

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

KAYRO MASSAYUKI DA SILVA TANAKA
LUCAS AUGUSTO LACERDA

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO
APROVEITAMENTO DE GASES PROVENIENTES DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS ORIUNDOS DE ATERROS SANITÁRIOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

KAYRO MASSAYUKI DA SILVA TANAKA
LUCAS AUGUSTO LACERDA

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO
APROVEITAMENTO DE GASES PROVENIENTES DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS ORIUNDOS DE ATERROS SANITÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do grau de engenheiro eletricitista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen

CURITIBA
2015

Kayro Massauyki da Silva Tanaka
Lucas Augusto Lacerda

Geração de energia através do aproveitamento de gases provenientes de resíduos sólidos urbanos oriundos de aterros sanitários

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de dezembro de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Paulo Cicero Fritzen, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Álvaro Augusto Waldrigues de Almeida, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

TANAKA, Kayro Massayuki da Silva; LACERDA, Lucas Augusto. **Geração de energia elétrica através do aproveitamento de gases provenientes de resíduos sólidos urbanos oriundos de aterros sanitários**. 2015. 72 fl. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O crescimento da demanda por energia elétrica é inerente ao progresso da humanidade, e no Brasil a geração de energia é predominantemente a partir de usinas hidroelétricas, porém barreiras impostas por leis ambientais e perdas decorrentes das distâncias dos centros consumidores, faz com que se projete um declínio de novos empreendimentos nos próximos anos, assim, busca-se cada vez mais o aumento da geração distribuída. Fontes alternativas a partir biomassa e biogás vêm com uma complementação da matriz energética brasileira e torna-se uma importante alternativa neste cenário. Através do método de cálculo apresentado no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (1996) estimou-se a capacidade de geração de metano, com base na quantidade de resíduos sólidos depositados no aterro sanitário que atende Curitiba e região, após o cálculo estimou-se a potência e energia a ser gerada em um horizonte até 2046. Os resultados apresentados foram satisfatórios e representam um importante potencial de geração de energia elétrica, gerado a partir de uma fonte que atualmente está sendo desperdiçada.

Palavras-chave: Geração distribuída. Biogás. Aterro Sanitário.

ABSTRACT

TANAKA, Kayro Massayuki da Silva; LACERDA, Lucas Augusto. **Electrical energy generation through good use of gases proceeding from urban solid residues from landfill sites.** 2015. 72 pages. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The growth of the need for electrical energy is intrinsic to mankind's progress. In Brazil, the generation happens mainly in hydroelectrical dams. However, barriers raised by environmental laws and recurring losses in the distances from consumer centers projects a decline in new businesses in the coming years. Therefore, it grows the interest in distributed generation. Alternative sources based on biomass and biogas appears as a complement in the Brazilian energy matrix and to become an important alternative in this scenario. Through the calculation method presented in the Intergovernmental Panel on Climate Change (1996), the methane generation capacity was estimated, based on the quantity of solid residues deposited in the landfill site that serves the Curitiba region. After the calculation, it was estimated the power and the energy to be generated in a time span until 2046. The results were satisfactory and shows an important electricity generation potencial, generated from a source that is currently being wasted.

Key-words: Distributed generation. Biogas. Landfill site.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Destino final dos resíduos sólidos por unidades de destino (%)..	11
Figura 2 – Portaria principal do aterro.	12
Figura 3 – Preparação do solo para recebimento de resíduos.	13
Figura 4 – Área já utilizada para deposição de resíduos	14
Figura 5 – Tanques de armazenamento de chorume	15
Figura 6 – Histórico da capacidade instalada de energia elétrica no Brasil..	17
Figura 7 – Histórico do Potencial Hidráulico Brasileiro	17
Figura 8 - Modelo Triangular de produção de biogás	24
Figura 9 - Geração de RSU	26
Figura 10 – Ciclos de trabalho de um motor de ciclo Otto	30
Figura 11 – Diagrama esquemático do ciclo aberto simples	33
Figura 12 – Representação do ciclo aberto simples no diagrama entrópico	34
Figura 13 – Diagrama esquemático do ciclo aberto com regeneração	34
Figura 14 – Diagrama esquemático ciclo aberto com regeneração e refrigeração	35
Figura 15 – Diagrama esquemático com turbina de potência em eixo separado	36
Figura 16 – Diagrama esquemático ciclo fechado	37
Figura 17 – Esquema de funcionamento caldeira a vapor.....	39
Figura 18 – Modelos de geradores a gás da Stemac	44
Figura 19 - Representação da Vazão do Metano por Hora [m ³ /h]	51
Figura 20 – Gráfico da potência gerada em MW	53
Figura 21 – Gráfico da energia em KWh/mês.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Graviométrica Média dos RSU no Brasil	26
Tabela 2 – Principais fabricantes de Microturbinas a gás.....	38
Tabela 3 – Modelos de grupos geradores Caterpillar para utilização do biogás	41
Tabela 4 – Modelos de grupos geradores Cummins	42
Tabela 5 – Características da série QSK60 de geradores Cummins	42
Tabela 6 –Valores de FCM.....	46
Tabela 7 – Valores dos Coeficiente para Cálculo do DOC	46
Tabela 8 –Valores sugeridos de k	48
Tabela 9 – Histórico de deposição de resíduos.....	49
Tabela 10 – Vazão de Metano por Hora.....	49
Tabela 11 – Potências geradas em MW	52
Tabela 12 – Energia gerada em KWh/mês.....	54
Tabela 13 – Comparação das tecnologias de conversão	56
Tabela 14 - Proteções mínimas para conexão de geradores convencionais no sistema 13,8 kV	60
Tabela 15 – Proteções mínimas para conexão de geradores convencionais no sistema 13,8 kV	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE	Empresa Nacional de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SEP	Sistema Elétrico de Potência
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
GNV	Gás Natural Veicular
SIN	Sistema Interligado Nacional
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
PNE	Plano Nacional de Energia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
CGR	Centro de Gerenciamento de Resíduos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
NTC	Normas Técnicas Copel
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
COD	Centro de Operações de Distribuição

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Delimitação do Tema.....	11
1.1.1 Local de Estudo.....	12
1.2 PROBLEMA.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo Geral.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
1.4 JUSTIFICATIVA.....	18
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 HISTÓRICOS DO BIOGÁS.....	23
2.2 FORMAÇÃO DO BIOGÁS.....	23
2.3 CARACTERÍSTICA DO BIOGÁS.....	24
2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	25
2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	27
3. ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
3.1 Motores de Combustão Interna de ciclo Otto.....	30
3.2 Turbinas e microturbinas a gás.....	32
3.2.1 Ciclo aberto.....	32
3.2.1.1 Ciclo aberto com regeneração.....	34
3.2.1.2 Ciclo aberto com regeneração e refrigeração.....	35
3.2.1.3 Ciclo aberto com turbina separada e dois eixos.....	36
3.2.2 Ciclo fechado.....	36
3.3 Microturbinas a gás.....	37
3.4 Turbinas/Caldeiras a Vapor – Cogeração.....	39
3.5 Grupos Geradores.....	40
4. ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO ATERRO SANITÁRIO.....	45

4.1	Determinação da produção de metano.....	45
4.2	Determinação da potência e energia gerada	51
4.3	DEFINIÇÃO DA MELHOR TECNOLOGIA A SER UTILIZADA.....	55
5.	ESTUDO DAS NORMAS DA CONCESSIONÁRIA LOCAL PARA INJEÇÃO DO EXCEDENTE GERADO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	57
5.1	Geração Distribuída COPEL.....	57
5.2	NTC 905100 - Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel (com comercialização de energia).....	58
5.3	Resolução Normativa nº 482 - ANEEL	62
5.4	NTC 905200 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel (com compensação de energia)	63
6.	CONCLUSÃO.....	66
6.1	Considerações.....	66
6.2	Sugestão para Trabalhos Futuros	67
7.	REFERÊNCIAS	68

1. INTRODUÇÃO

Quando a energia elétrica foi descoberta, se tornou indispensável para a humanidade. Ela é utilizada de várias formas e seu consumo vem crescendo ao passar dos anos devido ao aumento das cargas, tanto residencial quanto comercial e industrial. As fontes alternativas de energia como, eólica, solar, biomassa e biogás vem para somar e tirar um pouco da carga de responsabilidade do maior potencial de geração na atualidade, que são as usinas hidroelétricas. As perdas de energia, os custos ambientais, e a grande distância da geração de energia até os centros consumidores, vêm estimulando a regulamentação e os investimentos em fontes alternativas e a diminuição da distância até o seu uso final (O Setor Elétrico, 2014).

A energia elétrica é crucial para que um país possa se desenvolver e oferecer qualidade de vida para sua população. Quanto mais um país se desenvolve, mais surge a necessidade de aumentar a produção de energia. Atualmente o meio energético responsável pela maioria da demanda no Brasil, sofreu crise por falta de chuvas. Por isso, além de ampliar a capacidade de geração de energia elétrica melhorando o aproveitamento de fontes convencionais, também é necessário desenvolver tecnologias para a utilização de novas fontes energéticas, as chamadas fontes alternativas de energia (ELETROBRAS, 2014).

A intensificação das atividades humanas nas últimas décadas gerou um acelerado aumento na produção de resíduos, tornando um grave problema para as administrações públicas. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE de 2008, metade dos mais de cinco mil municípios brasileiros destinam seus resíduos para lixões. Devido a esse fato, foi retomada a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estava há 20 anos em trâmite no Congresso Nacional. Essa política tem como objetivo regulamentar a destinação final desses resíduos que reúne princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes que os agentes públicos devem seguir (MMA, 2014). A figura 1 mostra a tendência de crescimento dos aterros sanitários e a diminuição dos esgotos a céu aberto, isso mostra que o potencial energético dessa fonte de energia tende a crescer ao decorrer dos anos, gerando um grande interesse das empresas em estudos que visam o aproveitamento dessa energia, que hoje é muito pouco utilizada devido aos baixos incentivos.

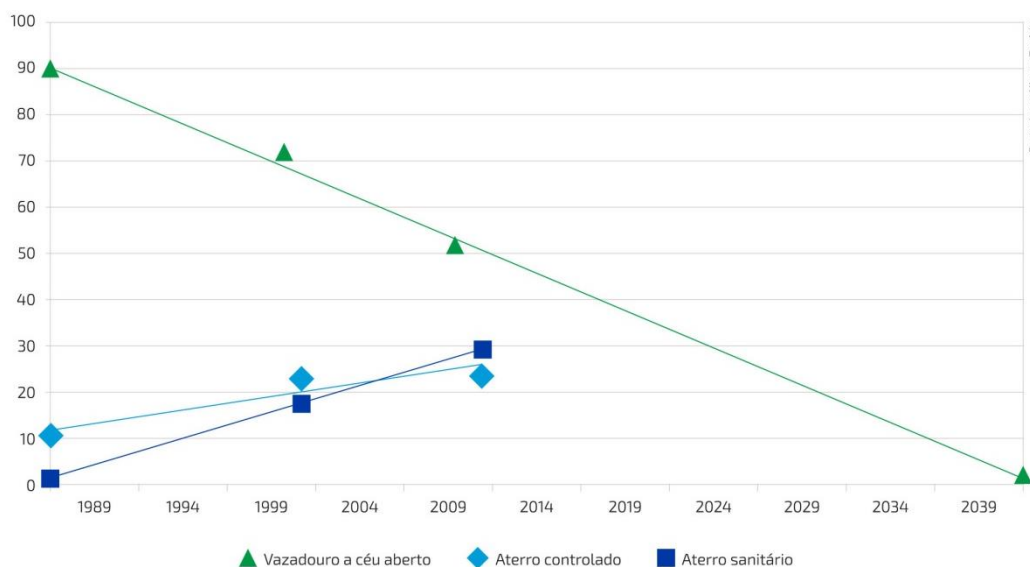


Figura 1 – Destino final dos resíduos sólidos por unidades de destino (%)

Fonte: Caderno Globo Universidade *apud* Tenório, 2012

Com esse novo marco regulatório, os lixões começaram a desaparecer dando lugar a aterros sanitários. Começa a surgir uma expectativa positiva em relação à demanda de energia elétrica proveniente de biogás, pois os aterros são lugares que podem ser adaptados para essa fonte de geração de energia, diferentes dos lixões que não possuem estrutura para esses fins.

TEMA

Geração de energia elétrica através do aproveitamento de gases provenientes de resíduos sólidos urbanos oriundos de aterros sanitários.

1.1 Delimitação do Tema

O presente trabalho terá como tema principal, a análise de viabilidade técnica para a geração de energia elétrica a partir da utilização de biogás, proveniente do aterro sanitário que recebe os resíduos sólidos da cidade de Curitiba e região metropolitana. Ainda serão definidas as normas da Copel, para que o excedente da geração seja injetado na rede da concessionária local.

1.1.1 Local de Estudo

O centro de gerenciamento de resíduos CGR – Iguaçu, pertence e é gerenciado pela empresa ESTRE, considerada a maior empresa de serviços ambientais do Brasil, conta com unidades em todo território nacional e ainda na Argentina e Colômbia. O CGR Iguaçu está localizado no município de Fazenda Rio Grande, região metropolitana de Curitiba, conta uma área total de 267,5 hectares dos quais 62 hectares serão utilizados para alocar toda a estrutura de tratamento e disposição de resíduos sólidos. Mensalmente tem capacidade de recebimento de 75000 toneladas de resíduos classes II-A e II-B, categorias que serão explicadas adiante, seu quadro de colaboradores conta com 60 pessoas, sendo 29 residentes no próprio município. Em fase de implantação está uma estação de tratamento de efluentes, na qual todo o chorume resultante do aterro será destinado, e uma estação de biorremediação para recebimento de solos contaminados.

Atualmente a unidade conta com um sistema de captação de chorume e biogás através de tubos de PEAD de alta densidade, que transportam o gás até *flares* onde manualmente operários iniciam a queima 2 vezes por turno, sendo 3 turnos diários. A estimativa de vida útil é de 20 anos, com mais 20 anos de produção de biogás.



Figura 2 – Portaria principal do aterro.

Fonte: Estre, 2015.

A figura 2 mostra a portaria do aterro sanitário da Fazenda Rio Grande. A foto mostra a organização da empresa e também se torna evidente a não poluição visual do bairro em que foi instalada essa companhia.



Figura 3 – Preparação do solo para recebimento de resíduos.

Fonte: Estre, 2015.

O lançamento da película de geotêxtil de espessura de 50 a 70 mm que serve para revestir o solo para que o chorume não o atinja e seja recolhido para ser feito o tratamento, o que mostra a figura 2.



Figura 4 – Área já utilizada para deposição de resíduos

Fonte: Estre, 2015

A figura 4 demonstra as camadas do aterro sanitário que já receberam resíduos e acabamento. Cada camada possui aproximadamente 5 metros, sendo composta por 4 metros de resíduos compactados e 1 metro de terra do próprio terreno ou de fontes externas. A compactação faz com que se aumente a densidade e consequentemente a produção de biogás por unidade de volume, já a cobertura tem a finalidade de impedir a infiltração de águas pluviais e oxigênio, agentes que retardam o processo de decomposição anaeróbica (FIGUEIREDO, 2011).



Figura 5 – Tanques de armazenamento de chorume

Fonte: Estre, 2015

Os tanques da figura 5 são responsáveis pelo armazenamento do chorume captado no aterro pois a estação de tratamento do resíduo ainda está em fase de construção, após o término da obra, o chorume captado pela unidade será tratado internamente, reduzindo custos para a organização.

1.2 PROBLEMA

No Brasil, as hidrelétricas são as maiores responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica. Caracterizada como energia renovável por utilizar a queda da água como fonte primária, esta fonte foi responsável pela ordem de 64,34% da geração em 2015, porém com o passar dos anos este percentual está tendo uma leve queda, decorrente de limitações socioambientais, para o horizonte de 2030 é previsto uma participação de 70%. No mundo, atualmente as hidrelétricas são responsáveis por aproximadamente 18% da produção de energia elétrica. Esses dados só não são maiores pelo fato de poucos países apresentarem as condições naturais para a instalação deste tipo de usina (ANEEL, 2015).

Apesar de ser uma fonte de energia renovável e não emitir poluentes, a energia hídrica não está isenta de impactos ambientais e sociais. A inundação de áreas para a construção de barragens gera problemas para as populações ribeirinhas, comunidades indígenas e pequenos agricultores. O represamento da água para a formação de lagos artificiais causa destruição de extensas áreas de vegetação natural, matas ciliares, desmoronamento das margens, prejuízos à fauna e flora locais. (INATOMI; UDAETA, 2015).

