente mesofílico (25 – 45°C) e termofílico (50 a 65°C), sendo que a produção aumenta proporcionalmente à temperatura até o limite de 45°C. A partir daí o meio torna-se impróprio tanto à bactéria mesofílica quanto à termofílica, e em 65°C cessa completamente. Não recomendável operar abaixo de 10°C pela quantidade insuficiente de gás produzido, tampouco acima de 35°C pela necessidade de aporte energético ao digestor, o que poderá inviabilizar economicamente a operação. (SANTANA,2009). Variações bruscas na temperatura, também prejudicam a produção do biogás.

Analisando o comportamento da temperatura e da umidade ao longo de um típico dia (sem chuva), é possível levantar o comportamento da produção do biogás durante o dia.

Abaixo é apresentado um gráfico retirado do curso de agrometeorologia da FAEMU-UFPEL, que considera: umidade relativa do ar, temperatura e pressão de vapor em um dia típico:

Gráfico 3 - Variação da umidade relativa ao longo de um dia típico

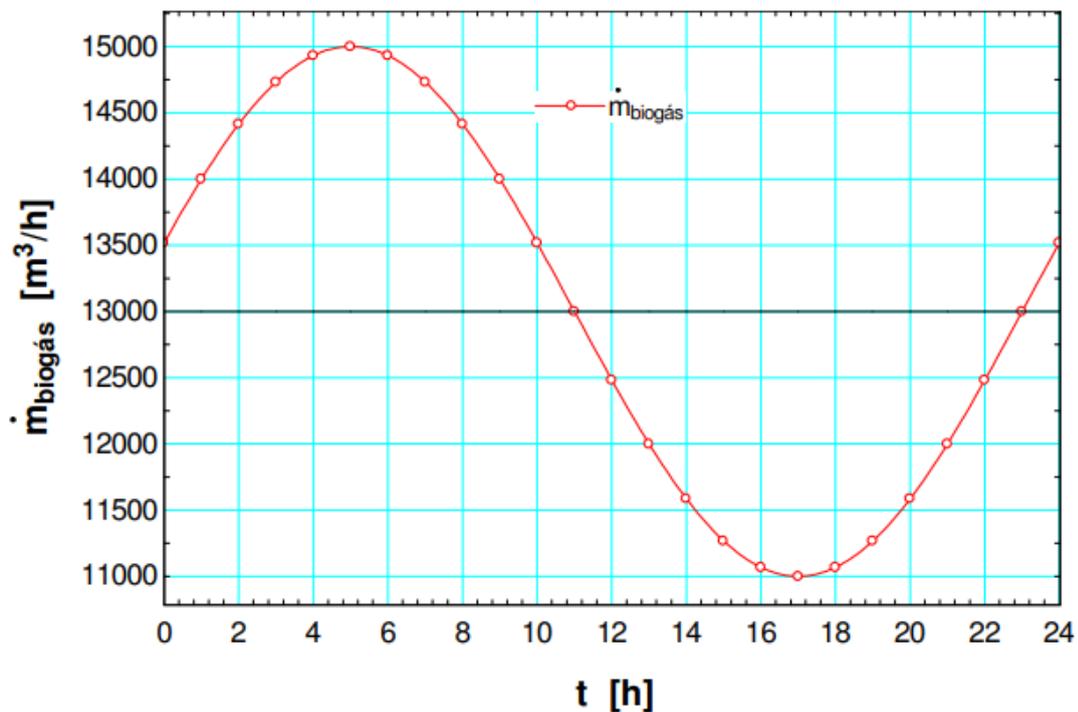


Fonte: FAEMU - UFPEL, 2011.

Observando o Gráfico 3, ele apresenta um comportamento senoidal da umidade relativa do ar ao longo de um dia típico. Segundo um estudo realizado na CRT – Caieiras, a produção do biogás acompanhará diretamente o comportamento do Gráfico 3.

O Gráfico 4 , apresenta a vazão mássica do biogás em função da horário do dia:

Gráfico 4 – Variação da vazão do biogás.

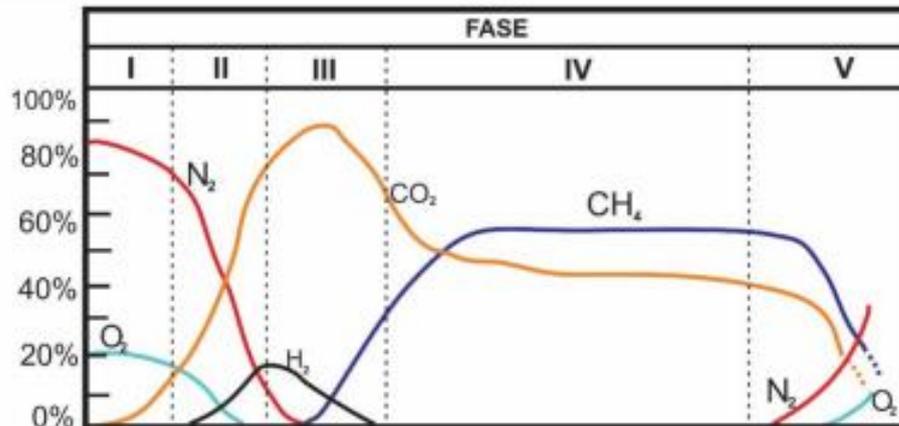


Fonte: Thales Ferreira de Andrade Garcia, 2011.

4.3 Fases de Produção do Biogás

As fases da produção do biogás podem ser observadas no Gráfico 5:

Gráfico 5 – Fases de geração do biogás em aterros sanitários



Fonte: (BORBA,2006)

Fase I: É o ajuste inicial. Fase onde os resíduos são depositados no aterro sanitário.

Nesta fase, a decomposição é anaeróbia, ela se estende por um período de poucos dias, diminuindo a presença de oxigênio.

Fase II: Transição. Decresce o número de oxigênio e começa a fase anaeróbia.

Com o potencial de oxidação e redução dos resíduos, é possível observar o início das condições anaeróbicas. Devido a altas concentrações de CO_2 dentro do aterro e a presença de ácidos orgânicos, o PH do chorume começa a cair.

Fase III: Ácida. Esta fase antecede a formação de Metano. O dióxido de carbono é o principal gás gerado na fase III.

Fase IV: Metanogênica: Nesta fase de produção do metano, predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2 . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase ascenderá a valores na faixa de 6,8 a 8,0. A seguir o pH continuará subindo e serão reduzidas as concentrações de DBO5, DQO e o valor da condutividade do chorume. Com valores mais elevados de pH, menos constituintes inorgânicos permanecerão dissolvidos, tendo como conseqüência a

redução da concentração de metais pesados no chorume (FARIA,2011).

Fase V: Maturação. Essa fase ocorre quando grande parte da matéria prima foi transformada em CH_4 e CO_2 . Nesta fase, a taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes, já foi consumida nas fases anteriores.

A duração de cada fase de geração de gás variará conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, a disponibilidade de nutrientes, a umidade dos resíduos, a passagem de umidade pelo aterro e o grau de compactação inicial (BORBA, 2006)

5 COMPONENTES NECESSÁRIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE UMA USINA DE BIOGÁS

A seguir são apresentados os componentes básicos para implantação de uma usina de aproveitamento energético em aterros sanitários:

5.1 Drenos Verticais

Os drenos verticais são usados para a coleta do gás. Os gases gerados no aterro (biogás, formado basicamente por metano, dióxido de carbono, oxigênio e outros gases em menor proporção), provenientes dos processos de decomposição dos resíduos orgânicos são captados através de drenos e encaminhados para o devido tratamento (CANDIANI, 2011).

Figura 13 - Vista da escavação de dreno vertical



Fonte: FARIA, 2011.

O biogás é captado por meio de um sistema de exaustores, chamado de exaustão forçada. A coleta do biogás pode chegar a 80% de eficiência através desse sistema em relação ao total de biogás produzido no aterro sanitário. Após a captação do biogás, este é encaminhado para o sistema de tratamento.

O número de drenos N_d em um aterro sanitário pode ser calculado pela equação 3:

$$N_d = \frac{A_A}{\pi \cdot r^2} \quad (3)$$

Onde, A_A é a área do aterro e r é o raio de abrangência do dreno, geralmente é igual a 25 metros (SANTOS, 2015).

A profundidade de escavação do dreno vertical é no mínimo, duas vezes a camada

de cobertura final e o comprimento da escavação é no mínimo quatro vezes o diâmetro da drenagem vertical. Este procedimento serve para se obter melhores proteções da camada impermeabilizante e também, para dificultar a penetração de oxigênio durante a extração de biogás (FARIA, 2011).

Em 2011 foi realizado um estudo no Aterro Sanitário de Caieiras-SP que tinha por objetivo estudar a produção do biogás avaliando-se a influência do tamanho da geomembrana usada para a cobertura nas imediações dos drenos verticais em relação a eficiência de captação do biogás. O objetivo era avaliar a possibilidade do aumento na produção de gás metano a partir do tamanho da geomembrana.

Figura 14 - Geomembrana no dreno vertical



Fonte: CANDIANI, 2011.

Nesse estudo, os drenos verticais foram instalados a 1 metro de profundidade e monitorados por 30 dias.

A tabela 8 mostra os resultados obtidos nesse estudo:

Tabela 8 - Produção do metano (%) sob influência da área da geomembrana

Dreno	Tratamento	Valor Metano(%)
Dreno 61	2 x 2 m	53,72
	4 x 4 m	59,16
Dreno 66	2 x 2 m	57,57
	4 x 4 m	58,87
Dreno 67	2 x 2 m	57,6
	4 x 4 m	58,12

Fonte: CANDIANI, 2011.

