

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
USP**

**PROJETO TERMODINÂMICO DE ATERROS SANITÁRIOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Thales Ferreira De Andrade Garcia

**São Paulo
2011**

THALES FERREIRA DE ANDRADE GARCIA

5947624

**PROJETO TERMODINÂMICO DE ATERROS SANITÁRIOS PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

**Relatório parcial apresentado à
disciplina PME 2600 – Projeto
Integrado III, da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo**

Professores:

Dr. Alberto Hernandez Neto

Orientadores:

Prof. Dr. Euryale J. G. de Jesus Zerbini

Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta

São Paulo

2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Garcia, Thales Ferreira de Andrade
Projeto Termodinâmico de aterros sanitários
para geração de energia / T.F.A. Garcia. – São Paulo, 2011.
50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Combustíveis alternativos 2. Fontes alternativas de ener-
gia 3. Tratamento térmico 4. Biogás 5. Aterros sanitários I. Uni-
versidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecânica II. t.

DEDICATÓRIA

Dedica-se este projeto a todos que encontram energia no que foi descartado.

A boa notícia é que sabemos o que fazer. A boa notícia é que temos tudo que precisamos agora para responder ao desafio do aquecimento global. Temos todas as tecnologias que precisamos e novas estão sendo desenvolvidas. E conforme se tornam disponíveis e mais acessíveis quando produzidas em escala, elas tornarão mais fácil reagir. Mas não é bom esperar, não podemos esperar, não devemos esperar.

Al Gore, Trecho do discurso *Katrina, Global Warming*, São Francisco, 2005

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Rede de tubos coletores de metano. Extraído de [4].....	13
Figura 3.2 – <i>a)</i> Imagem e <i>b)</i> esquematização do tubo coletor de metano.....	13
Figura 3.3 – Tubulação de sucção e <i>flare</i> [8].....	14
Figura 4.1 – <i>Layout</i> do sistema de geração de energia por biogás de aterro sanitário.....	15
Figura 5.1 – Ilustração de uma torre de enchimento para lavagem de biogás [10]. .	17
Figura 5.2 – Modelo de troca de massa em uma torre de enchimento para lavagem de biogás.....	17
Figura 6.1 – Ciclo-padrão Otto a ar.	25
Figura 7.1 – Configuração com a instalação do gasômetro.	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Variação da umidade relativa ao longo de um dia típico no interior de São Paulo [7].	10
Gráfico 2.2 – Variação da vazão de biogás captada em função do horário do dia...	11
Gráfico 5.1 – Variação da vazão molar de biogás captada em função do horário do dia.	19
Gráfico 5.2 – Altura Z da torre de absorção em função de ξ com $HTU = 0,3$ m.....	23
Gráfico 7.1 – Variação da vazão de biogás destinada à geração de energia em função do horário do dia.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição média adotada para o biogás.....	8
Tabela 5.1 – Concentração de substâncias do chorume [9].	16
Tabela 5.2 – Massa molar dos componentes gasosos do biogás.....	19
Tabela 6.1 – Composição mássica média do biogás.....	28

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
1 Introdução	5
1.1 Objetivos	5
1.2 Justificativa.....	5
2 Dados operacionais de um CTR	7
2.1 Produção volumétrica de biogás	7
2.2 Composição média do biogás	8
2.3 Sistema de lavagem e separação de gases.....	9
2.4 Influências na produção de biogás.....	9
2.5 Vida esperada do aterro	11
2.6 Pressão de sucção dos sopradores	12
3 Sistema de Coleta.....	13
4 LAYOUT	15
5 TORRE DE ABSORÇÃO	16
5.1 Dimensionamento da torre de absorção	17
5.2 Solução matemática para o dimensionamento da torre	22
6 CICLO DE COMBUSTÃO E GASÔMETRO.....	24
6.1 Modelagem termodinâmica do ciclo Otto	25
6.2 Solução matemática para o modelo termodinâmica do ciclo Otto.....	30
7 GASÔMETRO.....	32
7.1 Projeto da energia gerada.....	32
7.2 Dimensionamento do Gasômetro.....	33
7.3 Configuração do aterro com o gasômetro	34

8	Conclusão	36
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
	APÊNDICE A – CÁLCULO DE ALTURA DE TORRE PELO SOFTWARE EES	39
	APÊNDICE B – CÁLCULO DO CICLO OTTO PELO SOFTWARE EES.....	41
	ANEXO A – TABELA TÉCNICA ER-BR – GSCA330 – 330 kVA	43

RESUMO

A degradação de matéria orgânica em aterros sanitários produz o biogás, um composto de gases formado principalmente por metano e dióxido de carbono. Este gás pode ser usado como combustível em um gerador de energia elétrica, sendo sua queima absolutamente conveniente do ponto de vista ambiental, visto que o gás carbônico resultante desta queima é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global 21 vezes menor que o metano¹.

O projeto consiste em estudar uma central de tratamento de resíduos e desenvolver uma modelagem dos sistemas de extração, lavagem e queima do gás metano produzido, levando em conta todos os aspectos técnicos, ambientais, legais e econômicos necessários à implementação de tal projeto no mercado.

Palavras-chave: biogás – ciclo termodinâmico – energia em aterros – plano de negócio

¹ A comparação é feita em base mássica e com horizonte de tempo de 100 anos, como apresentado pelo estudo da Climate Change 1995, The Science of Climate Change: Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report, pág. 22. http://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_i/ipcc_sar_wg_i_full_report.pdf

ABSTRACT

The organic matter degradation in landfills produces the biogas, a gases compound majorly formed by methane and carbon dioxide. This gas can be used as a fuel in an electrical energy generator, being its burning absolutely convenient by the environmental point of view, since the carbon dioxide resulting from the burning has 21 times less global warming potential than the methane.

The project consists in studying a landfill and developing a modeling of the extraction, washing and burning systems, considering all the technical, environmental, legal and economical aspects needed to the implementation of this project in the market.

Keywords: biogas – thermodynamic cycle – landfill energy – business plan

1 Introdução

A combustão dos gases oriundos da decomposição orgânica, conhecidos como biogás, tem sido cada vez mais explorada, principalmente nos Estados Unidos, Europa, Japão e China. Embora incipiente no Brasil, os principais pólos tecnológicos já voltaram sua atenção para este método, como o Centro Nacional de Referência em Biomassa, da Universidade de São Paulo (Cenbio-USP) e o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Coppe-UFRJ).

No final de 2009 o Cenbio concluiu um projeto piloto de tratamento térmico no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Caieras, que desviava uma parte do biogás produzido para um motor ciclo Otto adaptado para operação com biogás, como mostrado na Revista Brasileira de Bioenergia [1].

Segundo o portal eletrônico Planeta Coppe [2], em Agosto de 2010, a Coppe assinou um acordo com a Companhia Municipal de Limpeza Urbana (Comlurb) do Rio de Janeiro para gerar energia em usinas instaladas em aterros sanitários.

1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é coletar os dados operacionais de um CTR que comporte o sistema, a fim de desenvolver um projeto que detalhe, em todos os aspectos relevantes a sua comercialização, os sistemas de captação e lavagem do gás, bem como o ciclo térmico de geração de energia.

1.2 Justificativa

A principal motivação deste projeto reside no caráter renovável desta alternativa energética. As recentes pesquisas por parte das grandes universidades brasileiras indicam que a solução pode ser economicamente viável, e toda a tecnologia necessária a sua implementação é acessível, inclusive algumas plantas nacionais já

possuem usinas termoelétricas. O projeto apresenta um motivador econômico e ambiental, uma vez que o metano produzido em aterros é normalmente queimado em estruturas cilíndricas chamadas *flares*. Desta forma, alguns aterros estão queimando combustível, quando poderiam aproveitá-lo em um ciclo gerador.

2 Dados operacionais de um CTR

Para o levantamento dos dados operacionais de um CTR, entrou-se em contato com o Eng. Fernando Freitas, Coordenador Operacional do CTR-Caieiras da empresa Essencis Soluções Ambientais S.A. O CTR-Caieiras é o maior aterro da América Latina e destina 100% do biogás captado para os *flares* para obtenção de Créditos de Carbono. O biogás é coletado por um sistema de drenos conectados operados a 4 sopradores.

Além das informações necessárias, ele também destacou o problema causado pelos erros na previsão de produção de biogás após o encerramento das operações de um aterro. Segundo ele, vários CTR's instalaram usinas termelétricas a biogás, prevendo uma queda sutil na produção de biogás ao longo de 20 anos após o fechamento do aterro. Entretanto, o que se verifica na prática é uma queda de 50% de produção em apenas cinco anos.

Esta questão reforça ainda mais a importância de projetos portáteis e econômicos no que tange ao ciclo térmico de geração elétrica a biogás.