Ainda segundo Tolmasquim, o potencial hidrelétrico disponível para ser explorado no Brasil está caracterizado por estar 60% presente na bacia amazônica onde há grande concentração de terras indígenas, reservas florestais e parques nacionais, provendo de estudos específicos e grandes desafios para o seu aproveitamento. Com relação a essa fronteira, estima-se uma queda em novos empreendimentos para utilização desta fonte e em contrapartida, a energia térmica convencional (nuclear, a gás natural e a carvão mineral) deve apresentar um aumento em cerca de 15% em meados de 2030. Considerando o mesmo universo, as fontes renováveis não convencionais e não hídricas (biomassa da cana, centrais eólicas, e **resíduos urbanos**) devem também ter um aumento expressivo passando a contribuir com 4% na geração, estima-se ainda que as fontes térmicas deverão expandir-se mais de 5 vezes no período.

Para exemplificar as condições citadas são apresentadas as figuras 6 e 7, a primeira demonstra a evolução da capacidade instalada no Brasil no intervalo de 1974 a 2013, notando-se um aumento significativo nas fontes térmicas a partir de 2001 e

também um que mensura o comportamento do potencial hidráulico considerando recursos e reservas.

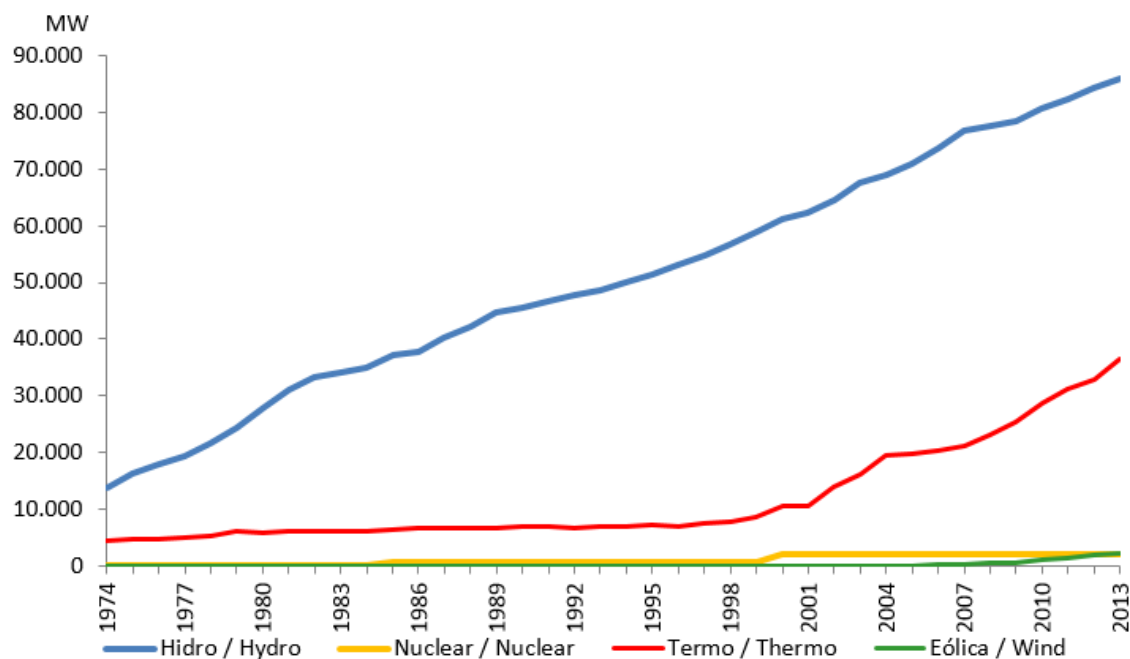


Figura 6 – Histórico da capacidade instalada de energia elétrica no Brasil

Fonte: MME, 2015

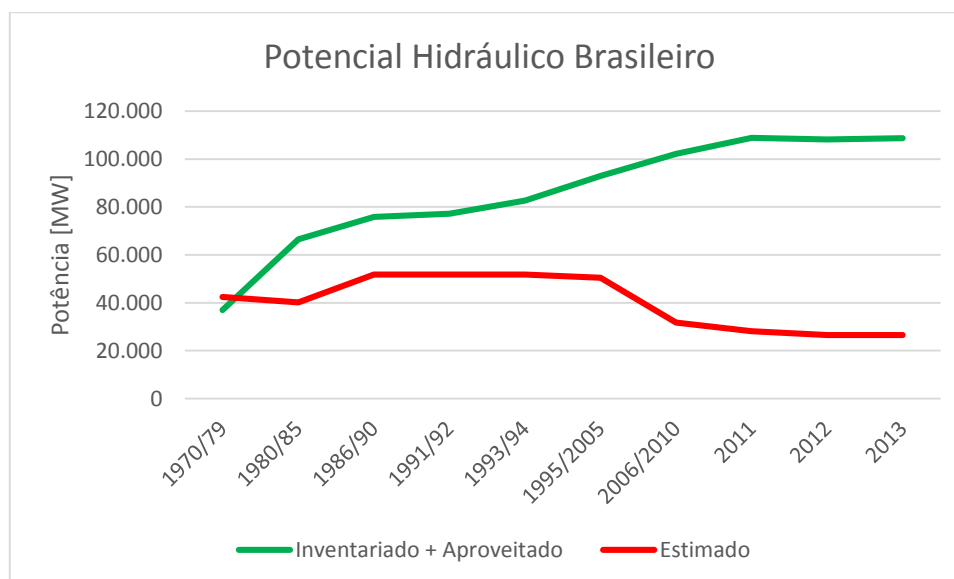


Figura 7 – Histórico do Potencial Hidráulico Brasileiro

Fonte: Adaptado de MME, 2015

A partir disso, surge à necessidade de se explorar novas fontes de energias renováveis que possam ter uma produção contínua e, que na maioria das vezes estão

sendo desperdiçadas quando poderiam estar gerando energia elétrica tanto para consumo próprio quanto vender o excedente para uma concessionária de energia, dependendo da demanda.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Objetivo deste trabalho é analisar a geração de biogás em aterros sanitários e utilizar tecnologia para converter em energia elétrica, posteriormente fazer um estudo com a finalidade de vender o excedente da energia gerada para concessionárias de energia elétrica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Verificar qual o volume de biogás produzido pelo aterro sanitário e analisar quais as condições deste para instalação de um sistema de captação de biogás;
- Realizar um estudo e identificar qual a melhor tecnologia disponível no mercado para fazer a conversão do material captado em energia elétrica;
- Fazer estudo para que essa energia seja vendida para concessionárias de energia elétrica.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os aterros sanitários e lixões são responsáveis por grande parte das emissões de gás metano (CH_4) na atmosfera, gás este que é 20 vezes mais nocivo que o dióxido de carbono (CO_2) e um dos grandes contribuintes para o efeito estufa (IMBELLONI, 2015).

No caso dos lixões e aterros sanitários, na maioria dos casos, ou o gás é eliminado na atmosfera ou queimado e do resultado da queima, joga-se CO_2 na

atmosfera. Sendo assim, há um desperdício de energia, já que a queima do gás não é utilizada para nenhum outro fim.

Neste trabalho serão apresentadas soluções para diminuir a poluição por emissões de gás metano aliada com a geração de energia elétrica por meio de uma fonte renovável, incentivando também o desenvolvimento do saneamento básico. Outra atribuição deste trabalho é a redução de energia vinda de fontes não renováveis.

Sancionada em 02 de agosto de 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) prevê a extinção de lixões a céu aberto através da substituição dos mesmos por aterros sanitários, além disso ela afirma uma política de reciclagem, reuso, compostagem, tratamento de lixo e coleta seletiva nos municípios. O primeiro prazo de regularização dos lixões foi estipulado para agosto de 2014, porém até tal data 60% não haviam sido regularizados. Em 01 de julho de 2015 foi prorrogado o prazo de adequação para datas que variam entre 2018 e 2021 de acordo com cada município. Com este novo plano para descartes de resíduos – que prevê multas de até 50 milhões de reais além de enquadramento em crimes ambientais – fica claro que em alguns anos a maioria das cidades brasileiras tenha a sua situação regularizada.

Assim sendo, a prospecção da aplicação deste trabalho é muito interessante, pois poderá servir de modelo para outros aterros em todo território nacional.

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 – PNE, a demanda de energia elétrica no país tende a aumentar nos próximos anos, acompanhando as projeções de crescimentos em outras áreas, em um cenário de menor crescimento cerca de 3,5% a.a. e no cenário de maior 5,1% a.a. isso representa que o país precisará gerar muito mais energia em um futuro próximo (EPE 2014).

Outras fontes de energias renováveis (excluindo as hidrelétricas) apresentam uma pequena contribuição para o sistema. Com o modelo atual, o país se torna extremamente dependente das chuvas, caso haja um período de seca e estiagem, uma crise energética se torna muito provável. Todos estes fatos sugerem e apontam, para um investimento forte e a longo prazo para o desenvolvimento de tecnologia e geração a partir de outras fontes renováveis, é preciso começar a investir na diversificação da matriz para que exista segurança e confiabilidade no futuro (WELLE, 2014).

A população mundial está em pleno crescimento, estima-se que hoje existam se 7,2 bilhões de pessoas no mundo, com um grau de urbanização de 70%, esses

números refletem o quão grande pode ser o potencial de geração de energia elétrica através de um aterro ou mais aterros sanitários no futuro. Com o destino correto para os resíduos sólidos urbanos e com níveis de reciclagem ideais, em um contexto mundial, a utilização correta 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).

Para estimar a quantidade de biogás que um aterro pode gerar e qual a sua composição, existe um modelo matemático do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - Waste Model*, desta forma, aplicando tal modelo, pode-se ter uma estimativa de qual a composição do biogás e a quantidade, para dimensionamentos das máquinas e processos a serem utilizados para desumidificar e queimá-lo de forma mais adequada.

O trabalho tem como foco principal há geração de energia através da captação de gases de resíduos sólidos urbanos provenientes de aterros sanitários. Devido à crise energética pela falta de chuva e o crescimento da demanda de energia elétrica para os próximos anos, começa a surgir uma preocupação por novas fontes de energia que sejam viáveis e sustentáveis para população. Em aterros sanitários a decomposição de material orgânico gera gases que são conhecidos como biogás, como esses gases são formadores do fenômeno conhecido como efeito estufa, eles são canalizados e posteriormente queimados, pois o resultado da sua combustão é menos prejudicial ao meio ambiente do que seu estado conservado. A pesquisa tem como objetivo analisar a viabilidade da geração de energia térmica através da queima do biogás em energia elétrica, tanto na parte de infraestrutura dos aterros, tempo de retorno financeiro do sistema, proporção de energia gerada em relação ao volume de gás e um estudo para venda da mesma para uma concessionária de distribuição de energia.

Recentemente a ANEEL incluiu pela primeira vez em seu leilão de energia de reserva, o biogás de origem dos resíduos sólidos vindos de centros urbanos e/ou biogás de aterro sanitário ou biodigestores de origem vegetal e animal e ainda iodo de estações de tratamento de esgoto, segundo o leilão os ganhadores terão que fornecer energia a partir de outubro de 2017. Esta iniciativa reforça a necessidade e a busca pela diversificação da matriz energética brasileira e a geração perto dos centros consumidores, reforçando também o biogás como uma fonte de energia forte, renovável e com qualidade. Segundo o superintendente de energias renováveis da

Itaipu, Cícero Bley Jr., o potencial de geração a partir desta fonte no Brasil pode chegar a 42.600MWh/ano, o que representaria 10% de toda a matriz energética nacional (ITAIPU, 2014).

Casos com geração de energia elétrica a partir de biogás de aterros sanitários já são realidade, um bom exemplo é a termelétrica Itajaí Biogás e Energia S/A que recebeu a aprovação da ANEEL para conectar o seu sistema ao SIN (Sistema Interligado Nacional) no dia 15 de maio de 2014 (via Diário Oficial da União). O empreendimento privado, gera energia a partir do aterro público municipal com a produção de biogás devido a resíduos sólidos de duas cidades catarinenses (PRAIA DE XANGRILA, 2014).

Esse estudo pode incentivar os empresários do ramo devido a possibilidade de um novo produto associado a sua empresa e a diminuição da sua conta de energia. A queima deste gás também pode disponibilizar água quente para ser feita a limpeza dos caminhões e diminuir o uso de produtos químicos.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A teoria deste trabalho será fundamentada em livros técnicos, artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos técnicos, que tenham como tema central a abordagem semelhante ao que será desenvolvido neste estudo. Além da parte teórica com forte embasamento na literatura atual, também serão realizadas visitas técnicas, com o objetivo de identificar o local a ser estudado, suas características construtivas, coleta de dados e o desenvolvimento de uma relação de cooperação, com a empresa responsável pelo aterro sanitário da cidade de Curitiba e região.

Após a coleta de dados será estudada e analisada qual a melhor tecnologia disponível no mercado e que possua maior eficiência para a instalação do conjunto máquina primária – gerador para a geração de energia elétrica.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 - Introdução com apresentação do tema proposto, problemas, objetivo geral, objetivos específicos, local de estudo, justificativa e metodologia.

Capítulo 2 – Apresentação da fundamentação teórica sobre a geração de biogás em aterros sanitários e sua destinação.

Capítulo 3 – Estudo das tecnologias disponíveis para a utilização do biogás para a geração de energia elétrica.

Capítulo 4 – Estudo do potencial de geração de energia elétrica do aterro sanitário.

Capítulo 5 – Estudo das normas da concessionária local para injeção do excedente gerado na rede de distribuição.

Capítulo 6 - Conclusão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICOS DO BIOGÁS

A geração de biogás proveniente da decomposição da matéria orgânica vem sendo estudada há vários séculos e ela possui outra função fundamental para o nosso planeta, a reciclagem de nutrientes. Estudos realizados com a decomposição mostrou que a utilização de resíduos orgânicos para geração de energia tem viabilidade econômica em algumas áreas que produzem esse gás. Em 1667, Shirley fez uma descoberta muito importante para os atuais estudos sobre a produção de metano (CLASSEN et al, 1999). Ele observou que quando ocorria a decomposição de matéria orgânica nos pântanos, gerava um gás, que no começo ele não tinha conhecimentos sobre a composição do mesmo. Por volta de 1776, quem começou a estudar esse fenômeno foi Alessandro Volta. Ele descobriu que esse gás tinha presença de metano. Ulysee Gayon, 1883, realizou a primeira fermentação anaeróbica, produzindo cerca de 100 litros de gás por metro cúbico de uma mistura de esterco e água. Já por meados de 1890, Van Senus estudou a decomposição anaeróbica e constatou que era realizada por vários microrganismos e isolou organismo que produziam hidrogênio, ácido acético e butírico, a partir da celulose. Chegou a seguinte expressão que o metano seria produzido a partir da redução do gás carbônico por hidrogênio, (SOARES, 2010).

2.2 FORMAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás é formado da degradação da matéria orgânica. Sua grande variedade de resíduos orgânicos tais como, lixo doméstico, esgoto, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, entre outros. Sua composição é formada por aproximadamente 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases com oxigênio, amônia, monóxido de carbono, gás sulfídrico, nitrogênio e aminas voláteis. Essas porcentagens variam dependendo do tipo de resíduo e eficiência do processo, podendo chegar entre 40% e 80% de metano.

A decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários ocorre por meio de dois processos. O primeiro durante a deposição de resíduos no solo tem início à

decomposição aeróbica e após a cobertura de resíduos, ocorre à redução de O_2 iniciando a segunda fase, chamada de decomposição anaeróbica.

A taxa de geração de biogás a partir da decomposição de resíduos varia ao longo do tempo. Considerando condições normais, essa taxa atinge valor máximo no primeiro ano, diminuindo continuamente por alguns anos, como é representado no modelo triangular de produção de biogás conforme Figura 8.

Após a grande parte de a matéria orgânica ser degradada, inicia-se a última fase do processo, fase de maturação. Como a umidade através da massa de lixo, e as partes que não degradaram acabam reagindo, diminuindo a taxa de geração do biogás, visto que a maior parte dos nutrientes foi consumida nas fases anteriores. A distribuição dos componentes orgânicos no solo irá diferenciar a duração de cada fase de produção do biogás (FIGUEIREDO, 2011).

Uma estimativa sobre a geração de biogás diz que um aterro continua produzindo este gás 20 anos após o seu encerramento (MMA, 2015).