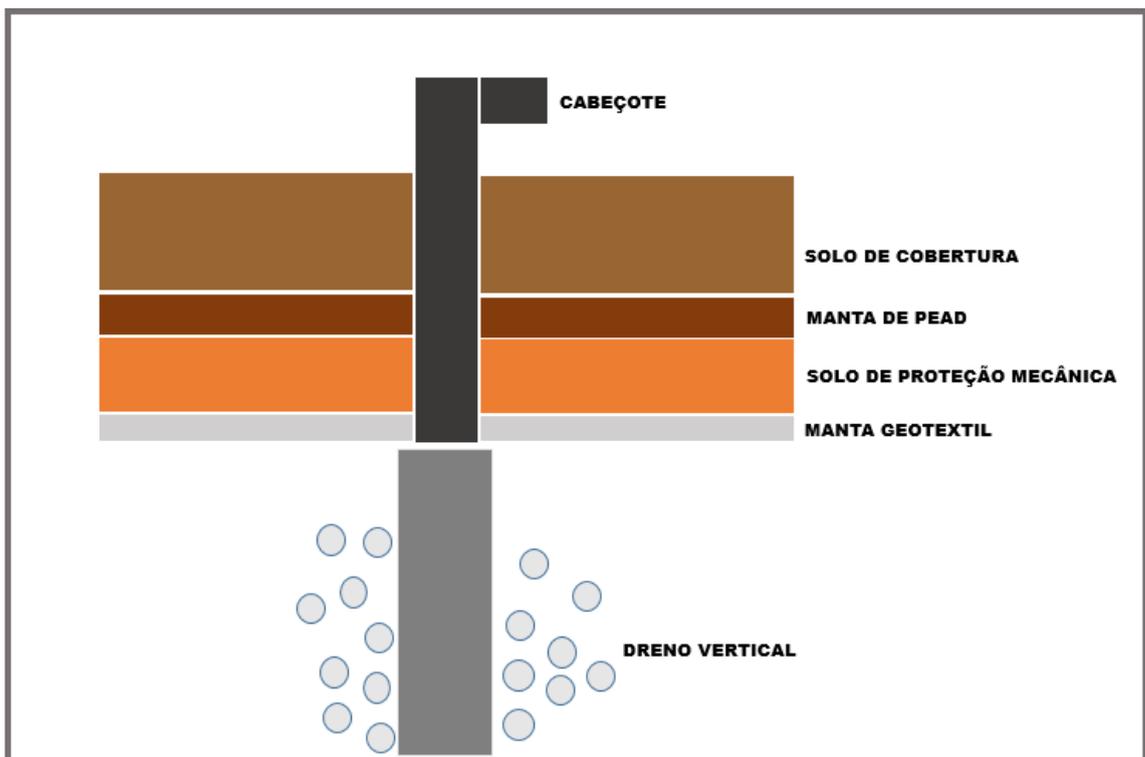
Pode-se observar que com a geomembrana ocupando uma maior área: 4x4m houve um incremento na produção do metano e redução do oxigênio, representando um aumento na eficiência de captação do gás metano no aterro sanitário. Segundo o estudo, ocorreu na média um aumento de 4,43% na produção do metano.

5.2 Cabeçote

Cabeçote é um instrumento que encaminha o biogás de drenos verticais de um aterro sanitário às tubulações condutoras de um sistema de redes de tubulações (FARIA, 2010).

Antes das instalações dos cabeçotes, deve-se fazer a impermeabilização de base para não haver infiltração de águas pluviais e de oxigênio que causam obstrução a passagem de biogás nos drenos verticais. Na figura 15 pode-se verificar as camadas necessárias à impermeabilização de base do cabeçote.

Figura 15 - Camadas de impermeabilização na base do cabeçote



Fonte: Elaboração própria com base em dados de FARIA 2011.

Primeiramente deve-se fazer as escavações no entorno dos drenos. Após isso é instalada a manta geotêxtil afim de evitar que o material terroso de proteção mecânica da manta de PEAD não penetre nas pedras. Na figura abaixo, é possível observar a instalação da Manta Geotêxtil.

Figura 16 – Vista de instalação da Manta geotêxtil.



Fonte: Centro de disposição de resíduos, 2007.

Após a instalação da manta geotêxtil, é depositada uma camada de solo de espessura 25cm adjacente a essa manta, que tem a função de conceder uma proteção mecânica à manta PEAD, que posteriormente será instalada acima desta camada, protegendo de materiais indesejáveis.

A manta PEAD é a camada de impermeabilização de águas pluviais que devem estar protegidas. A manta PEAD pode ser instalada tanto em taludes como e platôs.

Figura 17 - Vista de instalação da Manta PEAD



Fonte: PAZIN, 2007.

Após realizar as impermeabilizações de base dos cabeçotes, existem diferentes modelos de cabeçotes que tem a mesma função de encaminhar o biogás de drenos verticais do aterro sanitário às tubulações condutoras de um sistema de rede de tubulações. A figura 18 mostra o modelo de um cabeçote com chapa circular:

Figura 18 - Instalação de cabeçote no aterro sanitário.



Fonte:PAZIN,2007.

5.3 Tubulações de Condução

As tubulações são responsáveis pela condução do biogás do aterro à usina. Após estabelecer o local da planta para extração do biogás, estuda-se a melhor opção para o encaminhamento das tubulações principais, levando em conta os lugares onde não existirão mais disposições de resíduos. Geralmente esta região é no talude do aterro sanitário.

Segundo Danieletto, 2007:

“Nos ensaios de compressão diametral, com aumento da compressão, o tubo deforma mais e mais, de modo que as paredes internas do tubo, chegam a curvar para dentro, unindo-se (como exemplo um tubo amassado) e, pela sua elasticidade, não ocorre trincas no tubo, acompanhando os recalques de um aterro sanitário continuando com sua função de conduzir biogás”

Com isso as tubulações em usinas de biogás devem prever resistência mecânica, química e térmica adequada, para sustentar as vibrações, tensões por deformação e variações térmicas. O PEAD (polietileno de alta densidade) é recomendado para a fabricação dessas tubulações. Quando a tubulação for de PEAD, deve-se considerar o coeficiente de expansão térmica de 0,20 mm/(m.K) (CONCEITOS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS DE BIOGÁS)

As tubulações de biogás devem ser dotadas de registros, que devem ser instalados pelo menos no reator/biodigestor, no gasômetro e nas tubulações que seguem para os demais ambientes. É necessário que estes registros possam ser operados com segurança, permitindo isolar os diferentes trechos da linha de transporte de gás. Para as válvulas, é indicada a utilização de ferro fundido nodular ou aços de qualidade superior. (CONCEITOS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS DE BIOGÁS).

Figura 19 - Implantação de tubulações para condução do biogás.



Fonte: PAZIN,2007.

5.4 Exaustores

Os exaustores são os sistemas ativos responsáveis pela captação do biogás.

O sistema ativo para a captação do biogás no aterro pode ser descrito da seguinte maneira: a pressão negativa gerada pelo exaustor na linha de sucção (sistema de drenagem) é a força motriz que capta o biogás dos drenos e o encaminha por toda a rede coletora até a unidade de tratamento. Na linha de entrada do sistema, a vazão é controlada por válvula e indiretamente através do transmissor de pressão, que envia um sinal elétrico para o inversor de frequência, acoplado ao exaustor. A primeira etapa de tratamento do biogás captado ocorre pela passagem do mesmo através de um tanque separador de líquidos, provido de filtros, no qual os condensados e particulados ficam retidos (ESSENCIS, 2008).

5.5 Unidade de Tratamento

A finalidade da unidade de tratamento é para a remoção de impurezas como o CO₂, H₂S e o H₂O e também para a ampliação do teor de metano do biogás. Isso eleva o poder calorífico do gás e diminui os riscos de problemas com os equipamentos da usina.

O sistema de captação promove o encaminhamento do biogás dos drenos do sistema de coleta até o sistema de tratamento, que é composto basicamente por um conjunto de exaustores e filtros para remoção de condensado e particulado. Este pré-tratamento, realizado por um filtro para a remoção de condensados e particulados do biogás, tem a finalidade de proteger os exaustores. (CANDIANI, 2011).

A primeira etapa de tratamento do biogás extraído ocorrerá pela passagem do mesmo através de um filtro, para a remoção de material particulado eventualmente arrastado juntamente com o gás. A montante e a jusante deste filtro são instalados medidores de pressão (vacuômetros) que possibilitam o monitoramento do aumento da perda de carga e permitem identificar o momento da troca do elemento filtrante. Após passagem pelo filtro, o biogás é encaminhado a um tanque separador de líquidos, denominado desumidificador (MANUAL PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS, 2009).

O sistema de desumificação mais utilizados são os demisters, que tem a função de separar as gotículas de líquido contidas no biogás, evitando que cheguem aos exaustores/sopradores.

5.6 Sensores/Monitoramento

A pressão, vazão, qualidade do biogás e a atmosfera dos ambientes fechados devem ser monitorados de forma online, visando sempre a segurança da planta. Para a medição da vazão, podem-se utilizar medidores vortex ou ultrassônicos, mesmo quando o biogás possui impurezas e umidade mostrando resultados satisfatórios. Para a medição da qualidade do biogás, recomenda-se a medição dos principais constituintes do gás que são o metano e o dióxido de carbono, essas medições devem ser feitas por sensores infravermelhos. As medições de oxigênio e gás sulfídrico podem ser feitas por sensores eletroquímicos.

Segundo a Resolução n 8 de 30.1.2015 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, é necessário atender às exigências de monitoramento do gás.

5.7 Queimadores (Sistemas Flare)

Os flares enclausurados, são construídos em aço carbônico e isolados com fibra cerâmica, possuem queimadores internos que são fixados a um coletor inferior, interligados com o duto do biogás. Este duto apresenta uma bifurcação que envia o gás para os sistemas de geração de energia (MONTAGNA, 2016).

O procedimento da queima do gás CH_4 ocorre nos queimadores (flares) e é extremamente importante a instalação de um sistema flare quando há unidades consumidoras de biogás, caldeiras, conjuntos motor-gerador, pois ele garante a queima em casos de: produção excessiva do gás, falha no sistema de geração de energia, desligamento dos geradores, impossibilidade de coleta do gás, quando da capacidade máxima dos gasômetros, existência de anomalias na produção/operação, interrupção do sistema para manutenção/melhorias ou para os gases que não forem aproveitados na geração de energia elétrica, impedindo a emissão para atmosfera. Além disso, esse procedimento também evita explosões. Há dois tipos de queimadores, os abertos e os enclausurados.

Figura 20a- Queimador flare tipo fechado. Figura 20b – Queimador flare tipo aberto.



Fonte: Combustec queimadores (2013).

Os queimadores devem ser dimensionados para comportar uma capacidade correspondente ao volume máximo do biogás gerado.