2.1 Produção volumétrica de biogás

A produção volumétrica média de biogás, em m^3/h , corresponde a:

$$\dot{m}_{biogás} = 13.000 \text{ m}^3/h$$

Atingindo até o valor de $15.000 \text{ m}^3/h$, fica evidente que se trata de uma produção de combustível de escala média. A produção específica média é de:

$$\dot{m}'_{biogás} = 1.024 \text{ kg/m}^2h$$

2.2 Composição média do biogás

A composição média do biogás está em torno de 45 a 48% de gás metano, 30% de gás carbônico e 4 a 6% de gás oxigênio, sendo o restante uma mistura gasosa composta predominantemente por nitrogênio. Desta forma, para este estudo será considerada a seguinte composição em base molar, apresentada na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Composição média adotada para o biogás.

Substância	Porcentagem molar (%)
Metano (CH_4)	46,5
Gás Carbônico (CO_2)	30,0
Oxigênio (O_2)	6,0
Nitrogênio (N_2)	17,5

Considerando esta proporção de gás metano, é interessante fazer uma comparação com dados de produção de combustíveis de origem fóssil, a fim de poder avaliar estes dados sob uma perspectiva de mercado. Desta forma, para a vazão $\dot{m}_{biogás} = 13.000 \text{ m}^3/\text{h}$, temos uma produção de metano² de:

$$\dot{m}_{CH_4} = 6.045 \text{ m}^3/\text{h}$$

ou

$$\dot{m}_{CH_4} = 145.080 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Esta produção diária de gás metano equivale energeticamente a 967 barris de petróleo, segundo o valor-base apresentado no site referenciado em [5]. Ainda, Esta produção corresponde a aproximadamente 75% de todo o fornecimento de gás natural, pelo gasoduto Brasil-Bolívia, na cidade de Joinville-SC (500.000 habitantes).

² A porcentagem volumétrica de uma substância é igual a sua composição molar.

2.3 Sistema de lavagem e separação de gases

Atualmente, o CTR-Caieiras não possui sistema de separação de gases, visto que não é necessário para o processo de queima nos *flares*. Para este caso, é preciso fazer apenas uma extração das partículas sólidas e líquidas arrastadas pelo biogás, o que é feito em um tanque condensador com *demister*. Este condensado, que também carrega particulados sólidos, é então encaminhado às lagoas de chorume para ser tratado pela SABESP.

2.4 Influências na produção de biogás

Por se tratar de um processo orgânico, a produção de biogás depende de muitas variáveis naturais, como a temperatura, umidade e pH, como explica FILHO, L. F. B. [3]. Dentre os principais fatores, encontram-se:

- a) Umidade – Consiste na umidade inicial do resíduo e da água presente no aterro, por infiltração geológica e por decomposição. A produção de biogás cresce diretamente com o teor de umidade. Esta teoria foi verificada na prática pelos engenheiros do CTR-Caieiras, que concluíram que além de aumentar o teor de umidade, a chuva realiza um importante papel de selar o solo, evitando as perdas de biogás para a atmosfera. Os estudos realizados mostraram que a perda de biogás pela superfície corresponde a 34% da geração das células de aterramento.
- b) pH – A faixa ótima de produção de metano encontra-se entre 6 e 8, sendo que fora desta faixa, a produção é muito baixa;
- c) Temperatura – Com o tempo, os gases quentes formados na decomposição elevam a temperatura do aterro, sendo que estes gases estão geralmente entre 30 e 60 °C.

Desta forma, pode-se intuir que é importante conhecer a variação da taxa de produção de biogás em função do horário do dia, a fim de se obter um projeto mais flexível que possa aproveitar os picos de demanda energética. Portanto, analisando o comportamento da umidade e temperatura ao longo de um dia sem chuva, pode-

se levantar o comportamento da produção de biogás ao longo de um dia. Segundo a apostila de notas de aula do curso de agrometeorologia da FAEM-UFPEL [7], a pressão de vapor, temperatura, pressão de vapor saturado e umidade relativa do ar em um dia seco típico podem ser representadas pelo Gráfico 2.1.

Observa-se um comportamento senoidal da umidade relativa do ar ao longo do dia, de modo que será considerado que a produção de biogás acompanhará diretamente este comportamento, de acordo com o que fora mencionado no item (a) desta seção.

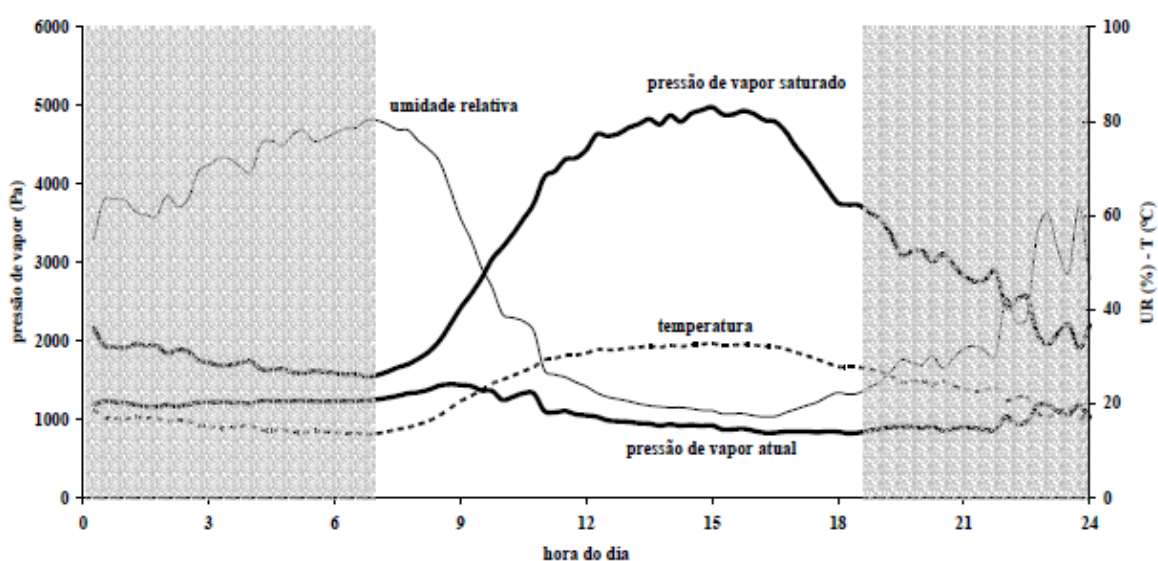


Gráfico 2.1 – Variação da umidade relativa ao longo de um dia típico no interior de São Paulo [7].

Assim pode-se escrever a vazão mássica de biogás em função da hora do dia, segundo as equações:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{biogás}} &= 2000 \cdot \sin(\theta) + 13000 \\ \theta &= 15 \cdot t + 15\end{aligned}$$

Onde t é a hora do dia e $\dot{m}_{\text{biogás}}$ é a vazão de biogás captada, em m^3/h . A defasagem de 15° em θ foi aplicada para manter-se o valor de mínima produção próxima às 17 h e o de máxima produção próxima às 6 h, para obter uma correspondência mais fiel ao Gráfico 2.1. Também se multiplicou a função seno por

2.000 m^3/h para simular a variação que atinge até 15.000 m^3/h , conforme apresentado na seção 2.1.

Assim, utilizando-se o Software Engineering Equation Solver (EES), construiu-se o Gráfico 2.2, que apresenta a vazão mássica de biogás em função da hora do dia.