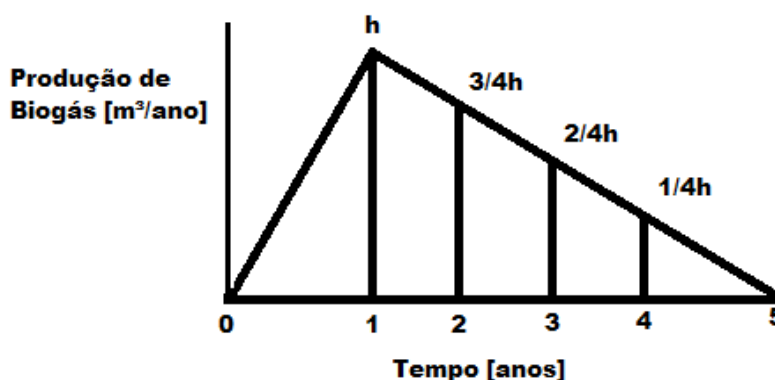


Figura 8 - Modelo Triangular de produção de biogás

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al.

2.3 CARACTERÍSTICA DO BIOGÁS

As características são obtidas através de algumas características como pressão, umidade, temperatura, concentração do gás metano e concentração dos gases inertes. Existe a presença de elementos que não são combustíveis em sua composição, como por exemplo, H_2O e o CO_2 , que acaba influenciando em sua eficiência, sendo que elementos podem consumir parte da energia gerada. Com isso

se conclui que, ha medida que a porcentagem desses elementos aumenta, o poder calorífico do biogás diminui.

O vapor de água na composição prejudica as instalações para sua conversão energética, depois de condensado se torna um agente corrosivo, enquanto o CO₂ ocupa muito volume, prejudicando a capacidade de armazenamento. O gás sulfídrico também coroe materiais metálicos, diminuindo a vida útil e eficiência dos equipamentos utilizados.

Com isso, um estudo para determinador a viabilidade da utilização do biogás como combustível, é levado em conta ha equivalência energética comparada com a do combustível que será substituído e também se existem contaminantes e outras substâncias citadas anteriormente. O biogás possui poder calorifico na faixa de 5.000 e 7.000 kcal/m³, se for considerado uma concentração de metano de 40 a 80%.

Outra situação é se utilizar o metano puro com um poder calorífico de 8.500kcal/Nm³, desta forma, 10% de CO₂ na composição do biogás representam cerca de 850 kcal/Nm³ a menos no poder calorífico.

2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O aumento desordenado da população e o crescimento sem planejamentos dos grandes centros urbanos prejudicam as ações de manejo dos resíduos, devido a falta de recursos, essas ações vêm sendo adiadas e acabam trazendo problemas de saúde e ambientais. Quando esses resíduos são deixados no meio ambiente de forma inadequada, causam problemas de poluição e perdas de matérias com potencial energético.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012), no ano de 2012 o Brasil produziu no ano anterior aproximadamente 62.730 milhões de toneladas de resíduos sólidos, cerca de 1,3% superior à quantidade produzida no ano anterior. Observando pelo lado da geração per capita de resíduos, no entanto, cresceu 0,4%. O país vem melhorando sua parte de coleta de resíduos, mas ainda tem muito que avançar nos próximos anos.

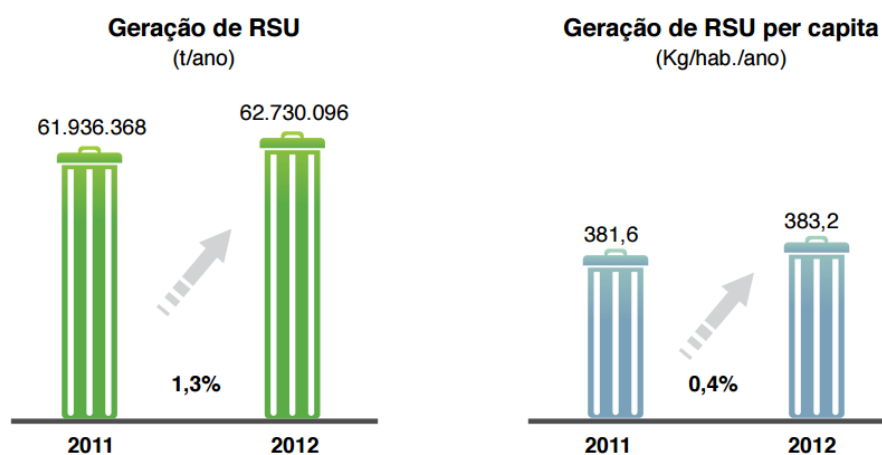


Figura 9 - Geração de RSU

Fonte: Pesquisas ABRELPE 2012 e IBGE 2012

Existe um método que permite visualizar de um modo geral a participação de diferentes materiais na fração total dos RSU chamado de composição gravimétrica média. Essa composição é bastante diversificada nas diferentes regiões, levando em consideração diferentes características, costumes e hábitos de descarte das populações locais (ABRELPE, 2012).

Tabela 1 - Composição Gravimétrica Média dos RSU no Brasil

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria Orgânica	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251
TOTAL	100,0	55.534.440

Fonte: Pesquisa ABRELPE 2012 e Plano Nacional de Resíduos Sólidos

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Pela normativa NBR 10.004 (ABNT,2004), denomina-se resíduos sólidos, os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, sua origem vem de atividades industriais, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola. Os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, gerados por instalações de controle de produção e líquidos que não podem ser descartados na rede pública de esgoto, estão inclusos também.

O Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, IBAM (2015) classifica os resíduos sólidos levando em consideração sua origem. Desta forma, os diferentes tipos de resíduos são:

- Lixo doméstico ou residencial;
- Lixo comercial;
- Lixo público – de varrição podas, feiras livres;
- Lixo domiciliar especial:
- Entulho de obra – pequeno gerador;
- Pilhas e baterias;
- Lâmpadas fluorescentes;
- Pneus.
- Lixo de fontes especiais;
- Lixo industrial;
- Lixo radioativo;
- Lixo de portos, aeroportos e terminais rodo-ferroviários;
- Lixo agrícola;
- Resíduos de serviços de saúde;
- Entulhos de grandes geradores.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) divide os resíduos sólidos e classes de acordo com sua periculosidade. Podem ser agrupadas nas cinco classes definidas abaixo:

Classe I – Perigosos

Classe II – Não perigosos

Classe II A – não inertes;

Classe II B – Inertes.

Resíduos Classe I – Perigosos são aqueles que possuem uma das seguintes características:

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

Resíduos Classe II A – Não Inertes são os tipos de resíduos que não encaixam nas classificações Classe I- perigosos ou Classe II B nos termos desta norma. Resíduos que possuem as propriedades, tais como: combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade em água. Para facilitar a compreensão, são citados alguns exemplos abaixo:

Resíduos de papéis e papelões;

- Sucata de metais ferrosos;
- Resíduos de plásticos polimerizados;
- Resíduos de restaurante.

Resíduos Classe II B – Inertes são os resíduos que, pela definição, quando submetidos a contatos estáticos ou dinâmicos com água destilada ou deionizada e temperatura ambiente, não infringirem os padrões de potabilidade de água com relação concentração elevada de constituintes solubilizados, padrões esses como, aspecto, cor, turbidez e sabor. Exemplos tais como, madeiras, resíduos de entulho, rochas, tijolos, vidros, certos plásticos e borrachas, que não são decompostos prontamente.

3. ESTUDO DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA A UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Segundo Antonie Laurent de Lavoisier, considerado o pai da química moderna, “Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma. ”, levando esta famosa frase em consideração, pode-se dizer que a conversão energética está ligada na transformação da energia de um combustível em uma outra forma para torna-la útil. Para a transformação do biogás em eletricidade, é preciso realizar uma conversão da energia química presente em suas moléculas, este processo pode ocorrer através de uma combustão controlada, em que o produto final será energia mecânica (cinética) que acionará um gerador ou alternador no qual através de seus princípios eletromagnéticos induzirá uma tensão em seus rolamentos, gerando assim energia elétrica.

Para esta conversão citada, existem variados métodos, tanto comerciais já presentes no mercado como também os acadêmicos e que estão em desenvolvimento, podendo estar presente no cotidiano daqui a alguns anos. Neste capítulo será tratado, explicado e demonstrado os principais e mais utilizados nos dias de hoje, entre eles destacam-se os motores de combustão interna, turbinas a gás, microturbinas e caldeiras a vapor.

A justificativa de utilizar a energia do biogás para a geração de energia elétrica se apresenta de várias formas e visões, uma delas por ser uma fonte de baixíssimo custo, já que este recurso advém de resíduos que precisam ser tratados e provocam um custo para o seu destino correto, além disso com a geração distribuída, ou seja, mais próxima da carga, perdas no sistema elétrico de transmissão são reduzidas e conseqüentemente representam um aumento de eficiência. Outros fatores como menores emissões de gases causadores do efeito estufa e possibilidades de ações publicitárias também são relevantes.

3.1 Motores de Combustão Interna de ciclo Otto

O motor de combustão interna começou a ser pensado em 1862 quando o físico francês Alphonse Beau de Rochas determinou quais as condições necessárias para que houvesse uma grande economia e eficiência, neste trabalho o físico chegou a descrever a sequência dos eventos para que estes motores tivessem o máximo de economia possível, já naquele tempo o que se pensava eram motores de 4 tempos, assim como são concebidos nos dias de hoje. Porém Rochas não chegou a desenvolver e construir nenhum motor de combustão interna, experimentalmente tal máquina foi construída em 1872 e terminada praticamente em 1879 por Nikolaus Otto, que foi quem definiu o ciclo teórico de trabalhos destes motores. Popularmente, estas máquinas começaram a serem chamadas de motores a combustão interna de ciclo Otto quando a empresa alemã Otto und Langen passou a fabricar motores 4 tempos de pistões móveis ligados a um virabrequim (PASSARINI, 1993, p.1.1).

Os motores a combustão interna ciclo Otto, como já descrito, possuem 4 tempos, nos quais aspiram uma mistura ar-combustível antes de comprimi-la e logo após a compressão, que ocorre no interior dos seus cilindros, há então a combustão iniciada por uma centelha produzida em uma vela de ignição, os detalhes de cada ciclo estão descritos na sequência. (SILVEIRA, 2015a)

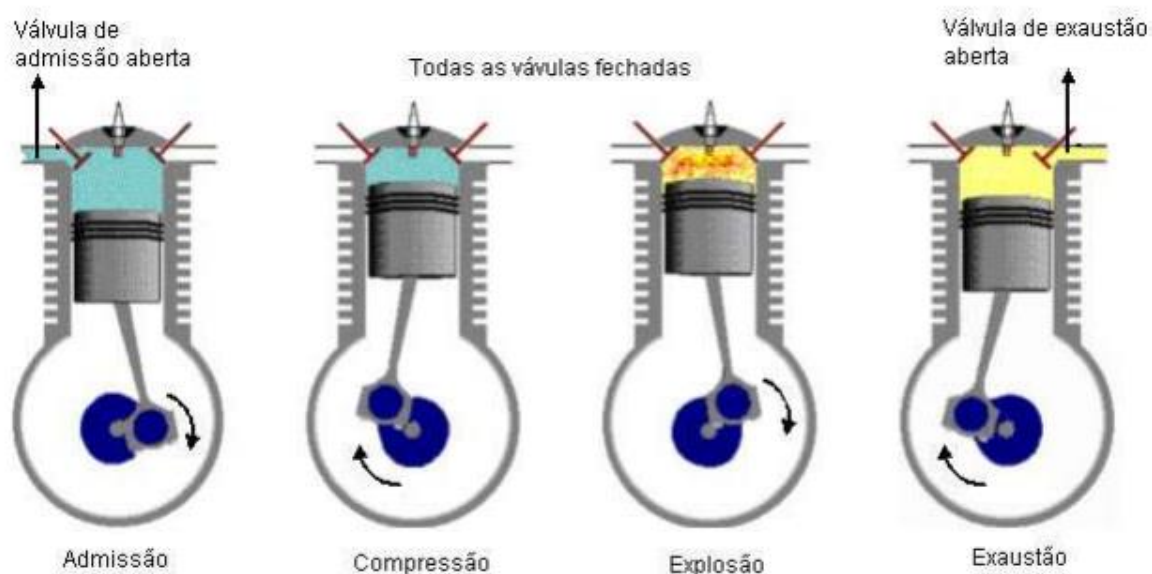


Figura 10 – Ciclos de trabalho de um motor de ciclo Otto

A Figura 3 demonstra graficamente um ciclo de trabalho ou as 4 etapas que ocorrem sequencialmente no motor de ciclo Otto, a mistura ar-combustível e os gases produto da combustão entram e saem dos cilindros através das válvulas de admissão e escape, respectivamente, estas são acionadas pelo eixo do comando de válvulas que é acionado pela árvore de manivelas, os 4 tempos são melhores descritos nos itens abaixo.

Primeiro tempo (Admissão): No primeiro tempo, o pistão movimenta-se para baixo, conforme a Figura 10 com a válvula de admissão aberta, a mistura de ar-combustível entra no interior do cilindro, nesta etapa a válvula de escape encontra-se fechada.

Segundo tempo (Compressão): Neste tempo, com as duas válvulas fechadas, o pistão desloca-se para cima, o que faz com que a mistura ar-combustível no interior do cilindro se comprima e se misture de forma mais eficaz, causando um aumento da temperatura do sistema. Antes do pistão atingir o seu ponto máximo, o sistema de ignição entra em ação, acionando a vela de ignição que produz uma centelha no interior do cilindro, com esta centelha, terá a combustão/queima da mistura fazendo assim que a pressão se eleve.

Terceiro tempo (Expansão): Com a queima da mistura e a pressão elevada no interior do cilindro, o pistão é “empurrado” para baixo, fazendo com que o mesmo se desloque, ainda com as válvulas fechadas. Nesta etapa é que a energia química contida no combustível transforma-se em energia mecânica (movimento), fazendo com o pistão mova o virabrequim.

Quarto tempo (Exaustão): Após a queima da mistura e a expansão, no interior do cilindro ainda restam os gases resultado da combustão, então a válvula de escape abre-se fazendo com que estes gases sejam expelidos para a atmosfera (MILHOR, 2002).

Geralmente em um motor de combustão interna, os quatro tempos citados funcionam e operam de forma contínua, logo para aumentar a eficiência dos motores, os engenheiros utilizam um determinado número de cilindros para que os mesmos trabalhem em sincronia, ou seja, para que quando uma parcela deles estiverem executando o movimento de compressão, a outra parcela esteja executando o movimento de expansão, desta forma consegue-se sempre ter em todo o domínio do tempo um pistão sofrendo a explosão e transformando a energia térmica em trabalho útil (LIMA, 2015).

A eficiência de um motor a combustão interna ciclo de Otto se dá em razão diretamente proporcional a sua taxa de compressão, ou seja, quanto mais se consegue comprimir a mistura ar-combustível, mais eficiente a máquina se torna, porém, um agravante desta característica é a temperatura em que a mistura pode chegar. Caso a compressão se eleve a níveis muito altos, a temperatura também se eleva proporcionalmente, o que pode fazer com que ocorra a autoignição, fenômeno que não é requerido durante o ciclo do motor, pois pode causar ondas de alta pressão, perdas de potência e danos (SILVEIRA, 2015b).

Motores estacionários também podem utilizar o biogás como combustível diretamente, já existem no mercado empresas especializadas neste tipo de motor, sendo vendido o conjunto motor-gerador para pequenas centrais, também há a possibilidade comprar motores a diesel com kit de adaptação para gás natural veicular – GNV e biogás (MWM, 2015).

3.2 Turbinas e microturbinas a gás

A evolução das máquinas térmicas permitiu adquirir *know-how* para a construção das turbinas a gás atuais, elas são uma evolução das turbinas a vapor largamente utilizadas, como principal melhoria está o aproveitamento da energia desenvolvida na combustão sem a utilização de um fluido intermediário, vapor d'água por exemplo.

As turbinas a gás são geralmente classificadas em função do sistema de alimentação e escape, podendo ser chamadas de ciclo aberto e ciclo fechado. Basicamente uma turbina a gás é composta, na sua forma mais simples, por um compressor de ar, uma câmara de combustão, a turbina propriamente dita e dispositivos auxiliares (SOUSA, 1980).

3.2.1 Ciclo aberto

No ciclo aberto, o ar atmosférico é aspirado e comprimido pelo compressor sofrendo assim um aumento de temperatura, então a câmara de combustão recebe o ar onde se tem a injeção de combustível continuamente através de uma bomba, logo após a fase da mistura ar-combustível há o início do processo de combustão realizado eletronicamente à pressão constante, a energia que estava presente no combustível

é transferida para o gás resultante da combustão, este gás se expande sobre as pás do rotor que está ligado mecanicamente ao compressor e ao gerador, assim sendo a potência fornecida pela combustão é utilizada para a compressão e para o acionamento do gerador, sendo a potência útil a diferença das duas menos as perdas inerentes ao processo. É importante citar que o gás resultante da queima é expandido com temperaturas muito altas, sendo necessário materiais de alta resistência e alta engenharia envolvida para a sua construção, representando alto custo para a construção (COHEN, 1987).