5.8 Gasômetro

A função do gasômetro é o armazenamento: para que se possa realizar eventuais manutenções dos equipamentos de geração de energia; e a regularização da vazão do gás: esta permite operar a usina com uma geração energética o mais constante possível.

Os sistemas de armazenamento de biogás, em geral, adotam as seguintes faixas de pressão:

- » Não pressurizado (normalmente exige soprador para o consumo): 0 kPa a 0,1 kPa (1 mbar);
- » Baixa pressão: 1 kPa a 5 kPa (10 a 50 mbar);
- » Alta pressão: 0,1 MPa a 1 MPa (1 a 10 bar) (CONCEITOS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS DE BIOGÁS)

Para pequenas e médias usinas de biogás, é recomendado o armazenamento em gasômetros de baixa pressão ou a utilização do armazenamento sem pressão. Para usinas de biogás de grande porte é rentável o armazenamento sob alta pressão (0,1MPa a 1 MPa).

Pressões acima de 1 MPa são usadas em casos em que é necessário armazenar grandes quantidades de gás no menor volume possível, ex: combustíveis veiculares.

Figura 21 – Sistema de armazenamento do biogás (Gasômetro)



Fonte: GTI, 2018.

5.9 Custos dos equipamentos necessários ao funcionamento de uma usina

Os custos de cada um dos equipamentos necessários ao funcionamento de uma usina estão listados na Tabela 9

Tabela 9 - Custo de implantações dos componentes da usina

Componente	Custo Corrigido (2019)
Queimador	R\$ 424.292,51/unidade
Gasômetro	R\$ 192,23/m ³
Exaustor	R\$ 1.066,23/m ³ h
Tubulação de condução	R\$ 531,59/metro
Drenos	R\$ 2.122,02/unidade
<p>Valores obtidos relativos à 06/2006 em CETESB (2006) e convertidos para 02/2019 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2019).</p>	

Fonte: CETESB (2005).

6 TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA E TÉRMICA DO BIOGÁS

Entre as tecnologias para conversão do biogás em energia elétrica, entre as mais usadas atualmente, destacam-se os motores de combustão interna – Ciclo de Otto e as microturbinas.

As tecnologias para a conversão o biogás em energia térmica mais utilizadas, são as micro turbinas, turbinas a vapor que utilizam o ciclo Rankine e as turbinas a gás.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL,2015), existem 11 Usinas cadastradas em operação no Brasil que produzem energia elétrica através do biogás de resíduos sólidos urbanos, totalizando 73.953 kW outorgada.

Tabela 10 – Matriz energética brasileira a partir do biogás gerado em aterros

Usina	Potência (kW)	Destino	Município
Salvador	19.730	PIE	Salvador – BA
São João Biogás	24.640	PIE	São Paulo – SP
Energ-Biog	30	REG	Barueri – SP
Asja BH	4.278	REG	Belo Horizonte – MG
Arrudas	2.400	REG	Belo Horizonte – MG
Ambient	1.500	REG	Ribeirão Preto – SP
Biotérmica Recreio	8.556	PIE	Minas de Leão - RS
Uberlândia	2.852	REG	Uberlândia - MG
CTR Juiz de Fora	2.852	REG	Juiz de Fora- MG
Itajaí Biogás	1.065	REG	Itajaí - SC
Bandeirantes	4.624	REG	São Paulo - SP
Total	73.953		

Fonte: ANEEL (2015).

Em dados atualizados da ANEEL 2018, o Brasil contava com 19 Usinas de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos, e uma potência instalada de 128.851 kW.

6.1 Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna são máquinas que por meio da queima de combustível produzem trabalho. Os motores do tipo alternativo, convertem energia química resultante do combustível, em energia mecânica. Primeiramente, a energia química é transformada em energia térmica, por meio da reação de combustão que ocorre no interior do cilindro entre o combustível e o oxigênio do ar. Esta energia térmica aumenta a temperatura e a pressão dos gases resultantes da combustão dentro da câmara, o que ocasiona a expansão destes gases, e por consequência a movimentação dos mecanismos do motor (PULKRABEK, 2004).

Para utilizar o biogás como combustível em motores de combustão interna é necessário que sejam removidos o gás carbônico e o gás sulfídrico (Coelho, 2006). A purificação do biogás é importante porque por ser corrosivo, o gás sulfídrico deteriora motores. Por outro lado, a remoção do gás carbônico aumenta o poder calorífico, uma vez que mantém armazenada maior densidade de biogás concomitantemente a diminuição da presença de gás abafante presente (OLIVEIRA, 2009).

O princípio básico de funcionamento dos motores de combustão interna, é aproveitar ao máximo, o aumento da pressão. Este aumento é causado pela reação de combustão entre o combustível e o ar, gerando movimento de rotação no motor. Os principais componentes dos motores de combustão interna são os pistões, virabrequim, bielas e cilindros.

Os motores de combustão interna podem ser divididos em ciclo de Otto e ciclo diesel. Os motores de ciclo diesel são projetados para uma necessidade maior de potência que o motor de ciclo de Otto.

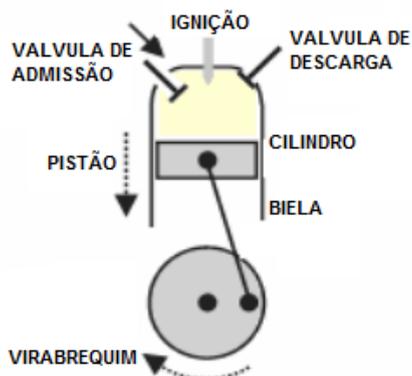
Os motores do ciclo de Otto são projetados para operar com gasolina, porém podem ser facilmente modificados para operar com biogás. A principal modificação está no fornecimento de ar e no processo de mistura do ar ao biogás, substituindo o carburador de um motor que utiliza combustível em estado líquido. Assim, o motor é controlado através da quantidade de biogás que é abastecido. Para otimizar este tipo de sistema é desejável um aumento da razão de compressão, o que possibilita um menor consumo de combustível e uma maior potência (MACHADO, 2014). Mas inevitavelmente, um motor de ciclo de Otto transformado para usar biogás terá uma produção inferior de energia do que quando operado a gasolina, pois a eficiência volumétrica do sistema é reduzida, isso ocorre pois em um mesmo volume, a gasolina possui maior energia que a mistura de biogás. Além disso o biogás possui uma velocidade de combustão mais lenta que a gasolina e o álcool.

6.2 Funcionamento do Ciclo de Otto

O ciclo de Otto possui 5 fases, a saber: admissão, compressão, explosão, expansão e descarga, respectivamente.

A Figura 23 exemplifica a operação de um cilindro de um motor de combustão interna de ciclo de otto. O sistema possui uma válvula de admissão (no lado esquerdo), uma válvula de escape (no lado direito), um dispositivo de centelha elétrica para ignição, pistão, biela e virabrequim. A mistura de ar e combustível é fornecida por um sistema de alimentação – carburador.

Figura 23: Esquema simplificado da máquina de Otto.

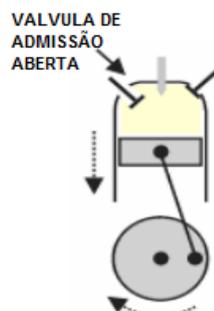


Fonte: GOMES DIAS, 2009. Adaptado.

6.2.1 Admissão

Conforme Figura 24 a válvula de admissão encontra-se aberta, através do movimento do pistão é injetada ao cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento do virabrequim. É uma transformação isobárica.

Figura 24 – Válvula de admissão aberta. 1º fase.

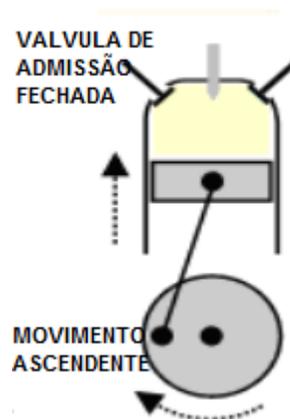


Fonte: GOMES DIAS, 2009. Adaptado.

6.2.2 Compressão

Nessa fase ocorre o fechamento da válvula de admissão, e em um movimento ascendente, conforme Figura 25, a mistura ar-combustível é comprimida. A velocidade do pistão é rápida, existindo pouco tempo para a troca de calor, por esse fato na segunda fase o processo é adiabático.

Figura 25 – Válvula de admissão aberta. 2º fase.

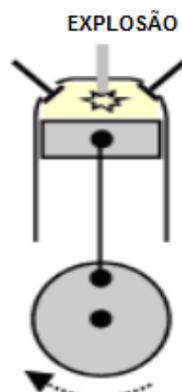


Fonte: GOMES DIAS, 2009. Adaptado.

6.2.3 Explosão

Nessa fase ocorre a explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão. O êmbolo atinge a posição mais superior (ponto morto superior), e com isso tem-se o movimento final ascendente do êmbolo que comprime ao máximo a mistura e a ignição emite a centelha que provoca a combustão da mistura. Este processo é isocórico.

Figura 26 - 3ª Fase.

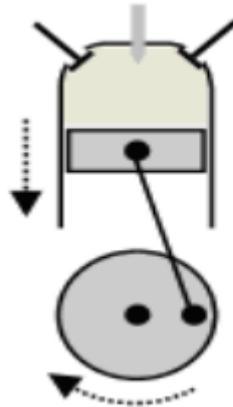


Fonte: GOMES DIAS, 2009. Adaptado.

6.2.4 Expansão

Com o fornecimento de calor, a mistura se expande, forçando o pistão para baixo, conforme Figura 27.

Figura 27 – Fase: expansão.

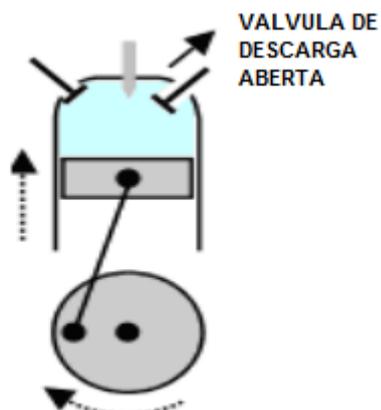


Fonte:GOMES DIAS, 2009. Adaptado

6.2.5 Descarga

A válvula de escape é aberta, o pistão atinge o ponto morto inferior e a pressão do gás é reduzida rapidamente. O movimento ascendente do êmbolo e a válvula de escape aberta, removem a maior parte dos gases da combustão e o ciclo é reiniciado.