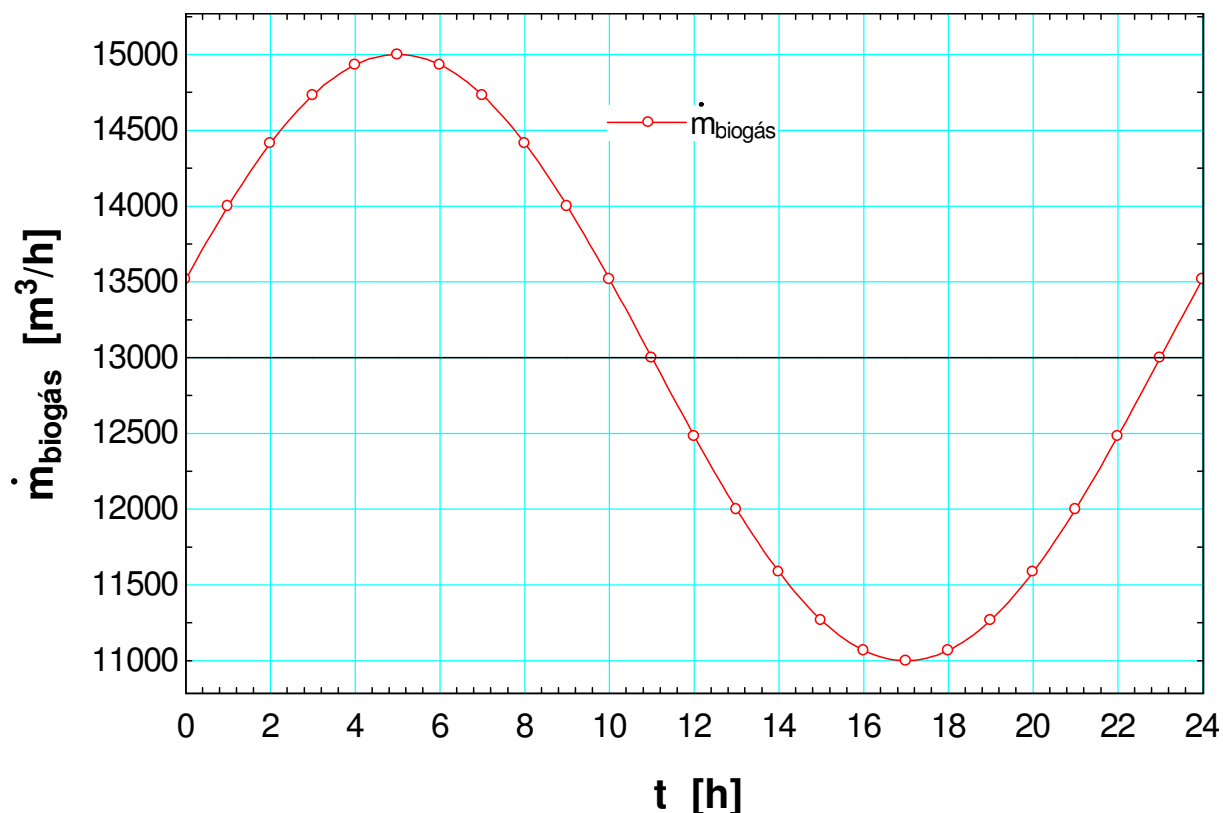


Gráfico 2.2 – Variação da vazão de biogás captada em função do horário do dia.

2.5 Vida esperada do aterro

Para melhores conclusões sobre a produção de biogás, é necessário conhecer a vida esperada do aterro. Além de definir algumas questões técnicas de produção, este parâmetro determina certos aspectos financeiros necessários à viabilização econômica do projeto. Estima-se que o CTR-Caieiras manterá suas atividades até 2029.

2.6 Pressão de sucção dos sopradores

A pressão de operação dos sopradores é de 0,2 bar para que o biogás produzido na célula de aterramento não escape para a atmosfera (1 bar).

3 Sistema de Coleta

O gás metano é produzido em células subterrâneas seladas por camadas de argila e terra. A pressão destas células é mantida abaixo da atmosférica, de modo que o gás não vaze para a atmosfera e escoe em uma rede de tubos coletores, que ficam sob o solo e são dirigidos para a seção de lavagem e tratamento. Os tubos coletores são mostrados nas Figuras Figura 3.1 e Figura 3.2.



Figura 3.1 – Rede de tubos coletores de metano. Extraído de [4].

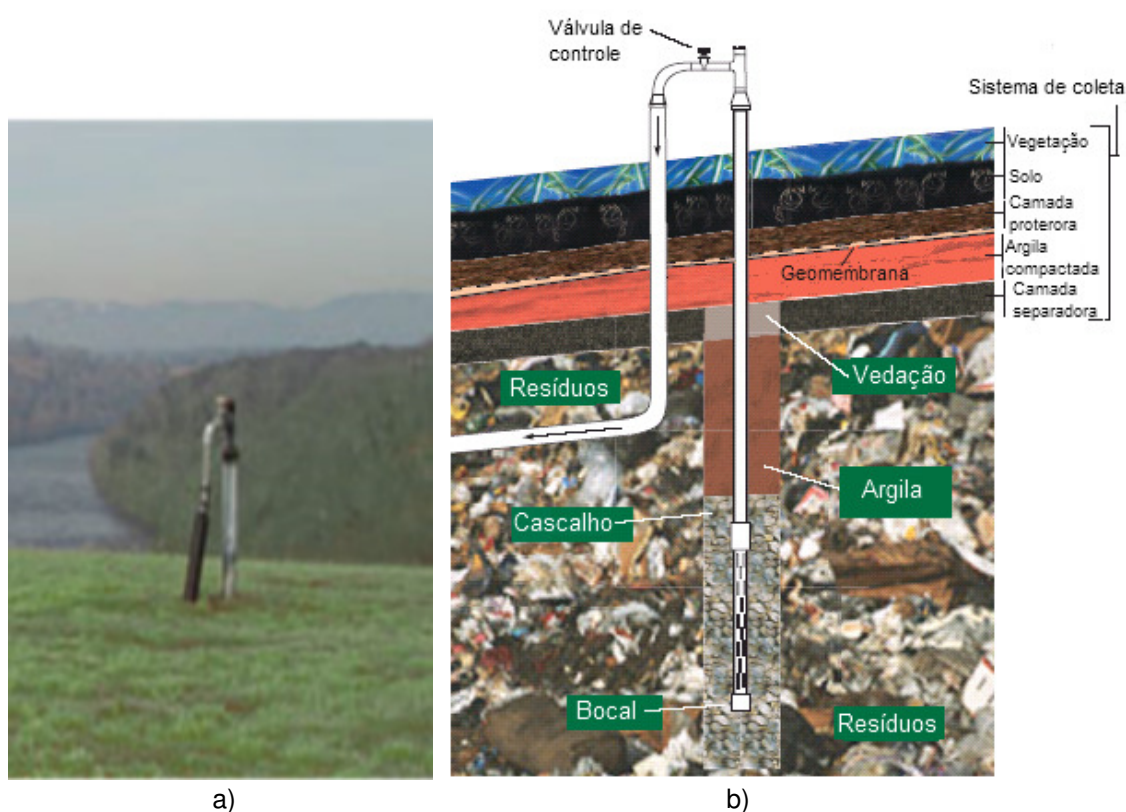


Figura 3.2 – a) Imagem e b) esquematização do tubo coletor de metano.

Os sopradores sugam o biogás pelos drenos forçando-o por um ciclone *demister* e o direcionam para o *flare*. A Figura 3.3, extraída de Figueiredo, N. J. V. [8], apresenta o conjunto sucção-*flare* do CTR-Caieiras.



Figura 3.3 – Tubulação de sucção e *flare* [8].

No CTR-Caieiras, é utilizada uma tubulação de polietileno de alta densidade (PEAD) com 0,4 m de diâmetro.

4 LAYOUT

Sendo apresentado o sistema de coleta, pode-se organizar um *layout* do sistema termodinâmico completo, o qual é mostrado na Figura 4.1.

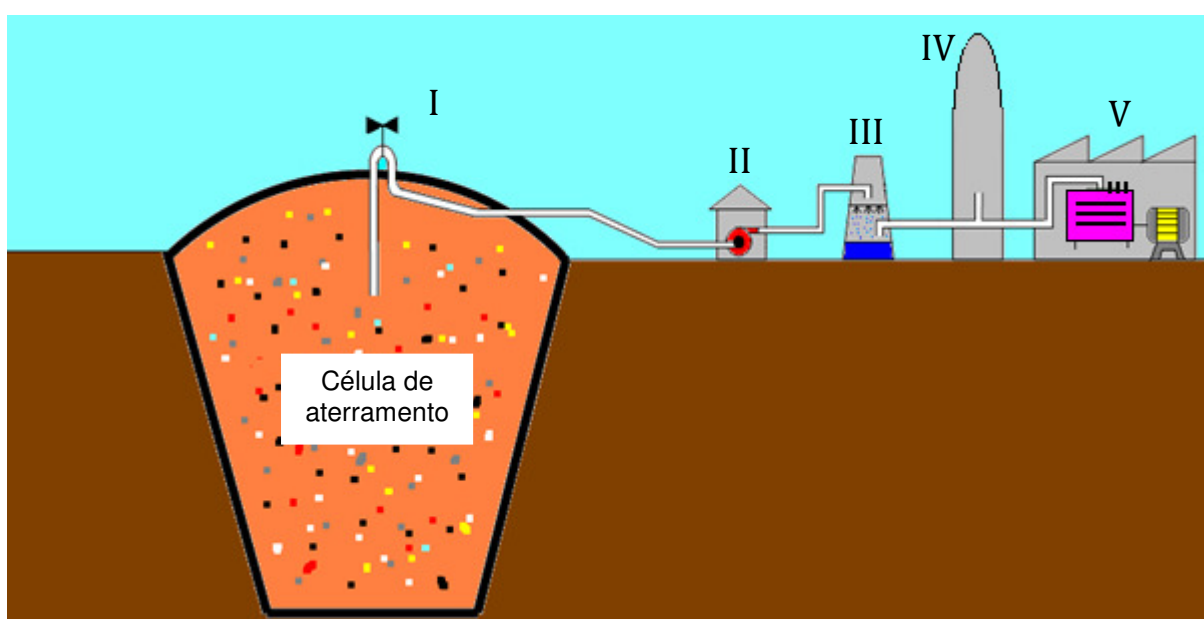


Figura 4.1 – *Layout* do sistema de geração de energia por biogás de aterro sanitário.

Na Figura 4.1, o biogás gerado na célula de aterramento passa pela válvula de controle em I, em um escoamento forçado pela bomba II. Em seguida, o gás é lavado na torre de lavagem III, a fim de filtrar compostos tóxicos mais pesados e gases indesejados na queima.