A figura 4 ilustra o esquema de uma turbina a gás de ciclo aberto, acionando um gerador e a figura 04 o diagrama entrópico do ciclo aberto simples.

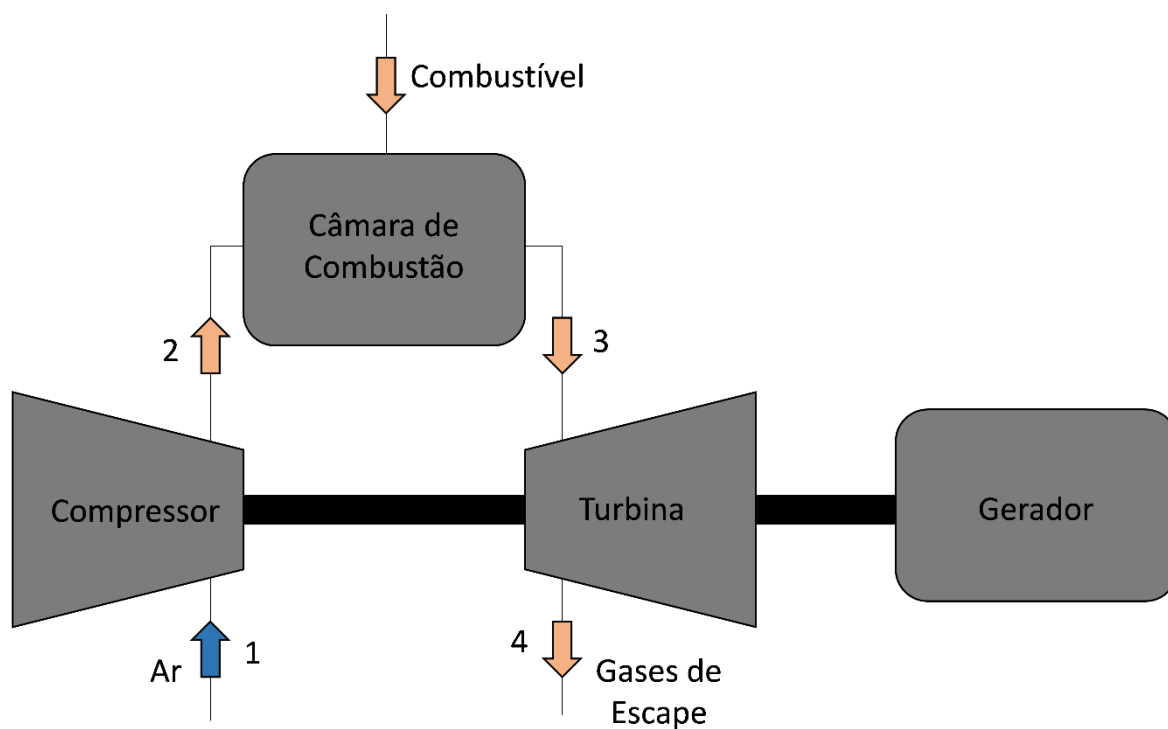


Figura 11 – Diagrama esquemático do ciclo aberto simples

Fonte: Autoria Própria

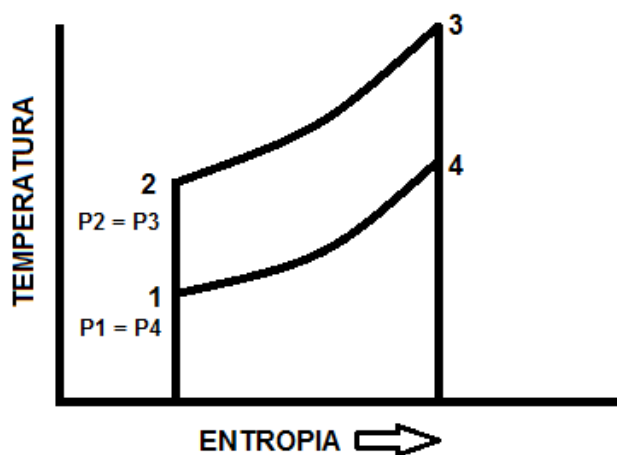


Figura 12 – Representação do ciclo aberto simples no diagrama entrópico

Fonte: Autoria Própria

Existem algumas variações das turbinas a gás de ciclo aberto, visando aumentar a eficiência do conjunto acrescentando dispositivos auxiliares, os exemplos mais comuns estão citados abaixo com o esquema e uma breve explicação.

3.2.1.1 Ciclo aberto com regeneração

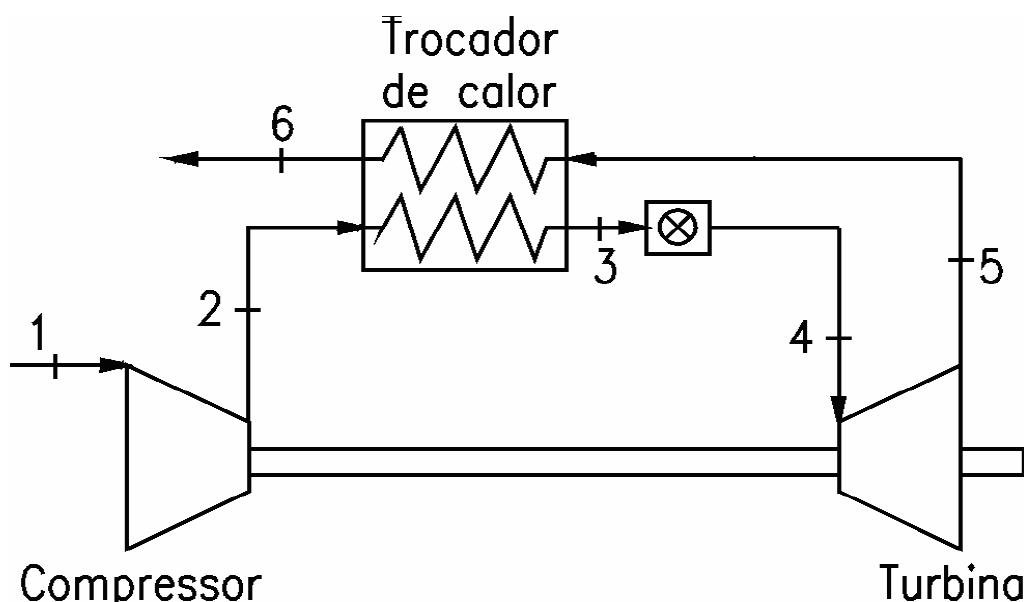


Figura 13 – Diagrama esquemático do ciclo aberto com regeneração

Fonte: Nascimento *et al.*

No ciclo aberto com regeneração, o gás após passar pela turbina sai com uma temperatura maior que a temperatura ambiente, esta é aproveitada para aquecer o fluido de trabalho que acabou de passar pelo compressor e que irá entrar na câmara de combustão, reduzindo assim a quantidade de combustível que iria ser utilizado.

3.2.1.2 Ciclo aberto com regeneração e refrigeração

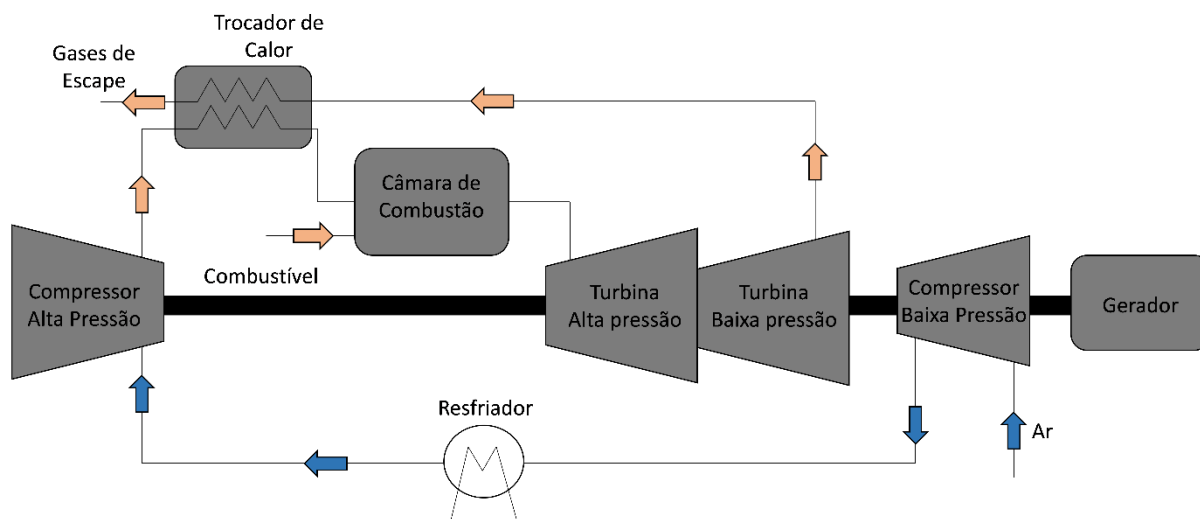


Figura 14 – Diagrama esquemático ciclo aberto com regeneração e refrigeração

Fonte: Autoria Própria

Nesta configuração, o gás passa por um compressor de baixa pressão, logo depois ele é refrigerado através de um trocador de calor, então encaminhado para um compressor de alta pressão onde é comprimido com altas taxas. Após passar por este processo, o mesmo é aquecido através dos gases de escape (regeneração) e encaminhado para a câmara de combustão, ao se expandir pelas pás do rotor da turbina de alta pressão, os gases resultantes são encaminhados para uma segunda turbina (baixa pressão) e só assim são expelidos para a atmosfera.

3.2.1.3 Ciclo aberto com turbina separada e dois eixos

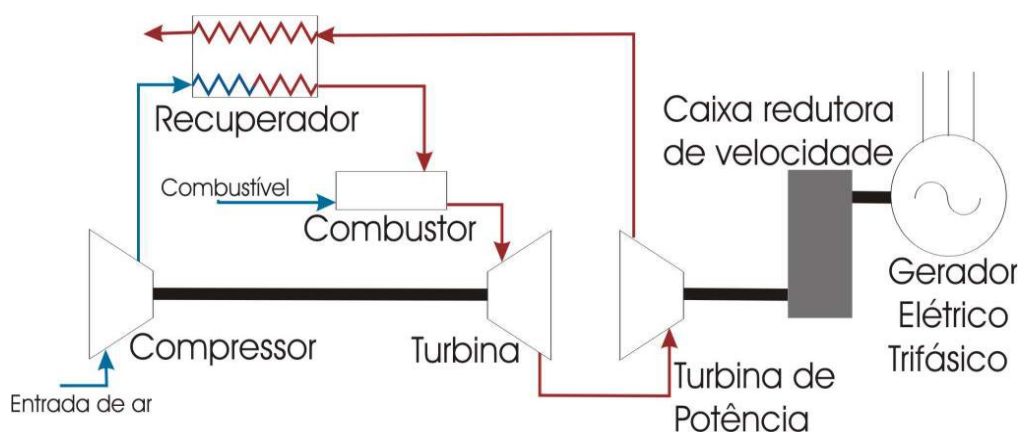


Figura 15 – Diagrama esquemático com turbina de potência em eixo separado

Fonte: Bona, 2004

Com essa variante, a turbina principal de força fica isolada do sistema de compressão e queima dos gases, desta forma consegue-se uma grande flexibilidade nas aplicações, tal como no transporte rodoviário, ferroviário, marinho e também no ramo de geração de energia elétrica. Localizada em um segundo eixo separado, a turbina pode ser acionada utilizando outras máquinas primárias, motores de ciclo Otto ou a diesel, por exemplo.

3.2.2 Ciclo fechado

Nas turbinas de ciclo fechado o fluido de trabalho, que pode ser o ar ou outro gás, fica continuamente circulando no sistema não havendo a exaustão do mesmo. Como o ciclo é fechado, o combustível que fornece energia para o sistema não pode ser queimado junto com o fluido de trabalho e esta energia que será utilizada é transferida para o gás na forma de um trocador de calor, desta forma a queima do combustível acontece em um dispositivo auxiliar, semelhantemente as turbinas a vapor (COHEN, 1987).

Resumidamente, no ciclo fechado o gás é comprimido pelo compressor, então passa por um trocador de calor onde ele é aquecido, expande-se nas pás no rotor produzindo energia cinética e volta para o compressor já com temperaturas inferiores, antes de voltar para o início do ciclo, pode-se haver um resfriador para diminuir a

temperatura do gás e assim permitir uma maior taxa de compressão e consequentemente uma maior eficiência do conjunto (COHEN, 1987).

Na Figura 16 está representado o esquema de uma turbina de ciclo fechado.

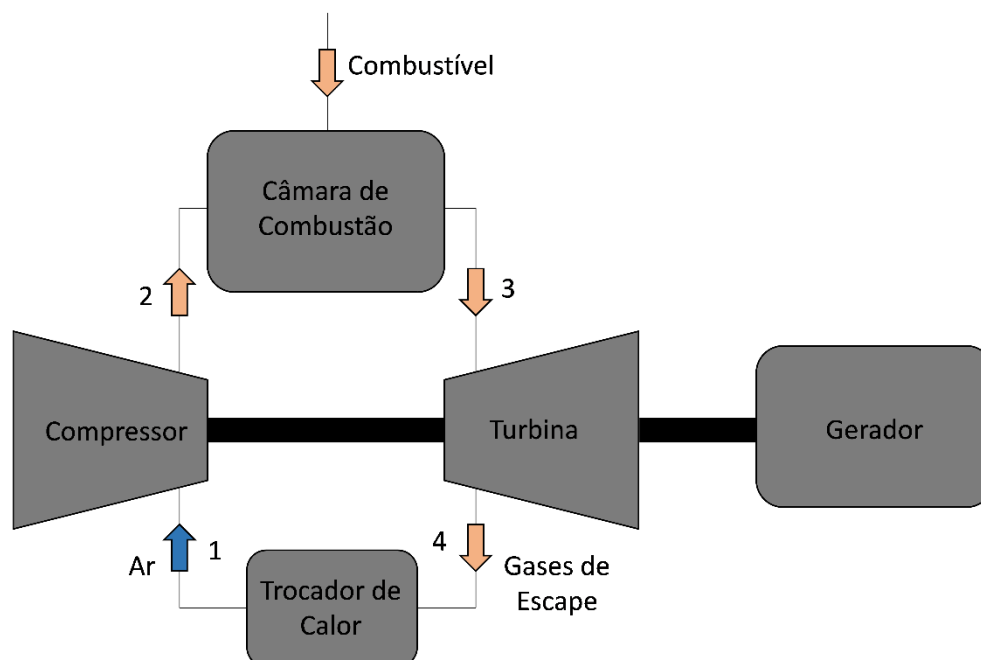


Figura 16 – Diagrama esquemático ciclo fechado

Fonte: Autoria Própria

3.3 Microturbinas a gás

As micro turbinas a gás começaram a receber maiores investimentos a partir dos anos 70, em decorrência da crise do petróleo de 1973 elas começaram a ter papel mais significativo como uma fonte alternativa de energia (ALENCAR, 2007).

O princípio básico de funcionamento é o mesmo das turbinas a gás de ciclo aberto, sendo que as principais diferenças estão na capacidade de geração de potência elétrica. Segundo EPA (2015) e Gurgel (2000) a geração de energia elétrica fica em torno de 30 e 330kW, sendo os índices de emissões muito satisfatórios e eficiência em torno de 25 a 30%. Ainda possuem algumas características de relevância como variadas velocidades de rotação, baixo consumo de combustível, tamanho compacto, fácil instalação e manuseio.

Além das vantagens já citadas, nas microturbinas pode-se ter a cogeração, aproveitando o gás de escape para o aquecimento de água, por exemplo, que pode ser utilizada na planta da instalação.

As principais fabricantes de microturbinas a gás estão relacionadas na Tabela 3, merecendo destaque a Capstone (USA), líder mundial na fabricação deste tipo de sistema.