Figura 28 – 5 fase: Descarga.



Fonte:GOMES DIAS, 2009. Adaptado

6.2.6 Vantagens na utilização motor ciclo de Otto

- Geração de energia elétrica para o próprio consumo no aterro;
- Economia de R\$ em relação à energia proveniente da concessionária;
- Possibilidade de obtenção de receita adicional pela venda de excedente de energia;
- Possibilidade de obtenção e comercialização de créditos de carbono (considerando 100% de eficiência de queima).
- Não requer pré tratamento do biogás[MANUAL DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS, 2009].

6.2.7 Desvantagens

- No Brasil, a maior potência disponível desses motores é de aproximadamente 230kW. Com isso, para grandes empreendimentos, o investimento inicial fica elevado, pois é necessário importar motores de potência maior. No mercado, as potências disponíveis desses motores variam de 5kW a 1,6MW;
- Baixo rendimento – 28%
- Altos valores de emissão de Nox. Dependendo do porte do motor, as emissões podem variar entre 250 e 3.000 ppm. [MANUAL DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS, 2009].

6.2.7 Exemplos de aplicabilidade

O Aterro sanitário de Bandeirantes, localizado na Rodovia dos Bandeirantes, em Perus – SP, é um exemplo de geração de energia elétrica a partir do biogás que utiliza motores ciclo Otto importados.

Essa usina implementou 24 grupos geradores que são motores de ciclo de otto acoplados em geradores. Cada um possui capacidade de geração de 925KW, com os 24 totalizam em uma capacidade de 22MW.

Outro exemplo é a central térmica que está implementada no Aterro sanitario São João, localizada na estrada de Sapopemba, em São Mateus. Esse aterro também possui capacidade de geração de 22MW.

6.2.8 Ordem da grandeza de investimentos

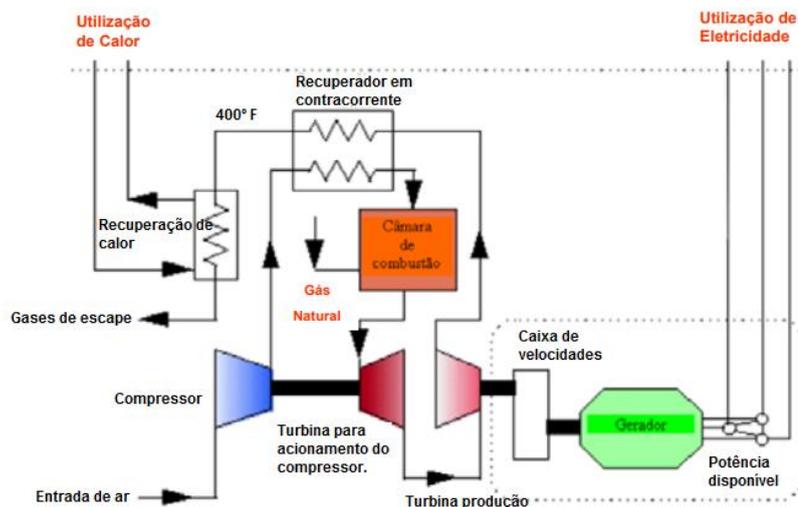
Para aterros sanitários pequenos que possuem baixa produção de biogás, o investimento vai de R\$ 34.800,00 para motores de 5kW, até R\$ 1.219.627,36 para motores de 230kW, a unidade. Para aterros sanitários maiores, que aproveitam todo o biogás produzido, são utilizados motores importados de potência 925 kW (modelo utilizado no aterro Bandeirantes) cujo investimento é da ordem de R\$ 5.923.904,32, ou motores de 1,54 MW cujo investimento é da ordem de R\$ 8.711.624,00 .

Obs. : Valores obtidos relativos à 06/2009 em Manual do aproveitamento do biogás (2006) e convertidos para 02/2019 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2019).

7 MICRO TURBINAS A GÁS

Uma das principais características das micro turbinas a gás, é a fácil adaptação a pequenos sistemas de cogeração, além de poderem ser utilizadas para aquecimento, refrigeração por absorção, desumidificação e secagem de produtos e ainda em pequenas indústrias, especialmente onde o suprimento energético contínuo é necessário (ARAÚJO; ORLANDO; RAMOS). Em geral, as micro-turbinas disponíveis no mercado estão preparadas para funcionar em sistemas de microcogeração, e incluem um “kit” com recuperador/trocador de calor para aproveitar a energia térmica contida nos gases de exaustão e, assim, aumentar o seu rendimento.

Figura 29 – Sistema de cogeração com micro turbina a gás.



Fonte: SOUZA, ROMERO (2015). Adaptado.

As microturbinas, são turbinas de pequeno porte que podem fornecer potências na faixa de 10 a 500kW. Existem características que distinguem as microturbinas das turbinas industriais:

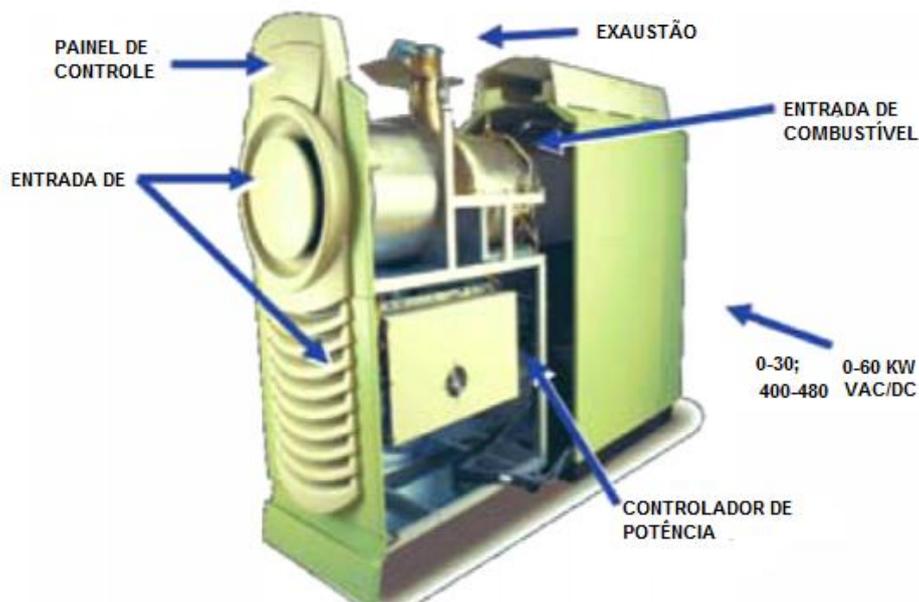
- Turbinas inicialmente projetadas para aplicações comerciais;
- Elevada e variável velocidade de rotação, entre 33000 e 120000 rotações por minuto;
- O gerador de corrente contínua opera à velocidade da turbina com um inversor acoplado;
- Projeto simples, permitindo redução de custos e grandes volumes de fabricação;
- Trabalham com baixas pressões; são compactas, fáceis de instalar e de reparar;
- Eficiência razoável (30-33%); baixas emissões; permitem cogeração e

modularidade, Alta durabilidade.

As microturbinas são compostas basicamente de um compressor, que é responsável pela elevação da pressão do ar e pelo aumento da quantidade de ar injetado na câmara de combustão; da câmara de combustão, local onde ocorre a mistura do ar a alta pressão e do combustível, e posterior reação química de oxidação exotérmica (combustão); da turbina, onde ocorre a expansão dos gases resultantes da combustão e a realização de trabalho mecânico útil; e de um regenerador ou recuperador de calor, cuja função é pré aquecer o ar do compressor, antes de sua entrada da câmara de combustão (HIRANO,2015).

O uso de microturbinas torna-se interessante para aplicações onde se dispõe de pequenas reservas de biogás. Com a microturbina, é possível trabalhar com biogás pobre em metano, com altos níveis de contaminantes, como o gás sulfídrico. A Figura 30 representa esquematicamente uma microturbina a gás.

Figura 30 – Esquemático de uma micro turbina a gás.

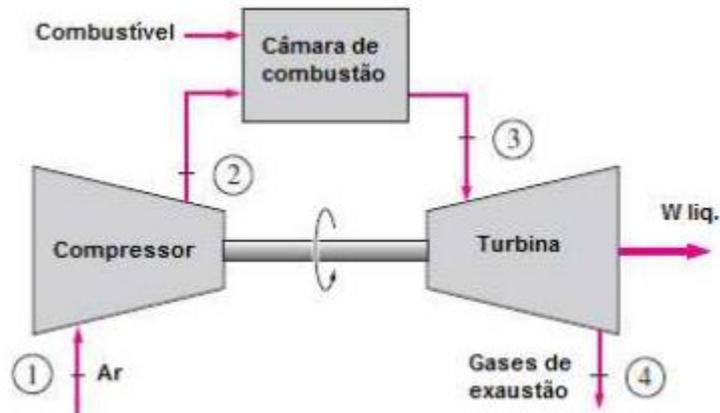


Fonte: Monteiro (2004)

7.1 Princípio de Funcionamento

A Figura 31 apresenta o princípio de funcionamento da microturbina a gás:

FIGURA 31 – Diagrama esquemático de uma microturbina a gás.



Fonte: ÇENGEL E BOLES (2007).

- 1 – COMPRESSOR: Tem a função de admissão do ar, fazer o encaminhamento do ar até a câmara de combustão e pela elevação da temperatura deste.
- 2 – CÂMERA DE COMBUSTÃO: Recebe o ar comprimido a alta temperatura e o combustível é injetado e queimado a pressão constante, aumentando a temperatura dos gases. Os gases a alta temperatura e pressão vindos da câmara de combustão, são então entregues a turbina.
- 3 – TURBINA: Na turbina, a energia dos gases de exaustão é convertida em energia cinética, que é convertida em energia mecânica. Como o compressor e a turbina estão ligados no mesmo eixo, parte da energia mecânica é transferida para acionar o compressor, e o restante, é utilizado para mover o gerador elétrico síncrono de ímã permanente (pode-se utilizar também geradores de corrente contínua ou geradores de indução), que geram energia elétrica com alta frequência (1.600 Hz). Um retificador e inversor são empregados para obter tensão e frequência elétrica comumente utilizada pelas redes de distribuição(HIRANO,2015).