Conforme discutido na seção 2.4, a produção de biogás mantém um regime oscilatório quase constante e, naturalmente, quantias superavitárias de gás serão observadas em alguns momentos do processo e devem ser encaminhadas para o gasômetro. Assim, uma parte do gás é desviada para o gasômetro IV, onde é queimada. Finalmente, a outra parte abastece o ciclo termodinâmico V de combustão interna.

5 TORRE DE ABSORÇÃO

O chorume arrastado pelo biogás não precisa ser rigorosamente separado quando se objetiva uma queima em *flare*, que é relativamente simples. Quando se propõe uma queima em ciclos termodinâmicos, as condições operacionais são tão solicitantes para os materiais do maquinário, que compostos ácidos poderão significar grandes problemas de deterioração das peças.

Por possuir altos parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), como mostra a Tabela 5.1, o chorume é rico em compostos de amônia que, em contato com umidade, formam amoníaco, uma substância potencialmente corrosiva.

Tabela 5.1 – Concentração de substâncias do chorume [9].

Substância (mg/L)	Faixa de variação
DBO ₅	15.000 – 50.000
DQO	21.000 – 78.000
Sólidos Suspensos	660 – 5.000
Nitrato	0,1 – 250
Nitrogênio amoniacal	50 – 5.000
Nitrito	0,1 – 40
Cloretos	100 – 12.400
Sulfato	18 – 2.000

Em vista da carência de medições de dados mais realistas, será considerada somente a lavagem de amônia do biogás, de modo que a fração molar adotada será de 0,5%, valor admitido com base na observação empírica da concentração de amônia em gases de biodigestão e de processos industriais.

5.1 Dimensionamento da torre de absorção

Os equipamentos mais comuns na absorção de substâncias são as torres de pratos e as torres de enchimento. Segundo as notas de aula de absorção do Centro de Tecnologia da UFAL [10], as torres de recheio são recomendadas quando o sistema é corrosivo e, além disso, verifica-se que é geralmente utilizado o recheio de anéis Raschig para absorção de amônia, bem como água, como líquido de lavagem. A Figura 5.1, adaptada de [10], mostra uma ilustração de uma torre de enchimento apresentando as substâncias de entrada e saída.

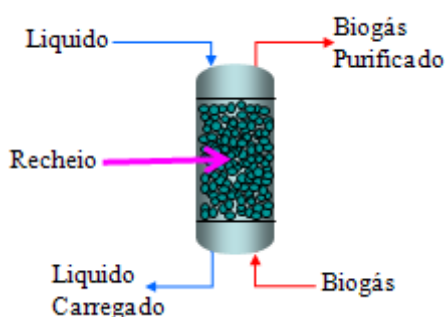


Figura 5.1 – Ilustração de uma torre de enchimento para lavagem de biogás [10].

Assim, é possível montar um modelo de trocador de massa, apresentado na Figura 5.2, onde L é a vazão da água de entrada (topo) e G é a vazão molar de biogás na entrada (base).

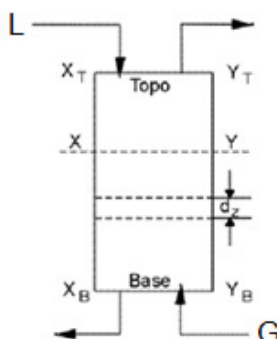


Figura 5.2 – Modelo de troca de massa em uma torre de enchimento para lavagem de biogás.

Na Figura 5.2, x_T e x_B representam as concentrações de amônia na corrente de água no topo da torre (entrada) e na base (saída), respectivamente e y_T e y_B representam as concentrações de amônia do biogás no topo da torre (saída) e na base (entrada), respectivamente.

Admitindo que o biogás se comporte como gás ideal e que entre na torre a 60°C e 1 bar, pode-se escrever a seguinte relação:

$$p \cdot \dot{m}_{biogás} = G \bar{R} T$$

Onde p é a pressão do biogás, $\dot{m}_{biogás}$ é a vazão volumétrica ao longo do dia, $\bar{R}$ é a constante universal dos gases perfeitos e T , a temperatura. Resolvendo, obtém-se:

$$\begin{aligned} P &= 101320 \text{ [Pa]} \\ T &= (60 + 273) \cdot 1 \text{ [K]} \\ \dot{m}_{Biogás} &= 13000 \text{ [m}^3\text{/h]} \\ P \cdot \dot{m}_{Biogás} &= G \cdot 8,314 \text{ [kJ/kmol-K]} \cdot T \end{aligned}$$

Para o valor médio de $\dot{m}_{biogás} = 13.000 \text{ m}^3/\text{h}$, temos:

$$G = 475,737 \text{ [kmol/h]} = 475.737 \text{ [mol/h]}$$

Para o valor de produção de biogás ao longo do dia, temos o Gráfico 5.1. Para o dimensionamento da torre de absorção, será considerada a maior vazão molar, que ocorre às 5 h, como mostra o Gráfico 5.1 e que vale 548.927 [mol/h].

Segundo [10], a altura de uma torre de absorção pode ser calculada por:

$$Z = N_G H T U$$

Onde N_G é o número teórico de unidades de transferência, dado por:

$$N_G = \int_{y_T}^{y_B} \frac{dy}{y - y^*}$$

Sendo y a fração molar da amônia na fase gasosa em uma dada altura z , e y^* é a fração molar da amônia em equilíbrio com a fase líquida.

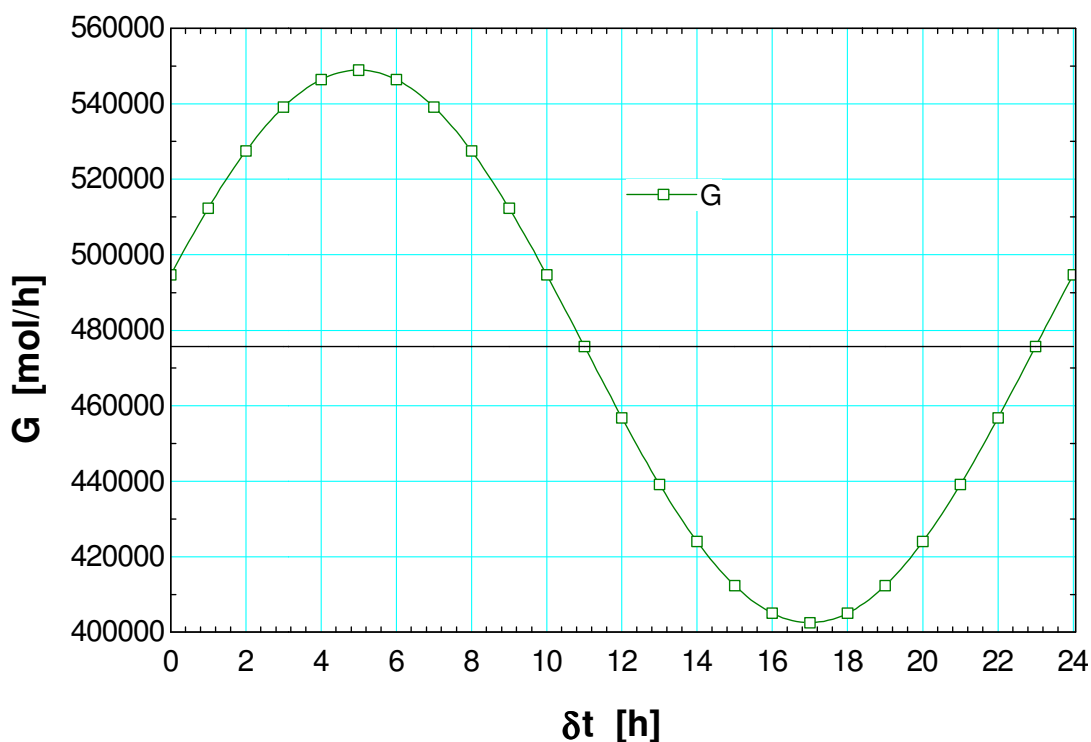


Gráfico 5.1 – Variação da vazão molar de biogás captada em função do horário do dia.

A altura teórica de uma unidade de transferência, HTU , varia entre 0,3 e 0,7 para sistemas amônia x água, como mostrado em [10].

Onde $\bar{G}$ e $\bar{L}$ são as vazões G e L expressas em $\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$.

A massa molar de biogás pode ser obtida conhecendo-se as frações molares e massas molares de seus componentes, obtidas pelas tabelas Tabela 2.1 e Tabela 5.2 segundo a equação:

$$M_{\text{Biogás}} = \text{FraçãoMolar}_{\text{CH}_4} \cdot M_{\text{CH}_4} + \text{FraçãoMolar}_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} + \text{FraçãoMolar}_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} + \text{FraçãoMolar}_{\text{N}_2} \cdot M_{\text{N}_2}$$

Tabela 5.2 – Massa molar dos componentes gasosos do biogás.