Tabela 2 – Principais fabricantes de Microturbinas a gás

Fabricante / Distribuidor	Modelo	Potência Eléctrica [†] [kW]	Rendimento Eléctrico [‡] [%]	Potência Térmica [§] [kW]	Rendimento Cogeração [%]
Honeywell / AlliedSignal	(em desenv.)	50	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
	Parallon75	75	30	90	66
	(em desenv.)	200	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
Rolls-Royce / Allison	(em desenv.)	20 → 270	30	(l.n.d.)	(l.n.d.)
ALM	(em desenv.)	25 → 500	37 → 43	(l.n.d.)	(l.n.d.)
Bowman ⁻	Turbogen TG35	35 → 45	21.0 → 12.5	73 → 251	63 → 81
	Turbogen TG50	50 → 60	24.0 → 13.5	100 → 312	71 → 82
	Turbogen TG80	80 → ?	26.0 → 14.0	150 → 420	76 → 89
	Turbogen TG200	200 → ?	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
Capstone	Model 330 Low Pressure	29	25	(l.n.d.)	62 → 88 ^{††}
	Model 330 High Pressure	30	26	(l.n.d.)	
	Model 330 Landfill / Digester Gas	30	27	(l.n.d.)	
	Model 330 Liquid Fuel	29	26	(l.n.d.)	
	Model 330 Non-Recuperated	30	14	(l.n.d.)	
	(em desenv.)	60→100	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
Elliott / GE	TA 45	45	30	> 105	> 70
	TA 80	80	30	> 187	> 70
	TA 200	200	30	> 467	> 70
NREC / Ingersoll-Rand	PowerWorks Microturbine	70 (→ 250)	33	(l.n.d.)	> 85
SWB	(em desenv.)	25	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
	(em desenv.)	65	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
	(em desenv.)	80	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
	(em desenv.)	128	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
Teledyne	Model 105 Turbo-Generator	55	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)
Toyota	(em desenv.)	290	18	(l.n.d.)	68
Turbec	T100 CHP System	100	30	167	80
Williams / GM	(em desenv.)	40 → 400	(l.n.d.)	(l.n.d.)	(l.n.d.)

(l.n.d.) – informação não disponível

3.4 Turbinas/Caldeiras a Vapor – Cogeração

As caldeiras a vapor são dispositivos capazes de transferir a energia dos combustíveis através da combustão, para a água transformando-a em vapor saturado ou superaquecido e podem ser classificadas em dois grupos, segundo a forma de transferência da energia. No primeiro grupo, chamado de caldeiras aquatubulares, a água que será aquecida passa pelos tubos envolvidos com os gases quentes provenientes da queima do combustível, já nas flamotubulares, acontece o processo inverso, ou seja, os gases quentes circulam pelos tubos que estão imersos no reservatório de água (ROCCO; MORABITO, 2011).

O esquema de funcionamento básico de um sistema com cogeração está representado na Figura 17, sendo chamado de ciclo Rankine, o mesmo é constituído basicamente por bomba, caldeira, turbina e condensador. Neste ciclo, o combustível da planta sofre a queima cedendo energia térmica para a água na caldeira, a água aquecida expande-se em forma de vapor e a partir daí pode seguir dois caminhos, o primeiro para a utilização no processo industrial e o segundo para a geração de energia elétrica.

Na geração, o vapor é encaminhado para a turbina, expandindo-se sobre as pás do rotor e convertendo o calor transferido em potência mecânica no eixo, que está ligado a um alternador responsável pela geração elétrica. Após esta etapa, o vapor resultante é então direcionado para o condensador e é bombeado novamente para a caldeira, dando um reinício no ciclo (FIGUEIREDO, 2011).

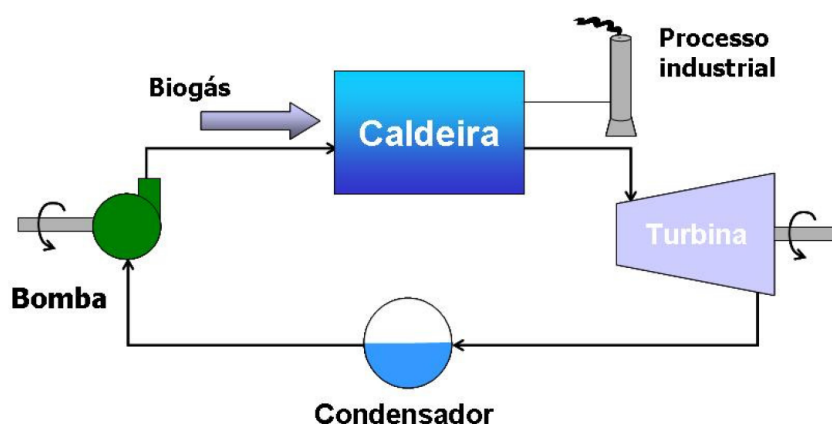


Figura 17 – Esquema de funcionamento caldeira a vapor

Em relação a eficiência de equipamentos térmicos, em nível nacional faltam normas para gerir tais padrões, neste caso utilizam-se normas internacionais, mais especificamente as normas DIN (alemã) e a ASME (americana) que apesar de competentes, o resultado final apresenta uma pequena divergência ao se utilizar uma ou outra. No âmbito das caldeiras a vapor, as do grupo das aquotubulares oferecem maior eficiência, podendo alcançar níveis de 80 a 85% (tendo como referência a norma ASME) podendo ainda obterem melhores resultados com a utilização de superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar, já as do segundo grupo, considerando as mesmas condições de limpeza não chegam a 75-78% (ELETROBRAS, 2005).

Alguns equipamentos e processos auxiliares são empregados para o aumento da eficiência do ciclo do vapor. Os superaquecedores destinam-se a aquecer ou reaquecer o vapor saturado, esta finalidade é desejada para que uma maior quantidade de energia térmica seja entregue ao vapor, alcançando assim níveis satisfatórios para a expansão na turbina do conjunto, este processo de superaquecimento pode ocorrer também após o fluido ter passado por uma turbina com destino a outra (de baixa pressão por exemplo). Para isto são utilizados os gases de escape, muitas vezes ainda na câmara de combustão ou no início do feixe de tubos. Outro dispositivo auxiliar é o economizador, este é responsável pelo aquecimento da água antes de entrar na fornalha, através da utilização do poder energético residual resultante da combustão e de um trocador de calor, o mesmo promove a transferência de energia térmica para água. Por último, tem-se os pré aquecedores, normalmente são os últimos dispositivos a utilizar o poder calorífico do produto resultante da queima, este trocador de calor é responsável por aquecer o ar antes de ser destinado a fornalha, pela característica da troca ser entre dois gases, eles possuem tamanho elevado (ELETROBRAS, 2005).

3.5 Grupos Geradores

No mercado estão disponíveis diversos modelos de grupos motor-gerador, inclusive grupos preparados para a utilização direta do biogás, a seguir são citadas as principais marcas presentes no mercado nacional e suas principais características técnicas.

Na tabela 3 estão demonstrados os modelos da fabricante Caterpillar para utilização direta do biogás e geração em 60 Hz.

Tabela 3 – Modelos de grupos geradores Caterpillar para utilização do biogás

Biogas, Landfill Gas, Sewage Gas ¹									
Model	rpm	Emission Level ²		Aftercooler Temperature		Electric Power ³ @ 1.0 pf kWe	Efficiency ⁴		
		mg/N m ³	g/bhp- hr	°C	°F		Electrical Efficiency %	Thermal Efficiency %	Total Efficiency %
G3306	1800	6055	17,3	-	-	76	26,7	62,4	89,1
G3406	1800	7613	21	-	-	137	27,7	61,1	88,8
G3412	1800	7051	16,4	-	-	194	26,5	62,9	89,4
CG132-8	1800	500	1	40	104	400	41,6	43,2	84,8
G3508A	1200	859	2	54	130	408	32,2	45,8	78
CG132-12	1800	500	1	40	104	600	41,4	43,7	85,1
G3512 LE	1200	759	2	54	130	615	29,6	48,1	77,7
CG132-16	1800	500	1	40	104	800	41,7	43,3	85
G3516A	1200	787	2	54	130	824	31	47,6	78,6
G3516A+	1200	500	1	54	130	1015	36,1	39,9	76
CG170-12	1500	500	1	50	122	1200	41,8	43,8	85,6
CG170-16	1500	500	1	50	122	1550	41,4	43,9	85,3
G3520C	1200	439	1	54	130	1622	39,8	39,9	79,7
G3520C	1500	500	1	54	130	1936	38,7	44,7	83,4
CG170-20	1500	500	1	50	122	2000	42,7	43,3	86
CG260-12	900	500	1	40	104	2530	42,2	40,3	82,5
CG260-16	900	500	1	40	104	3370	43,1	38,6	81,7

1) Low Energy Fuel at LHV = 18.0-23.3MJ/Nm³ (457 to 593 Btu/cu.ft); MN=130-134. Natural Gas at 34.56 MJ/Nm³ (905Btu/cu.ft); MN=70-80

2) Emissions are based on the engine operating at steady state conditions and adjusted to the specified NO_x level at 100% load. Values are engine out without exhaust aftertreatment and subject to nominal tolerance based on fuel, site and operating conditions.

3) Power output based on ISO3046/1 conditions.

4) Electrical efficiency based on 1.0 pf, ISO 3046/1. Thermal efficiency based on nominal tolerance (+/-8% for CG line, +/- 10% for G3300/3400/3500 line). Thermal efficiency includes heat rejection from jacket water circuit and exhaust gas at LHV to 120°C (150°C for CG Series using biogas).

Fonte: Caterpillar, 2015

Como pode-se notar, tais modelos aceitam biogás, **biogás proveniente de aterro** e biogás proveniente de esgoto (estações de tratamento), com potências que variam de 76 a 3370 kW. As velocidades de operação elevadas indicam a utilização de máquinas elétricas com poucos polos. Também é possível concluir que a eficiência elétrica é baixa mesmo considerando o fator de potência igual a 1, assim como a eficiência térmica (máquina de ciclo Otto).

Referente a fabricante Cummins, tem-se a serie QSK60 que utiliza gás natural como combustível, esta série de geradores possui inúmeras vantagens, podemos citar

como principais o controle eletrônico de injeção de combustível, o qual proporciona baixas emissões e alta eficiência, possui também várias configurações de tamanhos de alternadores com variadas elevações de temperatura, baixas distorções harmônicas e eliminação de curto circuito. A tabela 4 demonstra os modelos com potências de 1000 e 1100 kW e a tabela 5 as características técnicas da série.

Tabela 4 – Modelos de grupos geradores Cummins

New Model	Old Model	kW	Configuration
C1000 N6C	GQKB	1000	6 pole direct drive
C1100 N6C	GQKC	1100	6 pole direct drive

Fonte: Cummins, 2015

Tabela 5 – Características da série QSK60 de geradores Cummins

Generator set specifications	
Governor regulation class	ISO 8528 Part 1, Class G1 with exceptions - see PTS (Prototype Test Support) Data Sheet
Voltage regulation, no load to full load	± 0.5%
Random voltage variation	± 0.5%
Frequency regulation	Isochronous
Random frequency variation	± 0.25%
Radio frequency emissions compliance	IEC 801.2 through IEC 801.5; MIL STD 461C, Part 9
Single step load pickup	Minimum 25% see PTS data sheet for details

Engine specifications	
Design	4 cycle, V-block, turbocharged low temperature aftercooled
Bore	159 mm (6.25 in)
Stroke	190 mm (7.48 in)
Displacement	60.3 liters (3685 in ³)
Cylinder block	Cast iron, V16
Battery charging alternator	None
Starting voltage	24 volt negative ground
Fuel system	Lean burn
Ignition system	Individual coil on plug
Air cleaner type	Dry replaceable element
Lube oil filter type(s)	Full flow and bypass filters
Breather	Breather filter

Alternator specifications	
Design	Brushless, 4 pole, revolving field
Stator	2/3 pitch
Rotor	Two bearing
Insulation system	Class F or H see ADS (Alternator Data Sheet) for details
Standard temperature rise	105 °C (221 °F) ontinuous @ 40 °C (104 °F) ambient
Exciter type	PMG (Permanent Magnet Generator)
Phase rotation	A (U), B (V), C (W)
Alternator cooling	Direct drive centrifugal blower fan
AC waveform total harmonic distortion	< 5% no load to full linear load, < 3% for any single harmonic
Telephone influence factor (TIF)	< 50 per NEMA MG1-22.43
Telephone harmonic factor (THF)	< 3

Fonte: Cummins, 2015

Com referência aos dados expostos, os mais relevantes nesse trabalho são os do gerador, nota-se que ele é composto por uma máquina de 4 ou 6 polos, portanto possui alta velocidade de rotação, possui construção com sistema *Brushless*, ou seja, sem o uso de escovas, o que diminui a manutenção. A sua forma construtiva diminui o nível de harmônicos injetados na rede, e possui excitação através de ímã permanente.

Por último segue as características do grupo gerador da Stemac, fabricante nacional possui sede na cidade de Porto Alegre – RS que possui anos de experiência e forte presença no mercado de geradores.

Os modelos a serem analisados são os grupos geradores a gás, as principais classificações dos modelos estão representadas na figura 18, conforme pode-se ver o existem três tipos de classificação da energia a ser utilizada:

- *Stand-by*: o gerador é utilizado em uma emergência e deve funcionar durante toda a falta de energia;
- *Prime*: o gerador deverá suportar o fornecimento de energia durante um tempo ilimitado, sendo que as cargas podem sofrer variações (entrada e saída de carga do sistema);
- *Base*: assim como no regime *prime*, o gerador deverá suprir a energia durante um período indeterminado, porém neste tipo de fornecimento a carga não varia.

Grupo Gerador a Gás

Potências - 60Hz						Motor				Grupo Gerador					
Stand-by		Prime		Base		Marca	Modelo	CV	Nº Cil.	RPM	Consumo Comb. Nm3/h	Dimensões (mm)			Massa (Kg)
kVA	kW	kVA	kW	kVA	kW							C	L	A	
30	24	25	20	20	16	MWM/INTERNATIONAL	G229-3	37	3	1800	8	1850	850	1350	570
50	40	40	32	32	26	MWM/INTERNATIONAL	G229-4	60	4	1800	13	2060	880	1400	640
80	64	70	56	58	46	MWM/INTERNATIONAL	G4.12T	97	4	1800	30	2165	860	1500	950
120	96	104	83	87	70	MWM/INTERNATIONAL	G6.12T	146	6	1800	49	2550	960	1500	1150

Figura 18 – Modelos de geradores a gás da Stamac

Fonte: Stamac, 2015

Semelhante aos geradores da Caterpillar e Cummins, o da Stamac também possui 4 polos e *design Brushless*. Outras características é o enrolamento de passo encurtado e a ligação estrela com neutro acessível.

4. ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DO ATERRO SANITÁRIO

4.1 Determinação da produção de metano

Através da decomposição de material orgânico presente nos resíduos ocorre a produção do biogás de aterro (LFG – *Landfill Gas*), a qualidade do biogás está diretamente relacionada com a sua composição, sendo tipicamente encontrada com 50% de CO₂, 49% de CH₄ e menos de 1% de outros gases, características que influenciam neste quesito são o sistema microbológico e o substrato a ser decomposto (MENDES & SOBRINHO, 2005).

O metano é o componente responsável pela geração de energia, sendo assim, existem inúmeros métodos matemáticos para determinação da quantidade gerada pelo resíduo, desde métodos mais complexos que utilizam inúmeras variáveis (como umidade, temperatura e toda a dinâmica da geração do metano) até os mais rústicos que apresentam uma aproximação levando em conta números de habitantes, etc.

Um método muito utilizado e amplamente conhecido é o desenvolvido em 1996 no IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, nele é observada a quantidade de carbono orgânico presente no lixo para determinar a quantidade de metano gerado [m³] por tonelada. L₀ é o potencial de geração do metano, assume valores típicos entre 125 m³ de tonelada de CH₄ / tonelada de resíduo a 310 m³ de tonelada de CH₄ / tonelada de resíduo e pode ser cálculo através da equação 1 abaixo.

$$L_0 = MCF * DOC * DOCf * F * \frac{16}{12} \quad (\text{EQ.1})$$

Sendo:

L₀: Potencial de geração de metano do lixo [kg de CH₄ / kg de resíduo]

MCF: Fator de correção do metano [%];

DOC: Carbono orgânico degradável [kg de C / kg de resíduo]

DOCf: Fração de DOC dissociada [%];

F: Fração em volume de metano no biogás [%];

(16/12): Fator de conversão de carbono em metano [kg de CH₄ / kg de C];

Na tabela 6 estão indicados os valores de FCM segundo IPPC.