O rendimento elétrico das microturbinas varia entre 15 a 33%, porém quando operadas em sistemas de cogeração, sua eficiência pode chegar a 80%. O uso do biogás para a produção de energia elétrica em microturbinas é viável economicamente quando se dispõe de quantidades suficientes de biogás capaz de manter o funcionamento contínuo da microturbina,

7.1.2 Vantagens na utilização da microturbina a gás

- Devido à flexibilidade de combustíveis, a microturbina pode ser abastecida com biogás de baixo poder calorífico;
- Permitem cogeração e modularidade;
- As microturbinas não necessitam trabalhar em uma faixa fixa de velocidade, isto permite um ajuste das diferentes condições de carregamento de modo a obter uma operação mais eficiente e com menor desgaste do equipamento (HIRANO, 2015)
- capacidade de emitir baixos níveis de poluentes, com índices inferiores a 9 ppm.
- Dimensões reduzidas e simplicidade de instalação, podendo ser instaladas em locais cobertos ou ao ar livre;
- Devido ao gerador elétrico operar com a mesma velocidade da turbina, a microturbina dispensa o uso de caixas redutoras de velocidades, reduzindo assim, o peso do equipamento e as partes móveis do sistema (HIRANO, 2015)

7.1.3 Desvantagens

- Investimento inicial elevado, pois os equipamentos são importados. As potências hoje disponíveis no mercado variam de 30kW a 1MW;
- Baixo rendimento: aproximadamente 28%. Porém, quando utilizadas em instalações de cogeração, sua eficiência pode chegar a mais de 80% (HAMILTON, 2003);
- Quando comparada com outras tecnologias disponíveis, possui um alto custo de manutenção e operação;
- Ruídos de altas frequências;
- Experiência limitada com esse tipo de tecnologia;
- Eficiência questionável com cargas parciais;

7.1.4 Exemplos de aplicabilidade

No Aterro em Los Angeles, localizado no Lopez Canyon, o gás proveniente da de composição do lixo é tratado e utilizado para abastecer 50 microturbinas de 30 kW, que operam em paralelo.

12.1.4 Ordem dagrandeza de investimentos

Existem no mercado, microturbinas de 1.000kW, 800kW,600kW,200kW,65kW e 30kW. O investimento depende do potencial de geração de energia elétrica disponível no aterro. Para cada microturbina o investimento varia de R\$ 339.753,34 para uma turbina de 30kW, a R\$ 5.570.543,94 milhões para uma turbina de 1MW.

Obs. : Valores obtidos relativos à 06/2009 em Manual do aproveitamento do biogás (2006) e convertidos para 02/2019 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2019).

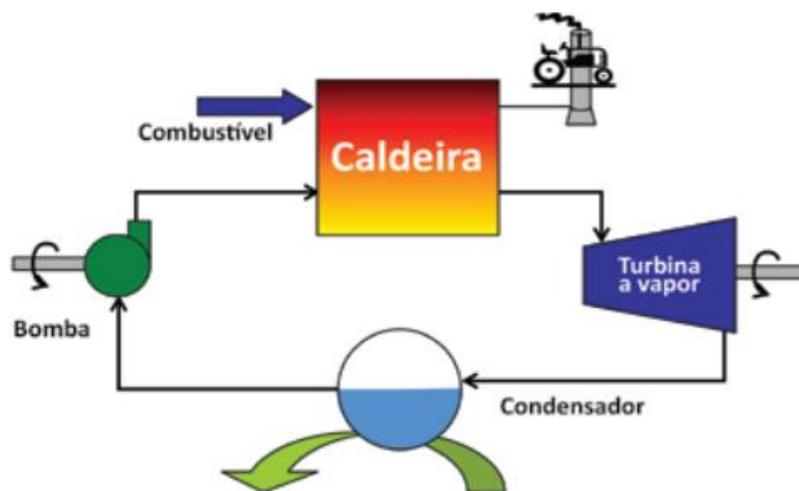
8 TURBINAS A VAPOR

Os ciclos de cogeração com turbinas a vapor utilizam como base o ciclo Rankine, isto porque a energia inicialmente perdida, ou seja, que seria descarregada no ambiente, é reutilizada (BARJA, 2006). A principal característica do ciclo Rankine consiste em sua combustão, que é externa ao fluido de trabalho (água na maioria das vezes). Nesta combustão, a matéria-prima pode ser de fonte sólida, líquida ou gasosa, como o biogás (SHAPIRO E MORAN, 2007).

8.1 Princípios de Funcionamento Ciclo de RANKINE

O ciclo Rankine consiste basicamente em caldeira, turbina, condensador e bomba, conforme Figura 32:

Figura 32 – Esquema do ciclo Rankine.



Fonte: HIRANI E MAMAMI, 2007.

Neste processo, é utilizado o calor proveniente da combustão do biogás, em uma caldeira, para a geração de vapor, que pode ser usado em processos industriais em aquecimentos diretos ou indiretos, ou para geração de energia elétrica, por meio do acionamento da turbina acoplada ao gerador.

Antes de entrar na caldeira, a água deve ser pré-aquecida para que ocorra a mudança de fases, passando da líquida para vapor, em alta pressão. Na sequência, a água é direcionada ao desgaseificador, na qual é aquecida em temperatura próxima aos 105 °C, para ser bombeada para a caldeira. Ocorre então, a troca de massas entre o combustível e o vapor, fazendo com o vapor sobreaqueça-se. Ao entrar na turbina, o vapor expande,

acionando-as e a energia do vapor é transformada em energia mecânica. Após gerar trabalho na turbina, o vapor, em baixa pressão, é direcionado ao condensador para retornar à sua fase líquida para reiniciar o ciclo (BRANDÃO, 2004; MARTINELLI, 2002).

A principal característica do ciclo de Rankine é que sua combustão é externa ao fluido de trabalho.

As unidades cogeneradoras devem estar próximas das instalações que utilizam energia térmica, pois diferentemente da energia elétrica, o calor na forma de vapor ou água quente, não é facilmente transportado a longas distâncias.

8.2 Vantagens na Utilização da Turbina a Gás

- O aproveitamento de forma útil dessa energia térmica, processo conhecido como cogeração, traz como benefícios a diminuição das emissões de carbono e outros poluentes atmosféricos, além da diminuição dos impactos causados ao meio ambiente devido ao despejo de calor para a atmosfera.
- Ganho econômico devido à redução de gastos referentes à energia adquirida da concessionária e à possibilidade de comercialização dos créditos de carbono.(MANUAL PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS, 2009).

8.3 Desvantagens

- Baixo rendimento térmico: aproximadamente 30% .
- A corrosão é um problema para a adaptação de caldeira para biogás, uma vez que compostos presentes neste gás comprometem pré-aquecedores de ar, tubulações e outros componentes.
- Deve-se realizar manutenção regular, impedindo, desta maneira, a formação de depósitos de sílica, enxofre e cloro nos equipamentos.(MANUAL PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS,2009).

9 ILUMINAÇÃO A GÁS

Neste sistema a iluminação ocorre com a queima direta do biogás. A quantidade de postes e de pontos luminosos de cada poste, depende do espaço disponível para instalá-lo e da quantidades de biogás disponível para ser queimado.

Figura 33 – Sistema de iluminação a gás.



Fonte: CENBIO, 2007.

9.1 Vantagens de Usar Iluminação a Gás

- Além da queima do biogás e conseqüente transformação do metano em dióxido de carbono, há possibilidade de obtenção e comercialização dos créditos de carbono, proporcionando receita adicional ao aterro;
- Economia de R\$ em relação à energia proveniente da concessionária.

9.2 Desvantagens

- Apesar de apresentar tecnologia nacional disponível, a mesma ainda está em fase de ajustes e adequações, sendo que os sistemas já instalados apresentam falhas operacionais e defeitos constantes;
- O sistema possui alto custo de investimento;

9.3 Exemplo de Aplicabilidade

O único sistema de iluminação a biogás encontra-se no Aterro sanitário da Essencis Soluções Ambientais em Caieiras – SP.

9.4 Grandeza dos Investimentos

01 poste de iluminação a biogás, com consumo de 50m³ biogás/hora, custa em média R\$ 74.900,00. O número de postes a ser implementado no aterro dependerá da necessidade do local a ser iluminado e da quantidade de biogás disponível para queima.

10. VIABILIDADE ECONÔMICA PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2012) “Para produção de biogás em aterro, deve-se projetar um sistema padrão de coleta, tratamento e queima do biogás: poços de coleta, sistema de condução, tratamento (para desumidificar o gás), compressor e flares com queima controlada para a garantia de maior eficiência de queima do metano.”

Para implantação de um sistema capaz de gerar energia elétrica em um aterro tem um alto custo. Serão necessários investimentos ou participação de empresas, visto que a energia produzida no aterro pode ser consumida pelo próprio aterro e a excedente, poderá ser vendida para empresas privadas, ajudando a diminuir a sobrecarga das concessionárias e também a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE).

A geração de biogás em um aterro sanitário é iniciada em aproximadamente seis meses após o início do depósito dos resíduos e continua por cerca de 15 anos após seu encerramento. Segundo Figueiredo (2012), uma tonelada de lixo depositado em aterro sanitário tem o potencial de geração de 200 m³ de biogás (CARNEIRO, 2016). Para Lima (2005), os resíduos urbanos passaram a ser considerados uma fonte inesgotável de energia alternativa, pois a sua conversão biológica com fins energéticos vem a cada dia tornando-se mais interessante.

Para verificar a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás em um aterro sanitário, é necessário analisar a capacidade de geração do mesmo. Um dos modelos utilizados para realizar essa estimativa, é o Scholl-Canyon. Esse modelo considera que há uma fração constante de material biodegradável no aterro sanitário por unidade de tempo. É um modelo cinético que avalia a produção do biogás durante a vida útil de um aterro. Este modelo é o mais aceito e utilizado pelas agências reguladoras, é dado pela equação 4:

$$Qb = \sum_{i=1}^n 2kloMi(e^{-kti}) \quad (4)$$

Onde:

Qb : Quantidade gerada de biogás;

Mi : Quantidade de lixo;

K = velocidade de degradação;

lo= Potencial de metano.

Esses valores são pré estabelecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos

Estados Unidos (EPA – USA). Esta agência designa os valores desses parâmetros para uma análise conservadora de projeto, esses valores variam de aterro para aterro.