Substância	Massa molar (g/gmol)
Metano (CH_4)	16,04
Gás Carbônico (CO_2)	44,01
Oxigênio (O_2)	32

Nitrogênio (N_2)	28,01
----------------------	-------

Como resultado, obtém-se a massa molar do biogás, ($M_{Biogás}$):

$$M_{Biogás} = 27,49 \text{ [g/gmol]}$$

Logo, temos:

$$\bar{G} = G \cdot M_{Biogás} \cdot \frac{10^{-3} \cdot 1 \text{ [kg/g]}}{A}$$

Onde A é a área da torre, que geralmente é fabricada com diâmetros de 23% da altura da torre, segundo [10].

Para a corrente de água, será trabalhado com a seguinte razão de vazões mássicas:

$$\bar{L} = \phi \bar{G}$$

De modo que:

Para se obter o integrando da expressão para N_G , temos que, segundo as notas de aula do curso de Trocadores de Calor e Massa, da Escola Politécnica da USP [11], o balanço de massa global é dado por:

$$G(y_T - y) = L(x_T - x)$$

$$(y_T - y) = \frac{L}{G} (x_T - x) = \phi \frac{M_{Biogás}}{M_{H_2O}} (x_T - x) =$$

Sendo $M_{H_2O} = 18,1 \text{ [g/gmol]}$ e $x_T = 0$.

Assim,

$$y = y_T + \left(\phi \frac{M_{Biogás}}{M_{H_2O}} \right) x$$

Conforme mencionado anteriormente, a fração molar adotada para a amônia diluída será de 0,5% e, considerando-se uma exigência de remoção de 80% desta amônia, temos:

$$0,8 = \frac{y_B - y_T}{y_B} = \frac{0,005 - y_T}{0,005} \Rightarrow y_T = 0,001$$

Das relações de equilíbrio para a amônia com biogás e água, temos respectivamente:

$$p = p_T y^*$$

$$p = 1,12 x$$

Com $p_T = 1 \text{ atm}$ e escrevendo-se x em função de y^* , obtém-se:

$$y^* = \frac{1,12}{\left(\phi \frac{M_{\text{Biogás}}}{M_{H_2O}}\right)} (y - y_T) = \frac{1,12}{\xi} (y - 0,001) = \frac{1,12}{\xi} y - \frac{0,00112}{\xi}$$

Sendo $\xi = \left(\phi \frac{M_{\text{Biogás}}}{M_{H_2O}}\right)$.

Assim, pode-se escrever o termo $(y - y^*)$, que será conveniente na integração de N_G .

$$(y - y^*) = \left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) y + \frac{0,00112}{\xi}$$

Logo,

$$N_G = \int_{y_T}^{y_B} \frac{d_y}{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) y + \frac{0,00112}{\xi}} = \int_{0,001}^{0,005} \frac{d_y}{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) y + \frac{0,00112}{\xi}}$$

Como ξ é constante em y , tem-se que:

$$N_G = \frac{1}{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right)} \ln \left[\frac{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) 0,005 + \frac{0,00112}{\xi}}{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) 0,001 + \frac{0,00112}{\xi}} \right]$$

Logo, a altura da torre é escrita da seguinte forma:

$$Z = N_G HTU$$

$$= HTU \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right)} \ln \left[\frac{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) 0,005 + \frac{0,00112}{\xi}}{\left(1 - \frac{1,12}{\xi}\right) 0,001 + \frac{0,00112}{\xi}} \right] \right\}$$

Uma função do valor de HTU e do parâmetro ξ , que nada mais é do que uma relação entre as vazões molares da água e do biogás.

5.2 Solução matemática para o dimensionamento da torre

Utilizando o software EES, cuja estrutura está apresentada no

, determinou-se a altura Z da torre em função do valor de HTU e do parâmetro ξ , fornecendo-se o Gráfico 5.2, que apresenta o valor da altura Z da torre de absorção em função de ξ . A compreensão do comportamento de Z em função de HTU é muito simples, visto que se trata de uma equação de 1º grau com inclinação positiva, ou seja, quanto menor o valor de HTU, menor será a altura da torre. De acordo com o Gráfico 5.2, existe uma tendência assintótica da curva, de modo que a partir de um certo valor de ξ , a energia necessária na movimentação da água não justificará o pouco benefício adquirido com a diminuição da altura da torre.

Entretanto, observa-se uma faixa crítica de variação de Z quando $\xi < 1,1$. Isto mostra que, para o grau de pureza desejado, é importante considerar uma vazão molar de água maior que a vazão molar de biogás.

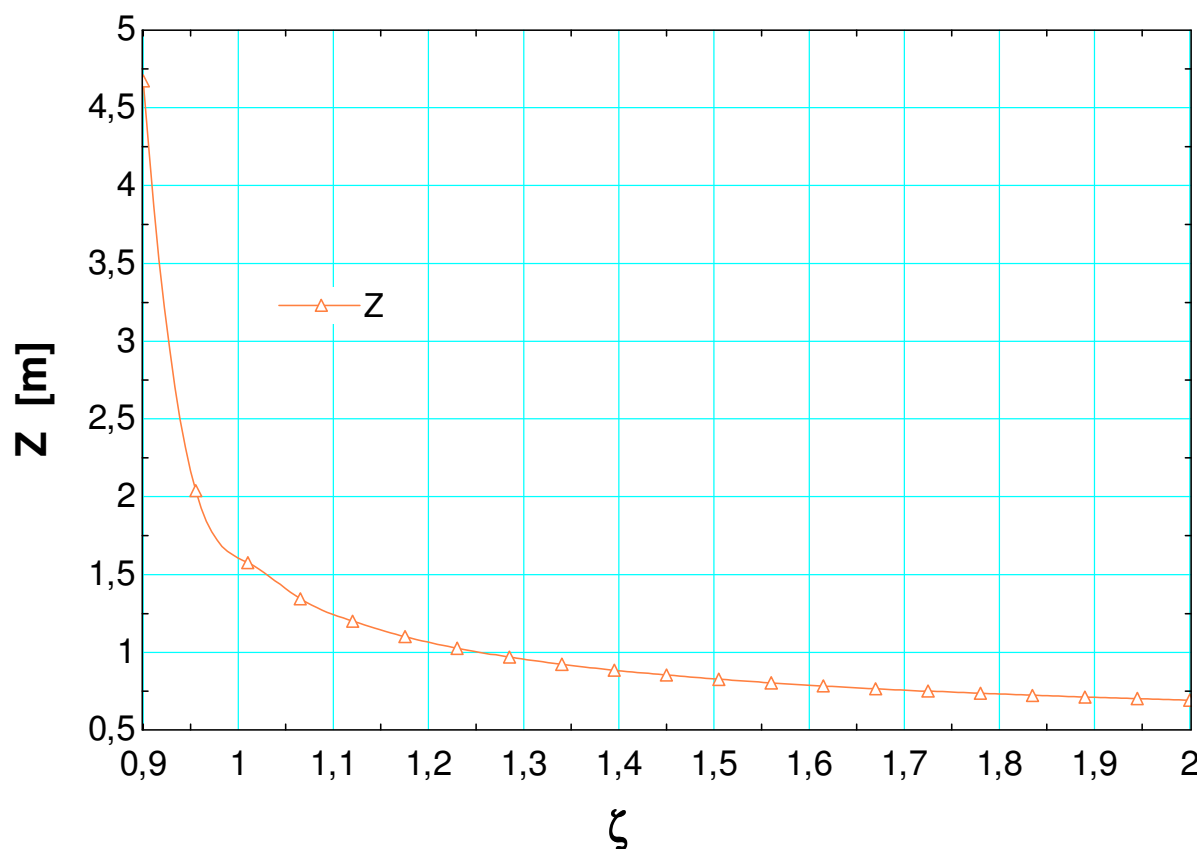


Gráfico 5.2 – Altura Z da torre de absorção em função de ξ com HTU = 0,3 m.

Assim, adotando-se $HTU = 0,3$ e $\xi = 1,1$, temos uma altura $Z = 1,25$ m e Diâmetro = 0,287 m. Assim, utilizando-se um recheio com menos de 1/8 do diâmetro da torre, conforme recomendado em [10], pode-se obter as medidas padronizadas para anéis Rischig, apresentadas no catálogo da empresa Celene [12] para os anéis de 1 polegada.

6 CICLO DE COMBUSTÃO E GASÔMETRO

O ciclo térmico de combustão interna que será estudado é um ciclo Otto a biogás. A escolha deste sistema se deve ao fato de: possuir baixo custo quando comparado a outros sistemas, como microturbinas (que são importadas); operação e manutenção mais simples, pois microturbinas exigem combustíveis em condições mais controladas; e não haver perdas significativas de eficiência quando operando com biogás, conforme justificado em [1].

Além disso, estes sistemas já estão homologados no Brasil, de modo que existem fornecedores desenvolvendo produtos especializados ao uso de biogás, para até 264 kW. Dentre estes fornecedores, está a ER-BR – Energias Renováveis LTDA, desenvolvedora do GSCA330, cuja tabela de especificações técnicas está anexada no **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A modelagem termodinâmica empregada irá estimar os parâmetros operacionais do motor em questão.