Tabela 6 –Valores de FCM

Tipo de local de disposição	MCF
Aterro Sanitário	1
Aterro Controlado	0,8
Locais Sem Categoria	0,6
Lixão	0,4

Fonte: IPCC, 1996

Para determinação do carbono orgânico degradável, do inglês *Degradable Organic Carbon* (DOC), é utilizada a equação 2, sendo considerada a composição do resíduo e a parcela de carbono presente em cada tipo de material, conforme representado na tabela 7.

$$DOC = 0,40 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,30 * D \quad (\text{EQ.2})$$

Tabela 7 – Valores dos Coeficiente para Cálculo do DOC

	Componente do Resíduo	Porcentagem do DOC por peso em massa
A	Papel e Papelão	40
B	Resíduos de jardins, parques e outros compostos putrescíveis (não alimentícios)	17
C	Restos de alimentos	15
D	Tecidos	40
E	Madeira – excluindo a fração de lignina que se decompõe muito lentamente	30

Fonte: IPCC, 1996

Para o estudo deste trabalho, as porcentagens da composição estão estimadas, frente a dificuldade de conseguir dados oficiais detalhados da operação

do aterro estudado, porém alguns fatores são relevantes e garantem grande proximidade com os reais fatores de operação. Como o aterro recebe na sua grande maioria resíduos domésticos, os coeficientes B e C foram unidos. Como base para a estimativa, utilizou-se FIGUEIREDO, 2011, onde o estudo de caso é realizado em um aterro sanitário muito semelhante ao estudado, sendo assim, abaixo tem-se o cálculo de DOC.

$$DOC = 0,40 * A + 0,16(B + C) + 0,30 * D \quad (\text{EQ.3})$$

Na equação modificada, os fatores dos coeficientes B e C foram unidos realizando a média entre eles. Sendo assim, tem-se:

$$DOC = 0,40 * 0,1 + 0,16 * 0,8 + 0,30 * 0,05$$

$$DOC = 0,183$$

Considerando a seguinte composição:

A – Papel e Papelão: 10%;

C + B - Restos de alimentos + Resíduos de jardins: 80%

D – Tecidos: 5%

E – Madeira: 5%.

Para o cálculo do DOC_f, utiliza-se a equação 4 onde T é a temperatura na zona anaeróbica em [°C]. Valores típicos de DOC_f variam de 0,42 para temperaturas de 10°C a 0,98 para temperaturas de 50°C. Segundo BIRGEMER E CRUTZEN, 1987 a temperatura na zona anaeróbica de um local de disposição de resíduos sólidos se mantém constante a um valor aproximado de 35°C, independente da temperatura ambiente.

$$DOC_f = 0,014 * T + 0,28 \quad (\text{EQ.4})$$

Logo, $DOC_f = 0,77$ utilizando $T=35^\circ\text{C}$.

Com os valores de DOC e DOCf calculados e estimando F (% da fração em volume de metano no biogás) em 50%, o potencial de produção do metano é dado por:

$$L_0 = 1 * 0,183 * 0,77 * 0,5 * \frac{16}{12}$$

Portanto, $L_0 = 0,09394 [kg_{CH_4}/kg_{resíduo}]$, considerando a densidade do metano sendo $0,7168 \text{ kg/m}^3$ em condições de (0°C e $1,013 \text{ bar}$), tem-se $L_0 = 131,05 [m^3_{CH_4}/t_{resíduo}]$.

Após calculado o potencial de geração de metano em função da composição dos resíduos, o cálculo da quantidade de metano gerado é dado através da equação 5, definida pelo método de decaimento de primeira ordem (IPCC, 1996).

$$Q_{T,x} = k * R_x * L_0 * e^{-k(T-x)} \quad (\text{EQ.5})$$

Onde,

$Q_{T,x}$: Metano gerado [m^3/ano];

k: Constante de decaimento [ano^{-1}];

R_x : Quantidade média de resíduos depositados durante a vida útil do aterro [t/ano];

L_0 : Potencial de produção do metano [$m^3_{CH_4}/t_{resíduo}$];

T: ano atual;

x: Ano de deposição do resíduo;

Segundo o *Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean*, valores típicos de k estão representados na tabela 8 (WORLD BANK, 2003)

Tabela 8 –Valores sugeridos de k

Precipitação Anual	Valores para k [1/ano]		
	Relativamente Inerte	Decomposição Moderada	Decomposição Alta
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 a < 500 mm	0,01	0,03	0,05
> 500 a < 1000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: The World Bank, 2003

Em relação a quantidade de resíduos, o aterro em questão está em funcionamento desde 2012, com vida útil inicialmente projetada para 20 anos, com essas informações a tabela 9 indica o histórico e projeção de recebimento de resíduos.

Tabela 9 – Histórico de deposição de resíduos

Ano	Depósito de Resíduos [ton]
2012	842.031,70
2013	858.847,40
2014	880.727,70
2015*	700.041,20
2016	860.000,00
2017	860.000,00
2018	860.000,00
2019	860.000,00
2020	860.000,00
2021	860.000,00
2022	860.000,00
2023	860.000,00
2024	860.000,00
2025	860.000,00
2026	860.000,00
2027	860.000,00
2028	860.000,00
2029	860.000,00
2030	860.000,00
2031	860.000,00

* Quantidade recebida até Setembro 2015, para o cálculo foi considerado o valor médio dos outros anos (860.000,00 toneladas)

Fonte: Dados Informados Pelo Aterro

Com o conjunto de informações citadas, a tabela 10 representa a vazão de metano desde o início de operação do aterro até 2046, considerando que a geração de biogás decorra a valores ótimos após até 15 anos da parada de recebimento de resíduos. O gráfico da figura 19 demonstra tais valores.

Tabela 10 – Vazão de Metano por Hora

Ano	

	Vazão de Metano por hora [m³/h]
2012	1133,71
2013	2192,49
2014	3189,60
2015	4072,99
2016	4880,34
2017	5618,20
2018	6292,55
2019	6908,87
2020	7472,14
2021	7986,93
2022	8457,41
2023	8887,40
2024	9280,38
2025	9639,53
2026	9967,78
2027	10267,77
2028	10541,94
2029	10792,52
2030	11021,53
2031	11230,82
2032	10264,20
2033	9380,77
2034	8573,38
2035	7835,48
2036	7161,09
2037	6544,74
2038	5981,45
2039	5466,63
2040	4996,12
2041	4566,11
2042	4173,11
2043	3813,94
2044	3485,68
2045	3185,67
2046	2911,48

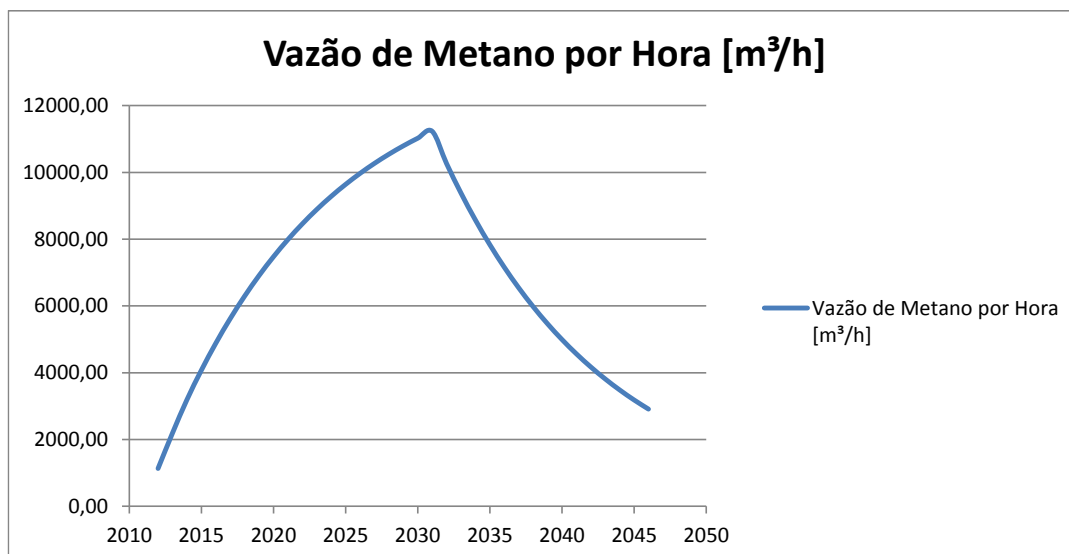


Figura 19 - Representação da Vazão do Metano por Hora [m³/h]

O gráfico demonstra o crescimento da vazão do metano até o ponto máximo (último ano de recebimento de resíduos) e após um decaimento regido pela constante k .

4.2 Determinação da potência e energia gerada

Segundo Figueiredo, 2011, para determinar a potência produzida pela vazão do metano utiliza-se a equação 6.

$$P_x = \frac{Q_x * \eta * PCI * 4184}{31536000} \quad (EQ.6)$$

Onde,

P_x : Potência gerada pela vazão do metano em [MW];

Q_x : Vazão do metano em [m³/ano];

η : Rendimento da máquina [%];

PCI: Poder calorífico do metano em [kcal/m³];

4184: Constante para converter kcal em J, sendo 1J/s = 0,000001 MW;

31536000: Segundos em 1 ano;

No cálculo da potência foi utilizado o rendimento de 30% (rendimento médio entre as tecnologias consideradas neste trabalho). A tabela 11 e a figura 20 indicam as potências disponíveis.

Tabela 11 – Potências geradas em MW

Ano	Px [MW]
2012	3,36
2013	6,50
2014	9,45
2015	12,07
2016	14,46
2017	16,65
2018	18,65
2019	20,48
2020	22,14
2021	23,67
2022	25,06
2023	26,34
2024	27,50
2025	28,57
2026	29,54
2027	30,43
2028	31,24
2029	31,99
2030	32,66
2031	33,28
2032	30,42
2033	27,80
2034	25,41
2035	23,22
2036	21,22
2037	19,40
2038	17,73
2039	16,20
2040	14,81
2041	13,53
2042	12,37
2043	11,30
2044	10,33
2045	9,44
2046	8,63

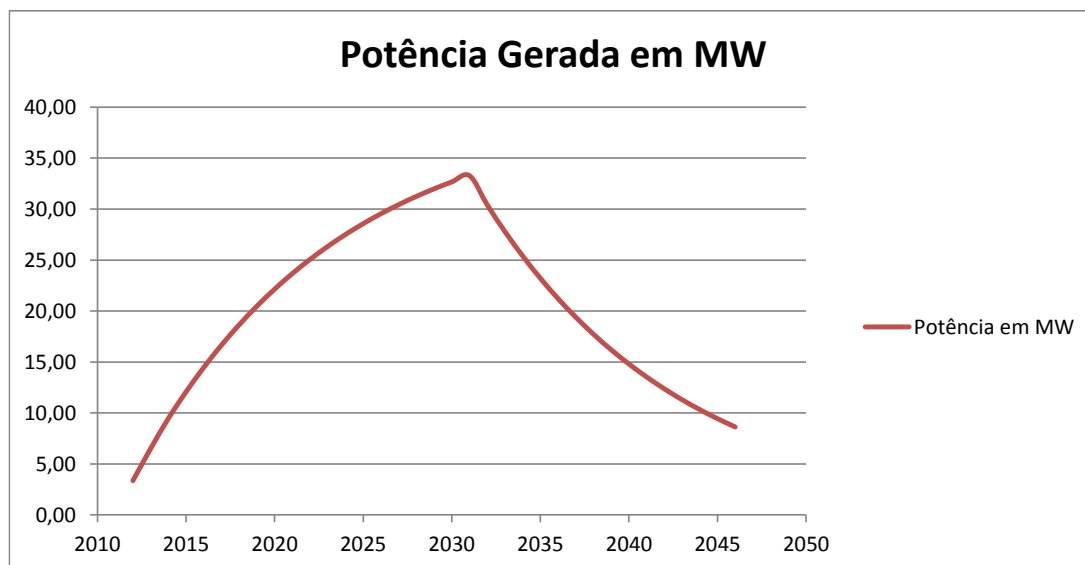


Figura 20 – Gráfico da potência gerada em MW

Com a potência gerada é possível calcular a energia disponível durante o período considerado no estudo, conforme a equação 7.

$$E = P_x * 1000 * 720 * Disponibilidade \quad (EQ. 7)$$

Onde,

E: Energia disponível em [kWh/mês];

P_x: Potência gerada em [MW];

Disponibilidade: 0,85, considerando 85% de funcionamento durante o mês;

1000: Fator de conversão de MW para kW;

720: Quantidade de horas em um mês médio de 30 dias [horas].

A tabela 12 e a figura 21 mostram o comportamento da capacidade de geração de energia em [kWh/mês] em função da produção / vazão do biogás.

Tabela 12 – Energia gerada em KWh/mês

Ano	Energia [KWh/mês]
2012	2.177.249,66
2013	4.210.586,55
2014	6.125.492,64
2015	7.821.989,22
2016	9.372.470,35
2017	10.789.503,41
2018	12.084.574,11
2019	13.268.179,61
2020	14.349.913,59
2021	15.338.544,01
2022	16.242.084,18
2023	17.067.857,72
2024	17.822.557,90
2025	18.512.301,94
2026	19.142.680,53
2027	19.718.803,17
2028	20.245.339,63
2029	20.726.557,72
2030	21.166.357,93
2031	21.568.305,06
2032	19.711.946,61
2033	18.015.362,73
2034	16.464.801,81
2035	15.047.695,84
2036	13.752.558,49
2037	12.568.892,08
2038	11.487.102,44
2039	10.498.421,15
2040	9.594.834,48
2041	8.769.018,45
2042	8.014.279,43
2043	7.324.499,90
2044	6.694.088,87
2045	6.117.936,58
2046	5.591.373,03

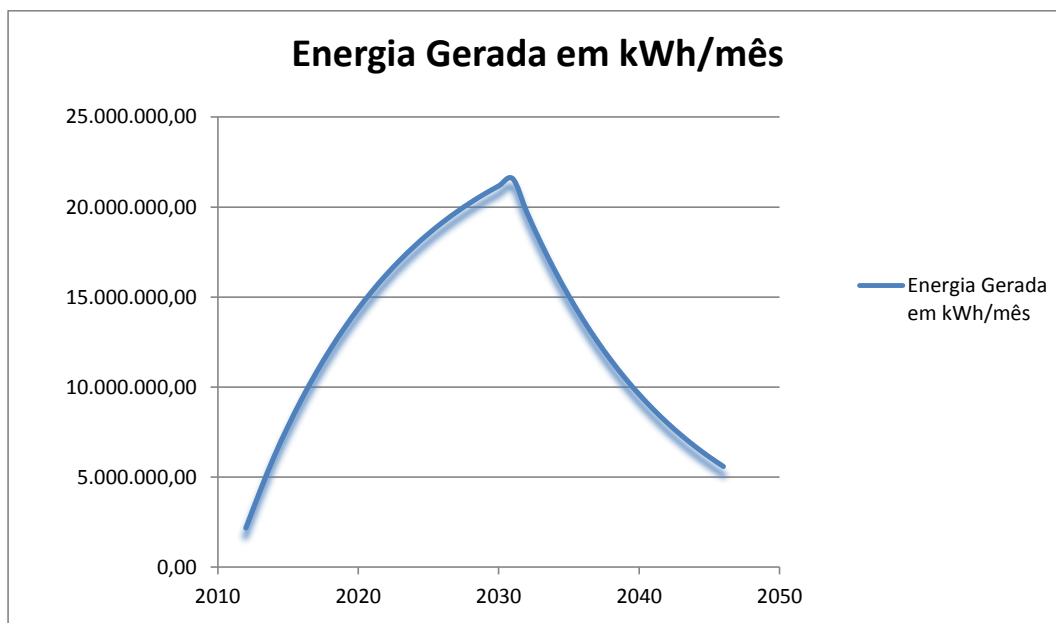


Figura 21 – Gráfico da energia em KWh/mês

O valor de potência disponível foi bastante elevado, ultrapassando o limite (1 MW) definido na resolução normativa nº 482 da ANEEL, que define os parâmetros do sistema de compensação de energia. Uma forma de utilização da energia gerada que pode e deve ser utilizada, é a de consumo no próprio aterro em seus equipamentos, tanto para o suprimento de energia elétrica (alimentação de aparelhos e instalações), quanto de energia térmica (aquecimento de água para limpeza e esterilização de veículos que transportam resíduos).

4.3 DEFINIÇÃO DA MELHOR TECNOLOGIA A SER UTILIZADA

Com base nos dados que foram apresentados nos capítulos anteriores e na tabela 13, define-se que a melhor tecnologia a ser utilizada é o motor de combustão interna ciclo Otto, preparado para ser alimentado diretamente pelo biogás.

Embora a faixa de potência dos motores não alcance o pico estimado para o aterro (33,28 MW), em relação a energia gerada (pico de 21,57 GWh/mês) ele é o que melhor se adequa ao sistema, obtém-se uma melhor distribuição no tempo considerando o acréscimo de unidade geradoras proporcionalmente ao aumento de geração de metano.