Segundo estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), o potencial energético do biogás pode chegar a 500 megawatts em 2039, capaz de abastecer 3,2 milhões de habitantes, o número de habitantes do estado do Rio Grande do Norte.

Segundo o Carlos Eduardo Silva Filho, diretor executivo da Abrelpe, no cenário atual, o Brasil tem capacidade para gerar 254MW a partir do biogás e, em 20 anos, este potencial energético supera os 280 MW.

O Brasil deve caminhar de maneira positiva para chegar a uma destinação adequada de resíduos sólidos e que sejam devidamente tratados nos aterros sanitários. Se for aplicado o que diz a PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos, praticamente dobraremos o nosso potencial energético a partir dos resíduos (SILVA FILHO, 2013).

Segundo dados da Abrelpe de 2017, o Brasil gerou 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU).

Utilizando esse dado da Abrelpe, podem-se fazer alguns cálculos e chegar a conclusões:

$$T_b = RSUx * Bm \quad (5)$$

Considerando que da quantidade total de resíduos sólidos gerados, 50.4% seja matéria orgânica e que considerando o dado da Abrelpe, que 1 tonelada de resíduo sólido gera 125m³, obtém-se que a quantidade total de biogás (m³), gerado em 1 ano é:

$$T_b = 39.200.000 * 125m^3 = 4.900.000.000 \text{ m}^3/\text{ano} \quad (6)$$

O valor calorífico do biogás proveniente de aterros sanitários, é em média, **5.600 kcal/m³**, e que resulta numa geração equivalente a **1,43 kWh/m³** (FIGUEIREDO, 2010).

Desta forma:

$$P_e = E_e * T_b = 7.007.000.000 \text{ KWh/ano} \quad (7)$$

Uma residência brasileira, consome em média 350kwh por mês, em um ano esse valor chega a 4.200 Kwh. Com base no valor de Pe (potência energética total), seria possível abastecer 1.668.333,33 residências.

RSUx = Quantidade de resíduos sólidos gerados em um ano;

Bm= estimativa da quantidade de biogás(m³) /tonelada;

Tb = Total de biogás gerado em 1 ano (m³);

Pc = Poder calorífico do biogás;

E_e = valor equivalente de energia elétrica/ m^3

P_e = Potencial energético total;

Apesar dos valores expressivos, isso só seria possível se todo o resíduo sólido produzido fosse depositado em lugares corretos, que não os aterros sanitários. Entretanto aproximadamente 20% de todo o lixo produzido ainda vem sendo descartados em lixões a céu aberto.

O aterro sanitário de Bandeirantes já foi considerado o maior do Brasil, quando se implantou o sistema de biogás, a previsão era gerar 20MW de eletricidade. Porém, o projeto de geração apresentou erros de dimensionamento graves.

Em uma pesquisa realizada por Souza, Horttanainen e Antonelli (2014) em 16 cidades brasileiras, a matéria orgânica representava 51,5% na composição dos resíduos sólidos depositados nos aterros verificados. Considerando o potencial de produção de biogás, seria possível gerar uma quantidade de 480,120 GWh utilizando métodos eficientes de aproveitamento energético. A cidade de São Paulo, por exemplo, poderia produzir 637 GWh com o gás de aterros. Se todos os compostos presentes sofressem processo de separação antes de serem depositados nos aterros, esta eficiência poderia ser aumentada em até um terço (CAMPOS, 2017).

Segundo Yara Campos Miranda, o empreendimento seria viável e economicamente atrativo apenas para cidades com populações acima de 200 mil habitantes, devido ao montante gerado de resíduos orgânicos urbanos, passível de fácil decomposição e a alta demanda de energia populacional, isso ocorre porque a tecnologia de extração do biogás ainda é alta.

Em 2017 foi realizado um estudo para viabilidade econômica e financeira da implantação de uma usina de geração de energia a partir do biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus – BA, uma cidade de 100.000 habitantes.

O aterro de Santo Antônio de Jesus, inicialmente era um lixão. Em 2011 ele foi transformado em um aterro sanitário. Para o projeto, consideraram três possibilidades de recuperação do biogás : 50%, 70% e 90%, durante um período de 15 anos, consideraram a construção de uma mini usina, para geração de 2,5MW.

A Tabela 11 demonstra o custo inicial para implantação de uma usina termoeletrica (UTE) de 2,5MW.

Tabela 11 – custo para implantação de uma usina.

Item	Custo Total Estimado
Usina de energia de 2,5 MW	R\$ 4.018.750,00
Interconexão de 1 km	R\$ 480.000,00
Construção da usina	R\$ 300.000,00
Medição do biogás e equipamento de registro	R\$ 60.000,00
Engenharia/Contingências (10% dos outros custos)	R\$ 485.875,00
Tubulação coleta de gás	R\$ 1.687.500,00
Tubulação lateral (envio do gás)	R\$ 129.900,00
Passarelas	R\$ 90.000,00
Gestão do condensado	R\$ 36.000,00
Poços de drenagem vertical	R\$ 400.000,00
Coletores horizontais	R\$ 720.000,00
Queimador	R\$ 1.050.000,00
Engenharia/Contingências e custos iniciais de transação do MDL	R\$ 420.000,00
Capital de Giro	R\$ 523.921,25
Custos do Projeto	R\$ 600.000,00
Totais	R\$ 11.001.926,25

Fonte: TermoVERDE 2016.

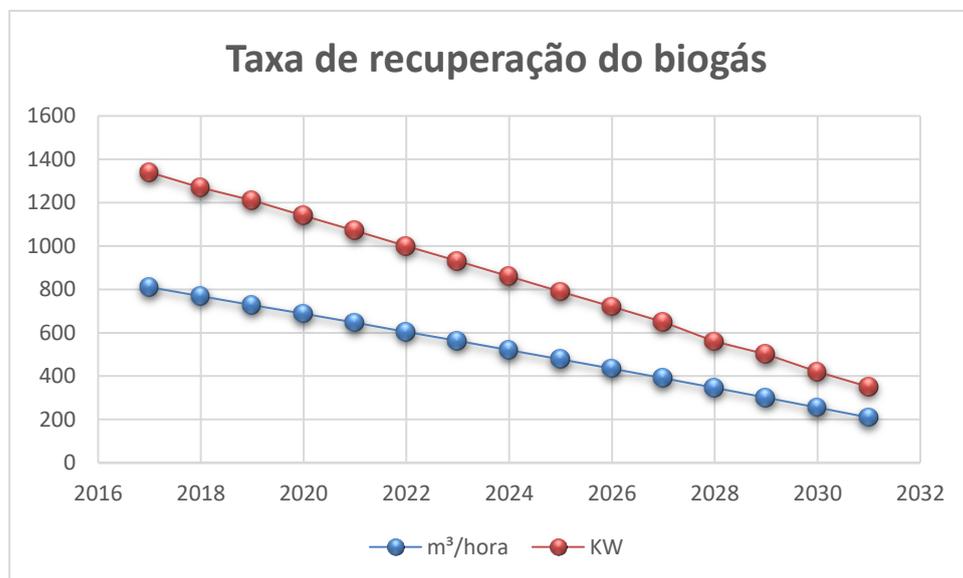
Para esta estimativa, eles consideraram um volume de lixo coletado de 100ton/dia, utilização de motores de combustão interna, visando a substituição de energia local e venda de excedente.

Nesse estudo, foram traçadas as taxas de recuperação do biogás e conversão em energia elétrica ao longo dos anos. Os dados estão apresentados na Tabela 12

Tabela 12 – Taxa de recuperação do biogás.

Ano	Recuperação de biogás Previsto (m ³ /hr)	Capacidade Máxima da Usina de Energia (MW)
2017	810,19	1,34
2018	769,56	1,27
2019	728,70	1,21
2020	687,58	1,14
2021	646,18	1,07
2022	604,49	1,00
2023	562,48	0,93
2024	520,11	0,86
2025	477,35	0,79
2026	434,17	0,72
2027	390,50	0,65
2028	346,28	0,57
2029	301,42	0,50
2030	255,81	0,42
2031	209,26	0,35

Fonte: TEIXEIRA E SILVA,2017

Gráfico 6 – Taxa de recuperação do biogás ao longo de 15 anos.

Fonte: TEIXEIRA E SILVA, 2017.

A geração de biogás em um aterro sanitário é iniciada em aproximadamente seis meses após o início do depósito dos resíduos e continua por cerca de 15 anos após seu encerramento. (MARTINS;SILVA;CARNEIRO;2017).

Como não foi possível realizar a medição do biogás no aterro Santo Antônio de Jesus, o estudo foi conservador, para a recuperação do metano, consideraram o valor mínimo possível desse gás: 55%. Para o percentual de CO_2 consideraram 40%

De acordo com o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, projetos como esse podem comercializar a energia produzida nos leilões da ELETROBRAS, com preço médio de venda de R\$ 214,51/Mwh (ABREU, FILHO E SOUZA, 2015).

Obs. : Valores obtidos relativos à 02/2015 e convertidos para 02/2019 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2019).

Ao final do estudo, chegaram a conclusão que um projeto de recuperação do biogás e aproveitamento e tratamento do metano com o objetivo de geração de energia elétrica, é viável do ponto de vista econômico mesmo que a quantidade de lixo depositada por dia seja pouca. O projeto teria geração acima de 1MW de energia anual nos 10 primeiros anos, suficiente para abastecer 1,5 mil famílias.

A produção de energia através do biogás do lixo em aterros sanitários representa ganhos para a sociedade, pois além da possibilidade de gerar empregos, reduzir subempregos e aumentar a arrecadação de impostos, gera melhorias ao meio ambiente com a contenção de emissões de CO₂, e, redução do uso de combustíveis fósseis (TEIXEIRA, 2017).

10.1 Créditos de Carbono

O Mercado de créditos de carbono nasceu em 1997, com o protocolo de Quioto. Este protocolo determina que os países reduzam as emissões de gases do efeito estufa.

Uma das determinações deste protocolo foi que caso os países desenvolvidos não consigam cumprir as metas estabelecidas na redução de GEE, os países estariam autorizados a comprar créditos de outras nações. Esta ação fortaleceu negócios de empresas emergentes, como o Brasil. Com isso, as empresas que conseguem diminuir a emissão dos gases de efeito estufa, conseguem créditos de carbono, e pode vendê-los aos mercados financeiros.