6.1 Modelagem termodinâmica do ciclo Otto

Na modelagem termodinâmica do ciclo Otto a ar e biogás, será considerado que não há troca de calor entre os gases e as paredes dos cilindros, e que as irreversibilidades associadas aos gradientes de pressão e temperatura durante a compressão e expansão podem ser desprezadas. Cabe destacar que, nesta modelagem, apenas será considerado o calor transferido do combustível (biogás) para o ar, sem estudar os efeitos de mistura que resultam nos gases de combustão, de modo que o sistema se aproxima do ciclo-padrão a ar, representado pela Figura 6.1.

Ora, utilizar o ciclo-padrão nesta análise é um procedimento justificável, pois não será necessário estudar com apuro as propriedades dos gases de exaustão, já que o ciclo total deste estudo se encerra nesta etapa.

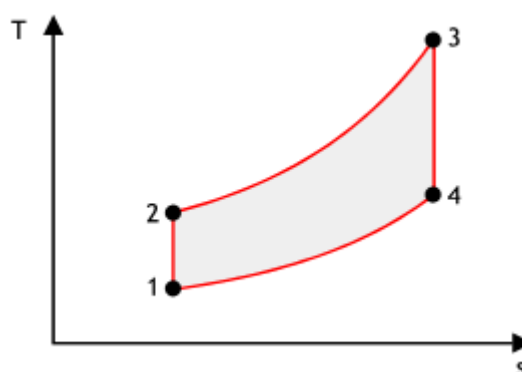


Figura 6.1 – Ciclo-padrão Otto a ar.

Na Figura 6.1, o processo (1-2) é uma compressão isentrópica do ar, promovida pelo movimento do pistão, do ponto morto inferior (PMI) até o ponto morto superior (PMS). No estado 1, o ar encontra-se na temperatura de referência (25°C) e pressão atmosférica. A transferência de calor a volume constante no processo (2-3) representa o calor fornecido pela combustão do biogás, sendo que o pistão está momentaneamente parado no PMS. Conforme o pistão se desloca novamente para o PMI, ocorre a expansão isentrópica do processo (3-4). A substituição do gás quente pelo ar frio admitido é modelada pela rejeição a volume constante de calor do ar no processo (4-1), considerando-se o pistão parado momentaneamente no PMI.

Conforme apresentado em WYLEN, G. J. VAN, *et al* [13], supondo que o calor específico do ar é constante, determina-se o rendimento térmico por:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Onde Q_H e Q_L são a quantidade de calor fornecido a cada quilograma de ar pelo combustível em (2-3) e o calor rejeitado por cada quilograma de ar em (4-1), respectivamente, podendo ser determinados por:

$$Q_H = c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$Q_L = c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Onde c_v é o calor específico a volume constante do ar, de modo que:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \left[\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \right]$$

Ou ainda, podemos reorganizar convenientemente da seguinte forma:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \left[\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right]$$

Esta equação evidencia uma possibilidade de simplificação muito útil, pois, aplicando a 2ª Lei da Termodinâmica nos processos (2-3) e (4-1), temos:

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

e

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

Mas, como $V_1 = V_4$ e $V_2 = V_3$, temos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

E, portanto:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

De sorte que a equação a equação do rendimento térmico fica:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

ou

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \left[\frac{V_1}{V_2} \right]^{(1-k)}$$

A razão V_1/V_2 é geralmente denominada razão de compressão, simbolizada por r_v . Assim, o rendimento térmico pode finalmente ser dado por:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{(k-1)}}$$

Com $k = 1,4$. Segundo Abreu, F. V. [14], a eficiência energética de ciclos Otto a biogás varia entre 50 e 60%. Assim, adotando-se um rendimento térmico nesta faixa, pode-se determinar a razão de compressão.

Para determinar os estados termodinâmicos do ciclo, resta determinar o calor fornecido ao ar pelo combustível, Q_H . Assim, pela 1ª Lei da termodinâmica no interior dos cilindros:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{\text{biogás}} + \dot{m}_{\text{biogás}} \cdot PCI_{\text{biogás}}$$

Onde:

$$\dot{Q}_{\text{biogás}} = \dot{m}_{\text{biogás}} \cdot c_{v;\text{biogás}} \cdot (T_{\text{biogás}} - T_{\text{ref}})$$

Para determinar o calor específico do biogás, pode-se utilizar o seguinte procedimento comumente adotado para misturas gasosas:

$$c_{v;\text{biogás}} = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot c_{v;i})$$

Sendo que c_i é a fração mássica de cada elemento da mistura e c_{vi} são seus respectivos calores específicos a volume constante e pressão de referência.

Desta forma, a Tabela 6.1 apresenta a fração mássica média dos componentes, bem como seus valores de c_{vi} .

Conforme visto na seção 5, a temperatura do biogás é de 60 °C.

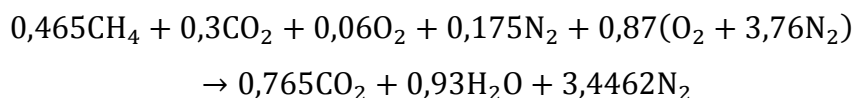
Tabela 6.1 – Composição mássica média do biogás.

Substância	Fração mássica (%)	Calor específico (v=cst e p=p0) [kJ/kgK]
Metano (CH_4)	27	1,7354
Gás Carbônico (CO_2)	48	0,6529
Oxigênio (O_2)	7	0,6618
Nitrogênio (N_2)	18	0,7448

Será determinado agora, o poder calorífico inferior do biogás, $PCI_{biogás}$, com base no estudo de CAMPANI, D. B. et al [15], que diz que, uma vez que o único gás volátil presente no biogás é o metano, então pode-se dizer que:

$$PCI_{biogás} = PCI_{CH_4} \cdot c_{CH_4}$$

Assim, o valor de $\dot{Q}_H$ já pode ser determinado. Entretanto, por se tratar de uma modelagem por ciclo-padrão Otto a ar, deve-se trabalhar com os parâmetros em função da massa de ar. Para isso, basta determinar o valor da razão entre a vazão em massa de ar e a vazão em massa de combustível (biogás) que se deseja trabalhar. Para evitar que ocorra combustão incompleta, será imposto um excesso de ar sobre a relação estequiométrica, tal que $e_{ar} = 5$. Assim, determinando-se a relação estequiométrica da queima de biogás, segundo as frações molares da Tabela 2.1, tem-se:



Logo, a relação ar-biogás em massa é dada por:

$$RAC = 0,87 \cdot (1 + e_{ar}) \cdot \frac{M_{ar}}{M_{Biogás}}$$

Desta forma:

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{m}_{ar}} = \frac{\dot{m}_{biogás}}{\dot{m}_{ar}} \cdot c_{v,biogás} \cdot (T_{biogás} - T_{ref}) + \frac{\dot{m}_{biogás}}{\dot{m}_{ar}} \cdot PCI_{biogás}$$

Ou ainda:

$$Q_H = \frac{C_{v;\text{biogás}} \cdot (T_{\text{biogás}} - T_{\text{ref}}) + PCI_{\text{biogás}}}{RAC}$$

A potência líquida pode ser obtida conhecendo-se a vazão mássica de ar, que por sua vez, é determinada pela vazão mássica de biogás. Esta é dada por:

$$\dot{m}_{\text{biogás}} = G \cdot \frac{M_{\text{biogás}}}{1000 \text{ [g/Kg]}}$$

Onde $M_{\text{Biogás}}$ e G são respectivamente, a massa molecular do biogás em [g/gmol] e a vazão molar por hora, determinadas na seção 5.1. A vazão mássica de ar é então:

$$\dot{m}_{\text{ar}} = RAC \cdot \dot{m}_{\text{biogás}}$$

E, finalmente, a potência líquida do sistema, em Watts, é dada por:

$$\dot{W}_{\text{liq}} = \frac{\dot{m}_{\text{ar}} \cdot Q_H \cdot \eta_{\text{térmico}}}{3600 \text{ [s/h]}}$$

6.2 Solução matemática para o modelo termodinâmica do ciclo Otto

A solução matemática do problema foi feita pela simulação do programa feito no EES, apresentado no APÊNDICE B – CÁLCULO DO CICLO OTTO PELO SOFTWARE EES. O rendimento adotado foi de 55%, o que forneceu uma relação de compressão:

$$r_v = 7,362$$

Como está sendo feita uma simulação do motor GSCA330 da ER-BR, utilizou-se mesma vazão volumétrica recomendada no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, de 108 m³/h. Esta vazão corresponde a uma vazão mássica de:

$$\dot{m}_{\text{biogás}} = 108,6 \text{ [Kg/h]}$$

O calor fornecido para cada quilograma de ar é de:

$$Q_H = 2460 \text{ [kJ/kg]}$$

O poder calorífico inferior obtido para o biogás foi de:

$$PCI_{\text{biogás}} = 13500 \text{ [kJ/kg]}$$

A razão mássica ar-biogás é de:

$$RAC = 5,501$$

E, finalmente, a potência líquida encontrada foi de:

$$\dot{W}_{liq} = 224,6 \text{ [kJ/s]}$$

Ou seja, 224,6 kW, um valor próximo dos 264 kW apresentados pelo fabricante. Esta diferença de 15% pode ser explicada pela falta de conformidade na composição do biogás e de suas propriedades. Cada produção tem suas peculiaridades, que afetam não apenas sobre a produção, como visto na seção 2.4, como também sobre a composição do produto gerado. Uma discrepância desta ordem era esperada e não compromete a validade e utilidade do modelo empregado.