Tabela 13 – Comparação das tecnologias de conversão

	Potência	Rendimento	Emissões de Nox
Motores a Gás	30 kW - 20 MW	30% - 40%	250 ppm - 3000 ppm
Turbinas a Gás (Médio Porte)	500 kW - 150 MW	20% - 30%	35 ppm - 50 ppm (gás de aterro)
Microturbinas (Pequeno Porte)	30 kW - 100 KW	24% - 28%	< 9 ppm

Fonte: Coelho, 2015

As justificativas para o uso dos motores a combustão interna são descritas abaixo.

- Faixa de potência: as turbinas a gás são utilizadas para empreendimentos de maior porte por possuírem unidades de geração usualmente de até 150 MW, a capacidade de potência instalada do aterro chega ao seu valor de pico de 33,28 MW, o que torna as turbinas a gás superdimensionadas e as microturbinas subdimensionadas (unidades usuais de até 100 kW);
- Rendimento: conforme a tabela 13, o melhor rendimento apresentado é a dos motores a combustão interna, o que os tornam mais adequados para a aplicação, embora alguns autores indiquem que as turbinas a gás apresentem um rendimento global maior, comumente são empreendimentos de maior porte;
- Além dos pontos anteriores, os motores de ciclo Otto ainda possuem manutenção simplificada frente as outras tecnologias, graças ao seu longo tempo no mercado, grande quantidade de peças disponíveis e profissionais qualificados.

Para concluir, esses motores requerem pequeno espaço de alocação, apresentam riscos reduzidos para os operadores e possuem vasta gama de modelos no mercado, conforme alguns citados no item 3.1 deste trabalho.

5. ESTUDO DAS NORMAS DA CONCESSIONÁRIA LOCAL PARA INJEÇÃO DO EXCEDENTE GERADO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 Geração Distribuída COPEL

A Companhia Paranaense de Energia – COPEL, concessionária de energia de economia mista e maior empresa do estado do Paraná, é responsável por fornecer eletricidade para a unidade do aterro sanitário estudado.

Centrais geradoras, de qualquer potência, as quais se conectam diretamente a rede de distribuição ou através de instalações de consumidores, operando em paralelo ou de forma isolada, devem seguir os procedimentos definidos pelas NTCs da COPEL. Estas normas têm por objetivo, padronizar e adotar procedimentos que garantam o atendimento a exigências de segurança, em conformidade com as prescrições vigentes no PRODIST, resoluções normativas da ANEEL e normas técnicas da ABNT.

Neste trabalho, cita-se duas normas referentes a geração distribuída da COPEL, tais normas definem os requisitos aplicáveis a geração distribuída em paralelismo permanente com o sistema elétrico.

A primeira - NTC 905100 - Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel (com comercialização de energia) – é a que poderá ser utilizada na maior parte do tempo de funcionamento, já que a mesma se refere a empreendimentos sem limite de potência e que desejam entrar no ambiente de contratação livre ou regulado.

A segunda - NTC 905200 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel (com compensação de energia) – é mencionada, pois, a mesma pode ser aplicada na fase de implantação do sistema de geração, onde a potência instalada não ultrapasse 1 MW.

Devido à atualização da resolução 482/2012, a NTC 905200 será aplicada a uma potência instalada de 3MW para gerações que trabalhem com biogás.

5.2 NTC 905100 - Acesso de Geração Distribuída ao Sistema da Copel (com comercialização de energia)

A NTC 905100 define os requisitos para acesso ao sistema de distribuição em média tensão (13,8 kV e 34,5 kV) e alta tensão (69 kV e 138kV), excluindo as Demais Instalações e Distribuição – DIT que pertencem as transmissoras e os casos de mini e micro geração (amparadas pela NTC 905200).

Para os geradores de energia que pretendem aderir ao ambiente e contratação livre ou regulado, esta norma define requisitos técnicos de projeto, proteção, controle, segurança, medição e operação das unidades geradoras e os procedimentos definidos no PRODIST e na regulamentação vigente, destacando a resolução normativa ANEEL nº 506.

Para empreendimentos conectados à rede básica, classificadas como DIT ou aderentes ao sistema de compensação de energia, prevê-se outros requisitos, que podem ser consultados nos documentos “MANUAL DE ACESSO AO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DA COPEL – DPEE 012/2010” - editado pela Superintendência de Obras e Transmissão – SOT e NTC 905200 - ACESSO DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DA COPEL (apresentada no item 5.3).

Para a conexão ao sistema de distribuição, é realizado um estudo pela COPEL para determinar o ponto de conexão com vistas ao menor custo global, tal conexão pode ser do tipo linha expressa ou pingo, dependendo da potência a ser injetada no sistema e em função do carregamento alimentador e/ou subestação.

Caso a potência de geração instalada não supere 40% da demanda em patamar de carga leve, em qualquer configuração de rede possível, não serão necessários reforços no sistema de proteção das subestações de 34,5/13,8 kV.

Para as subestações de 69/138 kV, não são exigidos reforços no sistema de proteção, caso a potência de geração instalada não supere 20% da demanda, também em patamar de carga leve em qualquer configuração de rede possível.

A COPEL definirá qual o melhor ponto de conexão, caso seja do tipo pingo, podendo esta não ser a mais próxima do empreendimento, vistas a possíveis adequações na rede e a fim de evitar perturbações na rede.

Os custos para adequação dos sistemas de telecomunicações, proteção, comando e controle em virtude da conexão do acessante, será de responsabilidade

do mesmo. Na análise dos requisitos desta norma leva-se em conta a potência total instalada de geração.

Segundo a NTC 905100 define-se os tipos de conexões, em função da potência instalada.

- **Acessantes de Geração até 75 kW**

A conexão destas unidades geradoras não fazem parte na NTC em questão, devendo-se consultar a COPEL caso a caso.

- **Acessantes de Geração de 76 kW até 300 kW**

A conexão deverá ser trifásica em MT (34,5 ou 13,8 kV), através de relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante. Para esta faixa de potência é admitido o uso proteção na BT e, dependendo dos estudos de conexão realizados pela COPEL, a conexão em pingo na rede.

- **Acessantes de Geração de 301 kW até 500 kW**

A conexão deverá ser trifásica em MT (34,5 ou 13,8 kV) através de disjuntor de MT, relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante, podendo ser conectado em pingo na rede ou por intermédio de linha expressa diretamente a uma subestação, dependendo dos estudos de conexão realizados pela COPEL. Os equipamentos de proteção e operação devem ser automatizados, disponibilizando a supervisão e comandos no COD.

- **Acessantes de Geração de 501 kW até 1000 kW**

A conexão deverá ser trifásica em MT (34,5 ou 13,8 kV) através de disjuntor de MT, relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante, podendo ser conectado em pingo na rede ou em linha expressa diretamente a uma subestação, dependendo dos estudos de conexão realizados pela COPEL. Os equipamentos de proteção e operação devem ser automatizados, disponibilizando a supervisão e comandos no COD.

- **Acessantes de Geração de 1001 kW até 2000 kW**

Dependendo dos estudos de conexão realizados pela COPEL, alguns acessantes de 1001 a 2000 kW poderão ser conectados em pingo ao sistema de distribuição, em função do circuito e/ou da subestação acessados. Caso haja esta possibilidade, o acessante deverá seguir as premissas dispostas na faixa de 501 a

1000 kW. Caso contrário, deverá seguir as premissas dispostas na faixa acima de 2000 kW, a seguir.

- **Acessantes de Geração acima de 2000 kW**

A conexão deverá ser em linha expressa em MT (34,5 ou 13,8 kV) ou AT (69 ou 138 kV), a partir de uma subestação da COPEL, com disjuntor ou religador, relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante. Serão exigidas adequações nas proteções dos setores 69/138 kV das subestações. Os equipamentos de proteção e operação devem ser automatizados, disponibilizando a supervisão e comandos no COD.

Na tabela 14 estão representados os requisitos mínimos de conexão para a ligação em 13,8 kV, conforme escopo deste trabalho.

Tabela 14 - Proteções mínimas para conexão de geradores convencionais no sistema 13,8 kV

TABELA 5.1 - PROTEÇÕES MÍNIMAS PARA CONEXÃO DE GERADORES SEM INVERSOR NO SISTEMA 13,8kV							
CLASSIFICAÇÃO DA TENSÃO DE ATENDIMENTO			M T				
TIPO DE GERADOR			TRIFÁSICO - ASSÍNCRONO OU SÍNCRONO	TRIFÁSICO SÍNCRONO			
FAIXA DE POTÊNCIA DA USINA (SOMA DA POTENCIA DOS GERADORES)			76kW a 300kW	301kW a 500kW	501kW a 1.0MW (Nota 3)	acima de 1.0MW	
			PINGO NA REDE	SIM	SIM	SIM (Nota4)	SIM (Nota 4)
			LINHA EXPRESSA			SIM	SIM
ELEMENTO DE DESCONEXÃO MANUAL - VISÍVEL			CHAVE SECCIONADORA	SIM	SIM	SIM	SIM
REQUISITOS NA USINA							
EQUIPAMENTOS	OBJETIVO	ESPECIFICAÇÃO					
TRAFO ABAIXADOR (EXCLUSIVO)	ISOLAR FLUTUAÇÃO	D / Yat.	SIM	SIM			
		Yat.(R0<X0)/ Yat.			SIM	SIM	
DISJUNTOR NA BT				SIM			
RELIGADOR NA MT				SIM	SIM	SIM	
ELEMENTO DE INTERRUPTÃO (E I) DISJUNTOR/ RELIGADOR COM RELÉS	DESCONECTAR O GERADOR DO SISTEMA COPEL EM CASOS DE FALTAS E DISTURBIOS NA REDE	50/51 -50/51N - 50BF	SIM	SIM	SIM	SIM	
		81U/O - 27 - 59	SIM	SIM	SIM	SIM	
		Anti ilhamento (78 - 81 (df/dt))	SIM	SIM	SIM	SIM	
		25 (só p/ síncronos)	SIM	SIM	SIM	SIM	
		46(I2) + 37		SIM	SIM	SIM	
		67- 67N - 47 - 46 - 51V			SIM		
		59N e TPs (p/ trafos D/Yat.)	SIM	SIM	SIM		
		32			SIM	SIM	
AUTOMAÇÃO COD da COPEL				Nota 2	SIM	SIM	

ADEQUAÇÕES NA REDE E SUBESTAÇÕES						
EQUIPAMENTOS	OBJETIVO	ESPECIFICAÇÃO				
SUBSTITUIÇÃO DE RELIGADORES NAS SES	COORDENAÇÃO DEVIDO A FALTAS EM ALIMENTADOR ADJACENTE	67 - 67N			SIM	SIM
INSTALAÇÃO DE DEADLINE NOS RELIGADORES DE SES	PERMITIR O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO	27 E TPs LINHA		SIM	SIM	SIM
INSTALAÇÃO DE RELIGADOR NA DERIVAÇÃO	CONFIABILIDADE DO TRONCO	67/67N DIRETO - 67/67N REVERSO - 78 - 81U/O - 27 - 59			SIM	
AUTOMAÇÃO COD COPEL NO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO	DESCONECTAR O GERADOR DO SISTEMA COPEL EM CASOS DE FALTAS E DISTURBIOS NA REDE	AUTOMAÇÃO COD da COPEL			SIM	SIM
AUTOMAÇÃO COD COPEL NO DISJUNTOR DA SE DO ACESSANTE	DESCONECTAR O GERADOR DO SISTEMA COPEL EM CASOS DE FALTAS E DISTURBIOS NA REDE	AUTOMAÇÃO COD da COPEL		SIM		
INSTALAÇÃO DE DEADLINE NO RELIGADOR DE DERIVAÇÃO	PERMITIR O RELIGAMENTO AUTOMÁTICO	27 e TPs BARRA			SIM	
SISTEMA DE COMANDO DO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO	DISPONIBILIZAR PARA O COD COPEL COMANDOS E SUPERVISÃO DO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO	SISTEMA E MEIO DE COMUNICAÇÃO		Nota 5	SIM	SIM
SISTEMA DE TRIP POR ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE RETAGUARDA	ABRIR RELIGADOR DO ALIMENTADOR EXPRESSO NO CASO DE DISPARO DAS PROTEÇÕES DA SUBESTAÇÃO COPEL	SISTEMA E MEIO DE COMUNICAÇÃO (cabo de comando)				SIM
INSTALAÇÃO DE SISTEMA DE TELE-PROTEÇÃO	TRANSFER TRIP DE RETAGUARDA	SISTEMA E MEIO DE COMUNICAÇÃO (fibra óptica, rádio ou GPRS)			Nota 1	Nota 1
CONSTRUÇÃO DE SAÍDA COM RELIGADOR NA SE COPEL	PROTEÇÃO DA LINHA EXPRESSA	67/67N - 78 - 81U/O - 27 - 59				SIM
SISTEMA COMUNICAÇÃO MUDANÇA DE AJUSTES	PERMITIR ALTERAÇÃO GRUPO DE AJUSTES FUNÇÃO DE NÚMERO DE GERADORES	MEIO DE COMUNICAÇÃO			SIM	SIM
NOTAS:						
1) Facultativo, porém recomendado pela COPEL;						
2) A COPEL recomenda que o elemento telecomandado seja uma chave tripolar automatizada;						
3) Para acessantes com potência instalada maior do que 1000 kW, porém com conexão em pingo, os requisitos de roteção exigidos são os contidos nesta coluna;						
4) A área de estudos da COPEL definirá se o acessante com potência despachada entre 500 kW e 2MW poderá ser conectado em pingo;						
5) Como neste caso não é exigido um religador no ponto de conexão, poderá ser utilizada uma chave a gás telecomandada.						

FONTE: Copel, 2015a

5.3 Resolução Normativa nº 482 - ANEEL

A resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 da ANEEL estabelece condições para o acesso a micro geração e mini geração distribuída e também define diretrizes para o sistema de compensação.

A micro geração é definida para sistemas que utilizem fontes de origem hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL e estejam conectados a rede de distribuição através de unidades consumidoras, com potência limitada a 100 kW. A mini geração possui os mesmos critérios da micro, porém com potências geradas acima de 100 kW até 1 MW de energia.

A partir da publicação da resolução nº 482, as concessionárias tiveram um prazo de 240 dias corridos para planejarem e definirem quais as diretrizes de atendimento dos consumidores interessados na micro e mini geração, tomando como base o PRODIST e normas técnicas. Para conexão dos sistemas não é preciso contrato de uso e conexão como centrais geradoras, bastando um acordo operativo. Outra característica é que não é possível gerar mais que a carga instalada da unidade consumidora, caso o requerente queira aumentar a geração será preciso também aumentar a carga instalada para consumidores do grupo B ou a demanda contratada para consumidores do grupo A.

O sistema de compensação de energia é definido pelo empréstimo da energia ativa injetada na rede de distribuição da concessionária, sendo que a unidade consumidora ficará com créditos para posterior consumo, no mesmo posto tarifário ou em outro observando a tarifa de energia – TE, em um prazo máximo de trinta e seis meses, podendo utilizar o excedente em qualquer outra instalação atendida pela concessionária e registrada no mesmo CPF ou CNPJ, definindo uma lista de prioridades das instalações. O valor a ser cobrado é a diferença entre a energia consumida e a gerada, sendo que no mínimo deve ser faturado o valor referente a disponibilidade para o consumidor do grupo B ou a demanda contratada para o grupo B (ANEEL, 2012b).

5.4 NTC 905200 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel (com compensação de energia)

A norma técnica COPEL número 905200, intitulada Acesso De Micro E Minigeração, com emissão em fevereiro de 2014 e revisão em agosto do mesmo ano, tem por objetivo definir padrões que visam a uniformização de critérios de medição, proteção, controle, segurança e operação de unidades geradoras com base na regulação vigente e procedimentos do PRODIST.

Como já foram citados os passos para adesão ao sistema de compensação de energia, neste item do trabalho serão apresentados os requisitos técnicos, a nível de equipamentos, tipos de conexão, requisitos mínimos e outras exigências que a concessionária solicita, importante salientar que será tratado somente o escopo pertinente ao aterro sanitário, ou seja, conexão na média tensão 13,8 kV.

Para o sistema de proteção da geração é exigido no mínimo um elemento de desconexão visível – geralmente chave seccionadora – elemento de desconexão automático ativado pela proteção, proteção de sub e sobretensão, sub e sobrefrequência além de supervisão de sincronismo e anti-ilhamento, não podendo em nenhum momento o sistema operar ilhado alimentando cargas da região, embora possa trabalhar isolado alimentando as cargas da unidade consumidora.

Considerando as faixas de potência definidas pela COPEL, conforme abaixo, define-se na figura 22 os principais requisitos em relação aos equipamentos de proteção e conexão, para a ligação em média tensão 13,8 kV para geradores convencionais.

- **Acessantes de Geração até 100 kW**

A conexão poderá ser diretamente em BT.