Um crédito de carbono equivale a uma tonelada de **CO₂** (dióxido de carbono) que deixou de ser emitido para a atmosfera. Aos outros gases reduzidos são emitidos créditos, utilizando-se uma tabela de equivalência entre cada um dos gases e o **CO₂** (MENEQUIN, 2012).

Estes créditos de carbono podem ser obtidos na forma de projetos sustentáveis. Se uma empresa brasileira implanta um projeto que visa a redução dos gases de efeito estufa, esta empresa brasileira fica liberada a captar recursos financeiros de empresas internacionais vendendo os créditos de carbono gerados com a redução de GEE obtidas no

projeto.

Dentre os principais projetos de redução de emissão de GEE elegíveis, estão, no âmbito do mercado de carbono regulado, os projetos que tratam do aumento da eficiência energética, do uso de fontes e combustíveis renováveis, da adoção de melhores tecnologias e sistemas para o setor produtivo em geral, do resgate de emissões de GEE através de sumidouros, da estocagem dos GEE 152 retirados da atmosfera, além de atividades ligadas ao uso da terra como o reflorestamento e o florestamento, que atenda ao princípio da adicionalidade (MCT, 2011; SILVA JUNIOR, 2011). O Brasil ocupa a terceira posição mundial entre os países que participam desse mercado, com cerca de 5% do total mundial e 268 projetos. A expectativa inicial era absorver 20%. O mecanismo incentivou a criação de novas tecnologias para a redução das emissões de gases poluentes no Brasil (Ministério do Meio Ambiente, 2012). De um modo geral, estima-se que para cada tonelada de lixo orgânico que vai para uma instalação de biogás deixa-se de enviar para a atmosfera uma tonelada de CO₂.

O Brasil pode se beneficiar com a venda de créditos de carbono, segundo estimativas do Banco Mundial, o país pode ter uma participação de 10% no mercado de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), equivalente a US\$ 1,3 bilhões em 2018.

A Tabela 13 mostra alguns valores referentes a leilões de créditos de carbono pela prefeitura do município de São Paulo, no Aterro de Bandeirantes:

Tabela 13 – Leilões de crédito de carbono – Aterro Bandeirantes.

	Data do Leilão	Quantidade de créditos leiloados	Valor Arrecadado (R\$ Milhões)	Valor do Crédito (R\$/Credito)
1 Leilão	26/09/2007	808 Mil	R\$ 34,05 Milhões	42,14
2 Leilão	25/09/2008	713 Mil	R\$ 37,02 Milhões	52,17
3 Leilão	12/06/2012	530 Mil	R\$ 4,47 Milhões	8,43

Fonte: MANUAL PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS, 2011

11 CONCLUSÃO

Do ponto de vista da matriz energética, é estratégica a diversificação de fontes geradoras de energia, sendo que o biogás é uma fonte disponível próxima aos centros consumidores de energia elétrica e é uma fonte renovável de energia. É importante o incentivo de novos e aprofundados estudos e pesquisa nessa área, pois os resíduos sólidos urbanos causam grande impacto ao meio ambiente e em contrapartida possuem o poder de aproveitamento energético.

Cabe o desafio de incentivar a utilização desse potencial energético de aterros sanitários para geração de energia térmica e elétrica, já que apresentam ganhos para a sociedade na geração de empregos, redução de subempregos, contribuição para o desenvolvimento local e regional, transferência de tecnologia, aumento na arrecadação de impostos, melhorias no meio ambiente com a redução na emissão do CO_2 , desenvolvimento de práticas sustentáveis como a correta separação dos lixos gerados em casa e também apresentam-se como uma fonte de renda para as prefeituras, através da comercialização de energia e da venda de créditos de carbono, impactando positivamente no aspecto ambiental e econômico.

Se considerarmos a quantidade de resíduos sólidos coletados no país que não são transformados em energia, o Brasil ainda tem muito o que explorar dessa geração e o número de Usinas de biogás existentes no Brasil pode ainda ser muito maior.

Quanto a viabilidade econômica para implantação de usinas de biogás, é viável apenas quando os aterros são de grande porte que recebem a partir de 2.000t/dia de resíduos sólidos, compensa quando estão instalados em cidades com mais de 200 mil habitantes.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. V., Filho, M. A.; SOUZA, M. C. **Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpa - um estudo de viabilidade técnica e econômica**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 201

AEBIOM. **European Biomass Association. A biogás Road map for Europe,2009**. Disponível em :< <http://www.Aerobiam.org>>

A ENERGIA DO FUTURO: BIOGÁS. **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão (REVINT)**,2017. Disponível em:
<<http://revistaeletronica.unicruz.edu.br/index.php/eletronica/article/view/4172>> Acesso: 15 out.2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2006). Audiência Pública nº003/2006 – **Estabelecimento dos requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia**. Brasília: ANEEL.

ALVES, Carlos Antônio. CAVALCANTE, Marcio Balbino. PEREIRA, Maria Aparecida. BEZERRA, Inocência. SILVA, Ginaldo (2013). **Lixo Urbano: Uma análise desse problema social**. Disponível em :< <http://eventos.ecogestaobrasil.net>>. Acesso em 10 set 2018

AMBIENTE E ENERGIA. **Meio ambiente, (2015)**. Disponível em:
<<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/category/alternativas>>Acesso em 10 out. 2017.

ANTÔNIO, T. F. **Análise e Aproveitamento do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto**. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista,2008.

ANÁLISE TÉCNICA E REGULATÓRIA DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS NO ESPÍRITO SANTO,2017. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/> CONCEITO PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS DE BIOGÁS. **Coletânea de publicações do PROBIOGÁS (2016)**. Disponível em: < <http://www.fatma.sc.gov.br>> Acesso 14 mar.2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2018). **Relatório de acompanhamento da implantação de empreendimentos de geração**. Disponível em <: <http://www.aneel.gov.br>> Acesso em 05/dez/2018.

AZEVEDO, G. J. de. **A Cogeração de sua inserção no Sistema Elétrico**. Tese (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília,2006. Acesso em: 28 out.2017.

ARAÚJO, FEROLDI, BARBIAN (2014). **Uso do Biogás em máquinas térmicas**.Disponível em:< <http://www.dca.uem.br>> Acesso em : 10 mar 2019.

BARJA, Gabriel de J.A (2006). **Aspectos regulatórios na Qualificação de Cogeneradores e na Geração distribuída.**In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA. Rio de Janeiro.

BEN (2010) – **Balço energético Nacional – Sumário executivo – Ano base 2009. Elaborado pelo MME- Ministério de Minas e Energia e pela EPE – Empresa de pesquisa energética.**

BORBA,S.M. **Análises de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado.** Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ,2006.

BRAGA,Eduardo (2014). **Estudo de Ampliação de Extração de vapor e de aumento de eficiência energética de uma termelétrica.** Disponível em <: monografias.poli.ufrj.b> Acesso em : 06 mar 2019.

BRANDÃO, S. S. (2004) **Produção e Planeamento de Energia Elétrica. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade de Coimbra.**

CARNEIRO, Roberto. TEIXEIRA, Leandro. VELAME, Jailda Lima. MARTINS, Luís. (2016). **Análise da viabilidade econômica e financeira da implantação de usina de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no município de Santo Antônio de Jesus – BA.** Disponível em:< www.relise.eco.br/index.php/relise/article/view/76> Acesso em 03 jan 2019.

CAMPOS, Yara. MARTINS NETO, Francisco (2017). **Viabilidade Do Uso De Biogás Como Fonte De Energia Renovável Em Aterros Sanitários.** Disponível em <: https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/cidades_verdes/>Acesso em:02 fev 2019.

CARVALHO, Fabiano da Rosa (2016). **Crítérios de racionalidade energética na qualificação de centrais cogadoras – Nota Técnica nº. 001/2000-SFG/ANEEL.** Brasília: ANEEL.

CARVALHO, Fabiano da Rosa (2000). **Crítérios de racionalidade energética na qualificação de centrais cogadoras – Nota Técnica nº. 001/2000- SFG/ANEEL.** Brasília: ANEEL.

CANDIANI,Gioavano. SILVA, Marcus Roberto (2011). **Análise do biogás no aterro sanitário Caieiras.** Disponível e <: www.uel.br/revistas/uel/> Acesso em: 05 mar.2019

CARVALHO, VENTURINI, NASCIMENTO, ANDRADE, SILVA (2007). **Microturbinas a Gás, motores de stirling e células a combustível, Geração distribuída.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br>

CARLOS, G.G. **Análise de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás.** Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Automação, 2014.

CASTRO DE FÉLIX, EUSTÁQUIO AMARO, VITAL .**2o CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS.** Disponível em < <http://www.portalabpg.org.br>> Acesso em : 10 mar 2019

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** McGraw-Hill, 5. ed., 2007.

CENBIO (2007) **Centro Nacional de Referência em Biomassa. Relatório de Atividades – Visita a Aterros Sanitários.** Projeto: Aproveitamento do Biogás Proveniente do Tratamento de Resíduos

Sólidos Urbanos para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Inventário Nacional de emissões de Metano pelo manejo de resíduos – 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br> Acesso em: 09 mar de 2019.

CÔMITE BRASILEIRO DO CONSELHO MUNDIAL DE ENERGIA (2001). Dicionário de terminologia energética. Disponível em <: <http://www.finep.gov.br>> Acesso em 02 fev 2019.

COGEN EUROPE (2001). Educogen - An educational tool for cogeneration. 2ª ed. Brussels, Belgium: COGEN Europe.

COELHO, S.T. (2006). A conversão da fonte renovável biogás em energia. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio.** Disponível:< <https://revistas.unicentro.br>> Acesso em : 10 mar 2019.

DANIELETTO, J. R. Manual de Tubulações de Polietileno e Polipropileno. São Paulo: Linha Aberta, 2007.

ESSENCIS SOLUÇÕES AMBIENTAIS S.A. (CTRCAIEIRAS). Relatório Ambiental da CTR-Caieiras, Caieiras, 2008.

FARIA, Mário (2011). Biogás produzido em aterros sanitários – Aspectos ambientais e aproveitamento do potencial energético. Disponível em < https://www.al.sp.gov.br/repositorio/bibliotecaDigital/20926_arquivo.pdf> Acesso em 02 fev 2019.