7 GASÔMETRO

A utilização de um gasômetro permite o armazenamento do biogás quando ocorrem excessos, a fim de suprir o sistema quando a produção é menor. Além disso, em aplicações mais elaboradas, é possível estocar o biogás ao longo do dia, para carregar o sistema durante um intervalo de horas de maior demanda energética das instalações.

O projeto do gasômetro, portanto, considera o volume de biogás que deverá ser armazenado, e que será a diferença entre o volume produzido e o volume consumido no ciclo termodinâmico em um dado intervalo de tempo. Para este estudo, o gasômetro será projetado de modo a estocar o volume de biogás produzido quando a vazão é maior que a média e liberar o volume armazenado quando a vazão for menor que a média.

7.1 Projeto da energia gerada

O aterro em questão fica próximo a muitas instalações industriais nas regiões de Franco da Rocha e Caieiras, como a Ecomaster Plásticos, Franco Carnes, Refrigerantes Convenção, Tecelagem Lady, além de metalúrgicas e outros setores. A região industrial de Caieiras é também um grande pólo de reciclagem de plásticos.

Para este quadro de demanda energética, será considerado que uma geração de energia de 15 MW seria justificada. Como a vazão média de biogás é de $\dot{m}_{biogás} = 13.000 \text{ m}^3/\text{h}$, e um motor Otto operando com $108 \text{ m}^3/\text{h}$ fornece uma potência de 224,6 kW, então 67 motores forneceriam 15,05 MW. Cabe observar que tal geração elétrica corresponde apenas a 55% da capacidade do aterro, consumindo $7.236 \text{ m}^3/\text{h}$ de biogás, sendo que o restante será consumido nos *flares*.

A capacidade máxima do aterro é de 27,2 MW, operando com 121 motores.

7.2 Dimensionamento do Gasômetro

Uma vez estabelecida a vazão média do complexo termodinâmico ($\dot{m}_{biogás;energia} = 7.236 \text{ m}^3/\text{h}$), pode-se determinar a quantidade máxima armazenada. Tomando-se como referência o Gráfico 2.2, pode-se construir o Gráfico 7.1, que apresenta a vazão de biogás destinada à geração de energia em função do horário do dia ($\dot{m}_{biogás;energia}$). A área preenchida em verde representa o volume de biogás que deverá ser armazenado, e posteriormente injetado no sistema, quando estiver operando na região de déficit, indicado pela área vermelha.

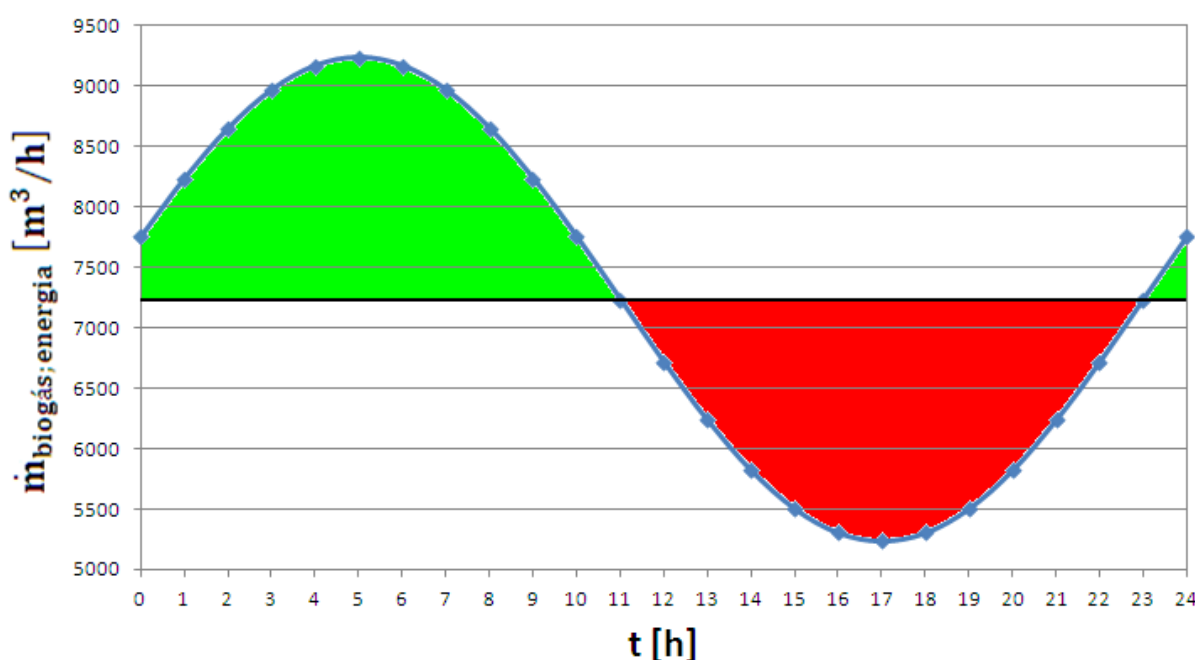


Gráfico 7.1 – Variação da vazão de biogás destinada à geração de energia em função do horário do dia.

Sendo assim, o volume mínimo admitido para o gasômetro, $V_{Gasôm; \text{mín}}$ é:

$$V_{Gasôm; \text{mín}} = \int_0^{11} (\dot{m}_{biogás;energia} - 7236) dt + \int_{23}^{24} (\dot{m}_{biogás;energia} - 7236) dt$$

Sendo que:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{biogás; energia} &= 2000 \cdot \sin(\theta) + 7236 \\ \theta &= 15 \cdot t + 15 \end{aligned}$$

Com θ em graus.

Desta forma, temos que:

$$V_{Gas\hat{o}m; \text{mín}} = \frac{2000}{15} \cdot [-\cos(180) + \cos(15)] + \frac{2000}{15} \cdot [-\cos(375) + \cos(360)]$$

E ainda, temos que:

$$V_{Gas\hat{o}m; \text{mín}} = \frac{2000}{15} \cdot 2 = 266,67 \text{ m}^3$$

Logo, as dimensões do gasômetro podem ser tais que o diâmetro ($D_{Gas\hat{o}m}$) seja de 6,0 metros e a altura ($H_{Gas\hat{o}m}$) de 11,0 metros, de modo que o volume total ($V_{Gas\hat{o}m}$) será de 311,1 m³ e, portanto, 17% maior que o volume mínimo admissível:

$$D_{Gas\hat{o}m} = 6,0 \text{ m}$$

$$H_{Gas\hat{o}m} = 11,0 \text{ m}$$

$$V_{Gas\hat{o}m} = 311,1 \text{ m}^3$$

7.3 Configuração do aterro com o gasômetro

Conforme os dados resultantes do dimensionamento do gasômetro, verifica-se que o uso de *flares* é mantido no novo sistema de aterro. Desta forma, a Figura 7.1 mostra o arranjo da planta, bem como os principais parâmetros e as vazões médias nas linhas de tubulação do novo sistema.

As válvulas 'A' e 'B' controlam a proporção das vazões direcionadas aos *flares* e ao gasômetro, sendo que a única alteração possível será o desvio positivo de gás para os *flares*, pois do contrário, o gasômetro seria sobrecarregado e complexo termodinâmico de geração elétrica não teria capacidade para operar vazões maiores. A função da válvula 'C' é realizar o controle da admissão de biogás, de modo a garantir que a vazão fornecida ao complexo termodinâmico de geração elétrica seja sempre de 7.236 m³/h.