- **Acessantes de Geração de 101 kW até 300 kW**

A conexão deverá ser trifásica por meio de relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante. Para esta faixa de potência é admitido o uso de proteção na BT.

- **Acessantes de Geração de 301 kW até 500 kW**

A conexão deverá ser trifásica por meio de disjuntor, relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante na própria unidade consumidora. Os equipamentos de proteção e operação devem ser automatizados, disponibilizando a supervisão e comandos no COD (Centro de Operação de Distribuição).

- **Acessantes de Geração de 501 kW até 1000 kW**

A conexão deverá ser trifásica por meio de disjuntor, relés de proteção secundários e transformador exclusivo do acessante na própria unidade consumidora. Os equipamentos de proteção e operação devem ser automatizados, disponibilizando a supervisão e comandos no COD.

Na tabela 15 estão representados os requisitos mínimos de conexão para a ligação em 13,8 kV, conforme escopo deste trabalho.

Tabela 15 – Proteções mínimas para conexão de geradores convencionais no sistema 13,8 kV

TABELA 5.1 – PROTEÇÕES MÍNIMAS PARA CONEXÃO DE GERADORES SEM INVERSOR NO SISTEMA 13,8kV							
CLASSIFICAÇÃO DA GERAÇÃO			MICROGERAÇÃO	MINIGERAÇÃO			
TIPO DE GERADOR			MONOFÁSICO, BIFÁSICO ou TRIFÁSICO – ASSÍNCRONO OU SÍNCRONO (nota 1)	TRIFÁSICO – ASSÍNCRONO OU SÍNCRONO	TRIFÁSICO SÍNCRONO		
FAIXA DE POTÊNCIA DA USINA (SOMA DA POTENCIA DOS GERADORES)			até 100 kW (nota 3)	101kW a 300kW	301kW a 500kW	501kW a 1.0MW	
ELEMENTO DE DESCONEXÃO MANUAL – VISÍVEL		CHAVE SECCIONADORA	SIM	SIM	SIM	SIM	
REQUISITOS NA USINA							
EQUIPAMENTOS	OBJETIVO	ESPECIFICAÇÃO					
TRAFO ABAIXADOR (EXCLUSIVO)	ISOLAR FLUTUAÇÃO	D / Yat		SIM	SIM		
		Yat.(R0<X0)/ Yat.				SIM	
DISJUNTOR NA BT			SIM	SIM			
RELIGADOR NA MT					SIM	SIM	
ELEMENTO DE INTERRUPÇÃO (E I) DISJUNTOR/ RELIGADOR COM RELÉS NO PONTO DE CONEXÃO	DESCONECTAR O GERADOR DO SISTEMA COPEL EM CASOS DE FALTAS E DISTURBIOS NA REDE	50/51 – 50/51N – 50BF		SIM	SIM	SIM	
		81U/O – 27 – 59	SIM	SIM	SIM	SIM	
		Anti ilhamento – 78 / 81 (df/dt)	SIM	SIM	SIM	SIM	
		25	SIM	SIM	SIM	SIM	
		46(12) + 37					SIM
		67- 67N – 47 – 46 – 51V					SIM
	59N e TPs (p/ trafo D/Yat.)			SIM	SIM	SIM	
NÃO PERMITIR O FECHAMENTO EM CASO DE TENSÃO DO LADO DO ACESSANTE DE GERAÇÃO	CHECK DE SINCRONISMO: LIVE LINE / DEAD BUS – 27 e TPs BARRA				NOTA 2	NOTA 2	

	DISPONIBILIZAR PARA O COD COPEL COMANDOS E SUPERVISÃO DO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO	SISTEMA DE COMANDO DO RELIGADOR DO PONTO DE CONEXÃO – SISTEMA E MEIO DE COMUNICAÇÃO (fibra óptica, rádio ou GPRS)			SIM	SIM
NOTAS: 1) Geradores monofásicos ou bifásicos < 10 kW 2) Facultativo, porém recomendado pela COPEL 3) Para a faixa de 76 a 100kW cujos consumidores sejam atendidos em MT, não necessitarão alterar sua entrada para BT. Para os consumidores na faixa de 76 a 100 kW que preferirem ser atendidos em BT, a COPEL irá analisar caso a caso.						

FONTE: COPEL, 2015b

6. CONCLUSÃO

6.1 Considerações

Partindo do cenário do aumento da demanda de energia elétrica e da intenção de diversificar a matriz energética brasileira, buscando-se o aumento da geração distribuída e da eficiência energética, foi proposto para este trabalho o estudo de viabilidade de geração elétrica, a partir dos resíduos sólidos urbanos depositados no aterro sanitário que atende Curitiba e região.

A partir da necessidade de obter dados da operação do aterro para o desenvolvimento do projeto, foi construída uma oportunidade de crescimento técnico e pessoal, na qual alcançou-se êxito. Os dados foram obtidos através do contato direto com a empresa que administra a unidade em questão, porém os dados repassados fornecem a quantidade de resíduos depositados, projeção de recebimento e tempo de vida útil do aterro, sendo necessário, com base em livros, artigos e trabalhos acadêmico, estimar-se alguns fatores de cálculo.

Após vasta pesquisa, decidiu-se utilizar a metodologia amplamente utilizada e desenvolvida no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (1996), através da qual foi estimada a quantidade de metano produzido no biogás, com esses dados foi calculada a potência e a energia gerada durante o horizonte de estudo (até 2046), sendo apresentados através das tabelas e gráficos.

Para a conversão da energia química presente nas moléculas de biogás, estudos acerca de tecnologias de conversão foram realizados, com foco na faixa de potência atendida e eficiência energética dos mesmos, assim, definiu-se que a melhor tecnologia a ser empregada são os motores de ciclo Otto preparados para alimentação a partir do biogás.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, obtendo-se picos de geração de 21.000 MWh/mês, quantidade essa que pode abastecer mais de 133 mil residências brasileiras, considerando a média de consumo mensal segundo a EPE (157 kWh/mês). Apesar do alto valor de geração impressionar em um primeiro momento, justifica-se tal potencial quando leva-se em conta que, a unidade estudada recebe resíduos de Curitiba e região (aproximadamente 3,2 milhões de habitantes), o que representa uma quantidade muito alta de resíduos recebidos todos os dias.

Nos capítulos finais foram apresentadas as normas e resoluções que regem os requisitos técnicos para injeção do potencial de energia gerada pelo aterro na rede,

com as principais características, equipamentos e ligações possíveis. Importante salientar que duas normas foram consideradas, a primeira, com compensação de energia, foi indicada para a fase de implementação do sistema de geração, onde a capacidade instalada não ultrapasse 1 MW – fase de testes – e a segunda para o funcionamento nominal do sistema – com capacidade instalada de até 33,28 MW.

De forma geral, o trabalho representou um grande desafio técnico e pessoal, sendo o desenvolvimento considerado ideal para a conclusão da graduação.

6.2 Sugestão para Trabalhos Futuros

- Obtenção dos valores reais do potencial de geração de energia elétrica do aterro sanitário através da análise química da composição do biogás;
- Projeto piloto, com um gerador de menor porte para fins de análise de eficiência, emissão de gases poluentes, documentação para injeção de excedentes na rede, etc.;
- Estudo de viabilidade econômica;
- Comparação com outros empreendimentos que utilizam biogás, por exemplo, suinocultura e estações de tratamento de esgoto;
- Estudo e simulação da entrada do empreendimento no mercado livre de energia;
- Estudo da transferência dos equipamentos de geração para outro aterro, tendo em vista o final da vida útil do empreendimento.

7. REFERÊNCIAS

ABRELPE. PLASTIVIDA. **Recuperação Energética: Resíduos Sólidos Urbanos**, 2012 Abrelpe e Plastivida. Comitê de valorização energética, 2012.

ANEEL (2012), “**RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012 – Texto Compilado**” Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf> > Acesso em 24/11/2015.

ALENCAR, H. S. (2007). **Estudo numérico da termo-aerodinâmica de câmaras de combustão para turbinas a gás: Aplicação ao caso de microturbinas**. Itajubá. Tese (Doutorado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

BIRGEMER, H. G. e CRUTZEN, P. J. **The production of metano from solid waste. Journal of geophysical research**, v. 92, n. D2, p 2181 – 2187. 1987.

BONA, F. S. DE. **As microturbinas e a geração distribuída**. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Unicamp – FEEC/UNICAMP, 2004.

Caderno Globo Universidade. **Futuro do Lixo**. v. 1, n. 1, dez. 2012 Disponível em: < <http://especial.globouniversidade.redeglobo.globo.com/livros/CadernoGUSPLimpa.pdf> > Acesso em 20 de Junho de 2015.

CATERPILLAR (2015), “**Gas Generator Set Product Ratings Summary**” Disponível em < <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/LEXE0422-04> > Acesso em 24/11/2015

CLASSEN, P.A.M; LIER, J.B.; STAMRS, A.J.M. “**Utilization of biomass for supply of energy carrier**”. Applied microbiology and biotechnology, v.52, p.741-755, 1999.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

COELHO, S. T; VELÁZQUEZ, S. M. S. G; MARTINS, O. S; COSTA, D. F; BASAGLIA, F; BACIC, A. C. K. **Instalação E Testes De Uma Unidade De Demonstração De Geração De Energia Elétrica A Partir De Biogás De Tratamento De Esgoto**. São Paulo. Universidade de São Paulo. Disponível em: < <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v2/071.pdf> > Acesso em 02/12/2015.

COHEN H; ROGERS, G. F. C; SARAVANAMUTTOO, H. I. H. **Gas turbine theory**. 1987, Longman Scientific & Technical.

[a] COPEL (2015), “**Acesso De Geração Distribuída Ao Sistema Da Copel (com comercialização de energia)**” Disponível em < [http://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/0342A62F50C68EC4032577F500644B9A/\\$FILE/905100.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/0342A62F50C68EC4032577F500644B9A/$FILE/905100.pdf) > Acesso em 24/11/2015.

[b] COPEL (2015), “**Micro e Minigeração – Sistema de Compensação de Energia Elétrica**” Disponível em <

[http://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/DEE0C6F8CB4D20F403257C9B005C6712/\\$FILE/905200.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/ntcarquivos.nsf/DEE0C6F8CB4D20F403257C9B005C6712/$FILE/905200.pdf) > Acesso em 24/11/2015.

CRUZ, Luiz Cardoso Cruz; **Sistema de Geração** [São Paulo] 2013; Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-empresa/1121-geracao-distribuida.html>>. Acesso em 02/12/2014.

CUMMINS (2015), **“Natural gas generator set QSK60 series engine”** Disponível em <<http://www.cumminspower.com.br/pdf/gas/leanburn/s-1552.pdf>> Acesso em 24/11/2015

ELETROBRAS; **Fontes alternativas de energia**. Na trilha da energia; Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/natrilhadaenergia/meio-ambiente-e-energia/main.asp?View=%7B45B85458-35B3-40FE-BDDD-A6516025D40B%7D>>. Acesso em 20 de Novembro 2014.

EPA. – United States Environmental Protection Agency combined Heat and Power Partnership. **Catalog of CHP Technologies – Technology Characterization – Microturbines**. March 2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_2.pdf>. Acesso em 20 de Novembro 2014.

ESTRE. Disponível em <<http://www.estre.com.br/>> Acesso em 02/07/2015.

FIGUEIREDO, N.J.V. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica**. 2011. 148 f. Dissertação (Pós Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

GURGEL, C. A; MADELA V. Z. **Modeling of a Microturbine Combustion Chamber with the CHEMKIN III Package**. American Flame Research Committee (AFRC) International Symposium. Newport Beach, CA, USA. 2000.

IMBELLONI, Rodrigo; **Gás de aterro sanitário**; Disponível em: <<http://www.stemacenergia.com.br/gas-de-aterros-sanitarios>>. Acesso em 02/06/2015.
INATOMI, T. A. H; UDAETA, M. E. M. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos**. São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana – Escola Politécnica. Instituto de Eletrotécnica e Energia. Universidade de São Paulo. Disponível em <http://www.espacosustentavel.com/pdf/INATOMI_TAHI_IMPACTOS_AMBIENTAIS.pdf> Acesso em 02/07/2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **CH₄ Emissions From Solid Waste Disposal**. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_1_CH4_Solid_Waste.pdf>. Acesso em 20 de Setembro de 2015.

ITAIPU. **Biogás entra pela primeira vez em leilão de reserva da ANEEL**. Setembro 2014; Disponível em <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/biogas-entra-pela-primeira-vez-em-leilao-de-reserva-da-aneel>>. Acesso em 01/12/2014.

LIMA, G. B. **Módulos didáticos de física. Eixo II: Transferência, transformação e conservação da energia. Tema 5: Calor e movimento. Tópico 14: Máquinas Térmicas.** Disponível em

<http://crv.educacao.mg.gov.br/sistema_crv/documentos/md/em/fisica/2010-08/md-em-fs-14.pdf> Acesso em Junho de 2015.

MENDES, Luiz G. G.; SOBRINHO, Pedro M. **Estimate Methods Of Biogas Generation In Sanitary Landfill.** Revista Ciências Exatas, Taubaté, 2005, v. 11, n.2, pp. 71-76.

MILHOR, C. E. (2002). **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto.** São Carlos. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Produto 6 – Resumo executivo PNUD.** Novembro 2010; Disponível em <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em 26 de Novembro 2014.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário: A Geração de Biogás nos Aterros Sanitários** Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso em 01/06/2015.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional - BEN – 4 Séries históricas por tabela.** Disponível em <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores>> Acesso em 02/07/2015.

MWV (2015), **“MWM INTERNATIONAL apresenta sua linha de motores off-road na Agrishow 2012”** Disponível em <<http://mwm.com.br/site.aspx/DetailReleases/MWM-INTERNATIONAL-apresenta-sua-linha-de-motores-off-road-na-Agrishow-2012>> Acesso em 09/06/2015

NASCIMENTO, M. A. R; LORA, E. S; VENTURINI, O. J; MALDONADO, M. R; ANDRADE, R. V; CORRÊA JR, P. S. P; LEITE, M. A. H. **Utilização do Biodiesel de Mamona em Micro-turbinas a Gás – Testes de Desempenho Térmico e Emissões.** Itajubá. Universidade Federal de Itajubá.

PASSARINI, L. C. (1993). **Projeto e análise de válvulas eletromagnéticas injetoras de combustível: uma nova proposta.** São Carlos. 388p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PRAIA DE XANGRILA. **ANEEL libera operação comercial de usina de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em Itajaí.** Maio 2014; Disponível em <<http://praiadexangrila.com.br/aneel-libera-operacao-comercial-da-usina-de-energia-a-partir-de-residuos-solidos-urbanos-em-itajai/>>. Acesso em 01/12/2014.

ROCCO, C. D; MORABITO, R. **Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais**. São Carlos. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. 2011.

[a] SILVEIRA, F. L. **Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel**. Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/maqterm.pdf>> Acesso em Maio de 2015.

[b] SILVEIRA, F. L. **Cilindrada, rotação, taxa de compressão e potência do motor**. Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=547>> Acesso em Junho de 2015.

SOARES, R.C; SILVA, R.C.M. **Evolução histórica do uso de biogás como combustível**, Cuiabá, v.15, n.1, 2010.

SOUSA, Wanderley Lemgruber De; **Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de Duas Abordagens** [Rio de Janeiro] 2000; Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/wlemgruber.pdf>>. Acesso em 01/12/2014.

SOUSA, Zulcy de. 1993. **Elementos de máquinas térmicas**. Rio de Janeiro. Escola Federal de Itajubá, Campus Itajubá, 1980.

STEMAC (2015), **“Grupo Gerador a Gás”** Disponível em <<http://www.stemac.com.br/pt/produtos/Documents/Lamina%20Comercial%20-%20G%C3%A1s%20e%20Biog%C3%A1s.pdf>> Acesso em 24/11/2015

THE WORLD BANK (2003), **Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean**. Disponível em: <http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2005/08/09/000160016_20050809131543/Rendered/PDF/332640handbook.pdf>.

WELLE, Deutsche; **Para evitar crise, Brasil precisa diversificar matriz energética**; Carta Capital; Disponível em: <<http://www.cartacapital.com.br/economia/para-evitar-crise-brasil-precisa-diversificar-matriz-energetica-3395.html>>. Acesso em 20 de Novembro 2014.

ESTRE. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em 07/12/2015.

ESTRE. Disponível em <<http://www.census.gov/>> Acesso em 07/12/2015.

CEEETA (2015), **“Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos”** Disponível em <<http://www.marioloureiro.net/tecnica/energProdu/TecnoMicroGeraCEEETA.pdf>> Acesso em 24/11/2015