FERREIRA, Thalles. (2011). Projeto termodinâmico de aterros sanitários para geração de energia. Disponível em <:<http://sites.poli.usp.br>>.15 mar.2019

FIGUEIREDO, J. C. (2012) Estimativa de produção de biogás e potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em Minas Gerais. Dissertação de Mestrado - 138f . Belo Horizonte, MG, Brasil. Disponível em:< <https://periodicos.ufsm.br>> Acesso em: 19 fev 2019.

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, 2015. Disponível em:<www/asset_publisher/geracao-distribuida>. Acesso em: 28 out.2017.

GESTÃO AMBIENTAL E NEGÓCIOS NO SETOR ENERGÉTICO NO INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2017. Disponível em: < <https://www.al.sp.gov.br>> Acesso em: 05 mar.2019

GTI. Geomembrane Technologies INC. Disponível em <: <http://www.gticonsult.com/pt/produto/coberturas-flutuantes/gasometros>>

GOMES DIAS, Jorge Luiz (2009). Ciclo de Otto: Aplicação teórica e utilidade prática. Disponível em: < <https://semanaacademica.org.br>> Acesso em : 10 mar 2019.

HAMILTON,S.L (2003). **Microturbine Generator Handbook. Pennwell corporation.**

HIRANO YUKIO,Marcio (2015). **Geração de energia por microturbina alimentada a biogás em uma propriedade rural.** Disponível em:< <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/132611>> Acesso em : 10 fev 2019

HIRANI, E. W.; MAMANI, L. A. G. Algoritmos Evolucionários para Otimização Multi-objetivo no Projeto de Sistemas Térmicos, 2007.Disponível em <http://www.das.ufsc.br/~gb/pg-ic/multiGA/DAS%206652%20-%20Apresenta%E7%E3o.ppt#256,1,Slide1>.

IMBELLONI, Rodrigo. **Gás de aterro sanitário.** Disponível em: <http://stemacenergia.com.br/gás>. Acesso em: 20 fev 2019.

ICLEI. **Governos locais pela sustentabilidade. Manual para aproveitamento do biogás.Volume I – Aterros Sanitários 2009.** Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha12/manual.pdf>> Acesso em : 05/10/2018.

KELMAN, G. **Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.** (2016).

Disponível

em:<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/003/documento/minuta_resolucao.pdf> Acesso em: 25 out.2017.

MACEDO,Laura. JOHNSTON,Guilherme. CORDARO,Maria. TÓTTI, Patricia. PECÓRA, Vanessa. BARBI,Fabiana. KRANZ, Patrícia. (2009). **Manual para aproveitamento do biogás.** Disponível em <: <http://www.resol.com.br>>. Acesso em: 28 out.2017.

MACHADO, Deise Oliveira (2014).**Análise do desempenho de um motor ciclo de Otto com biogás.** Disponível em: < <http://www.repositorio.jesuita.org.br>> Acesso em: 15 mar 2019

MATRIZ ENERGÉTICA. **Eletrobrás, (2014).** Disponível em:

<www.brasil.gov.br/meioambiente/2010/11/matrizenergetica>Acesso em 20 out.2017.

MANUAL PARA APROVEITAMENTO DO BIOGÁS. **Governos locais pela sustentabilidade,2011.** <http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf> Acesso em: 05 mar.2019.

MAZZUCHI, O.A.J (1980). **Biodigestor rural.** São Paulo, CESP,1980. 29p

MARTINELLI, L. C.(2002) **Máquinas Térmicas II. Pinambi: DeTEC,135p.**

MARTINS, Luís. TEIXEIRA, Leandro. Carneiro, Roberto, SILVA,A. (2017). **ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA DA IMPLANTAÇÃO DE USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO MUNICÍPIO DE SANTO ANTÔNIO DE JESUS – BA.** Disponível em <:www.relise.eco.br> Acesso em 15 mar 2019.

MENEGUIN, F. O (2016). **que é o mercado de carbono e como ele opera no Brasil?** Disponível em: <http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/08/13/o-que-e-o-mercado-de-carbonoe-como-ele-opera-no-brasil/>. Acesso em 16 de mar de 2019.

Ministério do meio Ambiente (2012). Disponível em <: <http://www.mma.gov.br/>>

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). (2011). **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no Mundo.** Disponível em www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215186.pdf. Acesso em 03.mar.2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2008). **PORTARIA No 21, DE 18 DE JANEIRO DE 2008.** Disponível em <: <http://www.mme.gov.br>>.

Ministério de Minas e Energia . **Aproveitamento do biogás em aterro sanitário.** Disponível em <: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustetaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos>>. Acesso: 05/jan/2019.

MONTAGNA, Tainara Bruna (2013). **Biogás Produzido em aterro sanitário como fonte de energia: uma revisão bibliográfica.** Disponível em: < <tps://semanaacademica.org.br>> Acesso em: 05 mar.2019.

MONTEIRO,C. (2004). **Microturbinas. Produção e Transporte de Energia II. LEEC – Faculdade de Engenharia da FEUP.** Disponível em:< http://paginas.fe.up.pt/~fmb/PTE2/Apontamentos%20PTE2/PTE2_Microturbinas.pdf>

NATALIE, J.V. **Utilização de Aterro Sanitário Para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso.** Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo,2011. 20 jan.2019

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; CARVALHO, Fabiano da Rosa; TEIXEIRA, Flávio Neves et al. (2004). **Disseminação de Informações em Eficiência Energética – Cogeração.** Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, R. D (2009). **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono. 2009. 79p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos.** Disponível em :< <http://www.dca.uem.br>>

ORLANDO, A.F .RAMOS,M.M. ARAÚJO,J.V. **Cogeração com microturbina para produção de energia elétrica e água quente.** Disponível em <:<http://www.mfap.com.br>>

PANORAMA DE RESIDUOS SÓLIDOS NO BRASIL. **Abrelpe,2016.**

Disponível em:< <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>Acesso: 12 out.2017.

PAZIN,A. Acervo Técnico,2007.

PECORA, V. G.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. **Aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica em São Paulo. Estudo de caso.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. 7., 2010, São Paulo. Anais... São Paulo: USP, 2010. P. 1249-1261.

PROPOSTA DE UM MÉTODO ESCALONADO PARA A MOTORIZAÇÃO DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS GERADO POR ATERROS SANITÁRIOS. **Repositório UNIFEI (2015).** Disponível em: < <https://repositorio.unifei.edu.br>>

PROINFA – **PROGRAMA DE INCENTIVO ÀS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA.** Disponível em <: <http://www2.camara.leg.br/acamara/altosestudios/seminarios/energiasrenov/custodio2.pdf>. Acesso em 12 de fev de 2018.

PULKRABEK,W.W.(2004).**Engineering fundamentals of the internal combustion engine.** New jersey, EUA: Pearson Prentice Hall,2004.

RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA,2017. **Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético.** Disponível em:< <http://www.mme.gov.br/documents>> Acesso 18 out.2017.

RESIDUOS SÓLIDOS CLASSIFICAÇÃO. **ABNT NBR 10004 (2004).** Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/download> >Acesso 18 out.2017.

RELATÓRIO ENERGÉTICO NACIONAL. **BEN, (2016).** Disponível em:< <http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>Acesso em 17 out.2017.

REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. F. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável.** 2. ed. São Paulo: Manole 2012. Acesso em: 20 fev 2019.

SANTOS, Ivan Felipe (2015). **Proposta de um método escalonado para motorização do Aproveitamento do biogás gerado por aterros sanitários para fins de Geração de energia elétrica.** Repositório UNIFEI. Disponível em:< <https://repositorio.unifei.edu.br>>

SHAPIRO, M. J (2007) MORAN, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** São Paulo: LTC.

SANTANA, Neila dos Santos (2009). **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de madre de Deus.Bahia.** Disponível em :< <http://portal.ftc.br/bioenergia/dissertacoes>>Acesso em 10 mar.2019.

SARAIVA, Amanda. BORGES, Catarina. GOMES,Felipe.LEAL,Ludmilla. COLTURATO,Luis Felipe.JENDE, Óliver.ROSENFELDT,Sebastian. **CONCEITOS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS DE BIOGÁS.** Disponível em <: www.fatma.sc.gov.br>

SILVA,Ginaldo. ALVES,Antônio.CAVALCANTE, Marcio. (2013). **Lixo Urbano: Uma análise desse problema social.** Disponível em :< <http://eventos.ecogestaobrasil.net>>. Acesso em : 10 jan 2019.

SOUZA, Antônio. ROMERO, José (2015). **2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás.** Disponível em :< <http://www.portalabpg.org.br>> Acesso em: 15 nov 2018

SERAVAL,Tathiana.DORNFELD,Thiago.SIQUEIRA,Valdilene.PEREIRA,Witan. **CONCEITOS PARA O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE USINAS DE BIOGÁS.** Disponível em <: www.fatma.sc.gov.br>

SILVA, Filho. (2013). **Em 20 anos, Brasil poderá gerar 280 MW de energia do lixo.** Disponível em <: <https://www.oeco.org.br>>. Acesso em : 20/12/2018.

SOUZA, Samuel Nm de; HORTTANAINEN, Mika; ANTONELLI, Jhonatas. **Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment.** *Waste Management & Research*, v. 10, n. 32, p.1015-1023, 2014.

SILVA JUNIOR, Antônio Costa. **Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): promotores de transferência de tecnologia e tecnologias mais limpas no Brasil.** Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial – PEI, 2011, Faculdade Politécnica, Universidade Federal da Bahia.

TILLMANN, Carlos Anônio (2013). **Motores de combustão interna e seus sistemas.** Disponível em <: <http://estudio01.proj.ufsm.br>>. Acesso em: 20 jan.2019.

TERMOVERDE Salvador. **Visita Técnica. Grupo Solvi. Rua Romã do CIA, Aeroporto, 6 – Fazenda Cassange, Salvador – BA, CEP: 41.505 – 630. Tel.: (71) 2108-0080.** Disponível em:< <https://periodicos.ufsm.br>> Acesso em: 19 fev 2019.

UNITED STATES CENSUS, 2015. Disponível em:<https://www.census.gov/2015censustests>>Acesso 10 out.2017.

VITORATTO, E. **Tratamento de efluentes líquidos orgânicos – Sistemas anaeróbios.**