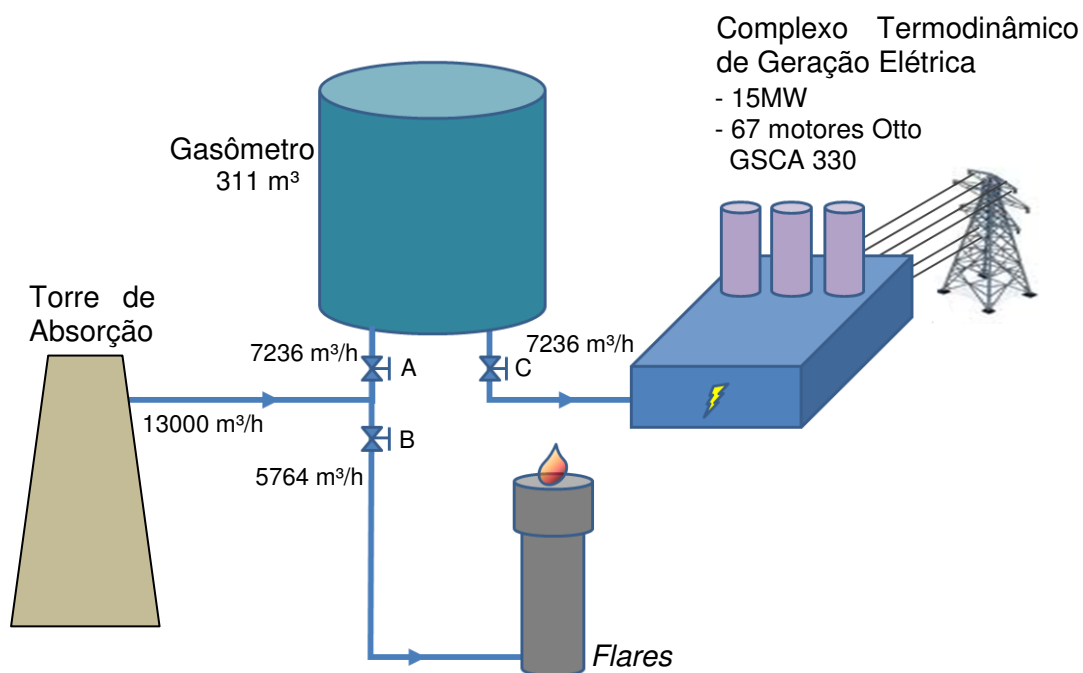


Figura 7.1 – Configuração com a instalação do gasômetro.

8 Conclusão

A modelagem termodinâmica realizada permitiu detalhar pontos operacionais importantes de um projeto simplificado de tratamento e queima do biogás produzido no aterro estudado. Aplicaram-se metodologias clássicas de modelagem no estudo de operações unitárias, ciclos de combustão e dimensionamento de gasômetro, que forneceram resultados coerentes e com aderência à realidade. Verificou-se que o aterro escolhido como estudo de caso, o CTR-Caieiras da Essencis, poderia comportar um projeto de geração elétrica da ordem de 15 MW com 67 motores Otto adaptados ao uso de biogás tratado, consumindo 7236 m³/h de gás. Para tanto, seria necessário adotar uma torre de absorção de anéis rischig, um gasômetro e também manter o uso do flare para queima dos 5764 m³/h excedentes, bem como para a segurança ambiental da planta, em caso de falha ou paralisação do sistema.

A importância do gasômetro é justificada pelo sua capacidade de aumentar a carga do sistema no horário de pico de consumo elétrico e baixa produção de biogás, incrementando a flexibilidade da geração de energia elétrica, configurando, portanto, um benefício comercial do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEE-CENBIO. *Energia a partir do Lixo*. Revista Brasileira de Bioenergia. Ano 3, Nº 8, Novembro de 2009.
- [2] PLANETA COPPE. *Coppe e Comlurb Firmam Acordo Para Gerar Energia a Partir do Lixo*. Acessado em: 10/2010. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=1229>>.
- [3] FILHO, L. F. B. *Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos. (Dissertação de Mestrado)*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.
- [4] NC GREEN POWER. *Landfill Methane Gas, Powering the Future*. Acesado em 11/2010. Disponível em: <http://www.ncgreenpower.org/media/newsletters/2006/newsletter_spring2006_page2.html>.
- [5] WIKIPEDIA. *Barril (Unidade)*. Acessado em 04/2011. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Barril_%28unidade%29>.
- [6] TRANSPORTADORA BRASILEIRA GASODUTO (TBG). *Gasoduto Bolívia-Brasil: Informações Técnicas do Lado Brasileiro, Abril de 2011*. Acessado em 04/2011. Disponível em: <http://www.tbg.com.br/portalTBGWeb/ShowProperty/BEA%20Repository/Imagem/Media/carac_fis>.
- [7] FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL-UFPEL. *Apostila de Agrometeorologia - Cap.6*. Acessado em 04/2011. Disponível em: <<http://www.ufpel.edu.br/faem/agrometeorologia/CapUR.pdf>>.
- [8] FIGUEIREDO, N. J. V. *Utilização do Biogás de Aterro Sanitário Para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo de Caso*. Acessado em 04/2011. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/Natalie.pdf>>.

- [9] CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. *Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru*. Acessado em 04/2011. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/iii-039.pdf>>.
- [10] CENTRO DE TECNOLOGIA – UFAL. *Absorção – Colunas de Recheio, Aula16*. Acessado em 04/2011. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/48895542/Aula16-absorcao-recheio>>.
- [11] PIMENTA, M. de M. *Notas de Aula PME-2461: Trocadores de Calor e Massa*. Escola Politécnica da USP, São Paulo. 2010.
- [12] CELENE – COMPANHIA ELETOCERÂMICA DO NORDESTE. *Anéis Raschig*. Acessado em 04/2011. Disponível em: <<http://www.celene.com.br/2-rc-anel.html>>.
- [13] WYLEN, G. J. VAN, BORGNACKE, C., SONNTAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica*. 6ª Edição. EDGARD BLÜTCHER LTDA., São Paulo, SP – Brasil.
- [14] ABREU, F. V. *Biogás de Lixo em Aterros Sanitários – Uma Análise de Viabilidade Técnica e Econômica do seu Aproveitamento Energético*. UERJ – Faculdade de Engenharia Mecânica. 2009, Rio de Janeiro.
- [15] CAMPANI, D. B., SCHNEIDER, P. S., XAVIER, F. M. *Determinação do Poder Calorífico do Biogás Gerado em Aterros Sanitários*. Acessado em 05/2011. Disponível em: <<http://paginas.ufrgs.br/sga/SGA/material-de-apoio/textos/textos-apoio/links/115-XIII-Campani-Brasil-001.pdf>>.

APÊNDICE A – CÁLCULO DE ALTURA DE TORRE PELO SOFTWARE EES

$$M_{CH_4} = \text{MolarMass} (\text{'Methane'})$$

$$\text{FraçãoMolar}_{CH_4} = 0,465$$

$$M_{CO_2} = \text{MolarMass} (\text{'CarbonDioxide'})$$

$$\text{FraçãoMolar}_{CO_2} = 0,3$$

$$M_{O_2} = \text{MolarMass} (\text{'Oxygen'})$$

$$\text{FraçãoMolar}_{O_2} = 0,06$$

$$M_{N_2} = \text{MolarMass} (\text{'Nitrogen'})$$

$$\text{FraçãoMolar}_{N_2} = 0,175$$

$$M_{\text{Biogás}} = \text{FraçãoMolar}_{CH_4} \cdot M_{CH_4} + \text{FraçãoMolar}_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + \text{FraçãoMolar}_{O_2} \cdot M_{O_2} + \text{FraçãoMolar}_{N_2} \cdot M_{N_2}$$

$$P = 101320 \text{ [Pa]}$$

$$T = (60 + 273) \cdot 1 \text{ [K]}$$

$$\dot{m}_{\text{biogás}} = 15000 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

$$P \cdot \dot{m}_{\text{biogás}} = G \cdot 8,314 \text{ [kJ/kmol-K]} \cdot T$$

$$A = \frac{\pi \cdot (0,23 \cdot Z)^2}{4}$$

$$D = 0,23 \cdot Z$$

$$\zeta = 1,1$$

$$\overline{G} = G \cdot \frac{M_{\text{Biogásk}}}{A}$$

$$M_{\text{Biogásk}} = M_{\text{Biogás}} \cdot 10^{-3} \cdot 1 \text{ [Kg/g]}$$

$$M_{H_2O} = 0,0181 \text{ [Kg/mol]}$$

$$0,8 = \frac{0,005 - y_T}{0,005}$$

$$HTU = 0,7 \text{ [m]}$$

$$TER_3 = 1 - \frac{1,12}{\zeta}$$

$$TER_4 = \frac{0,00112}{\zeta}$$

$$Z = \text{HTU} \cdot \frac{1}{\text{TER}_3} \cdot \ln \left[\frac{\text{TER}_3 \cdot 0,005 + \text{TER}_4}{\text{TER}_3 \cdot 0,001 + \text{TER}_4} \right]$$

APÊNDICE B – CÁLCULO DO CICLO OTTO PELO SOFTWARE EES

$$\dot{m}_{\text{biogás}} = G \cdot \frac{M_{\text{biogás}}}{1000} \quad [\text{g/Kg}]$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} = \text{RAC} \cdot \dot{m}_{\text{biogás}}$$

$$\dot{W}_{\text{liq}} = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot Q_H \cdot \eta_{\text{térmico}}$$

$$\dot{W}_{\text{liq}} = \frac{\dot{m}_{\text{ar}} \cdot Q_H \cdot \eta_{\text{térmico}}}{3600} \quad [\text{s/h}]$$

$$T_{\text{ref}} = 298 \quad [\text{K}]$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 0,55$$

$$T_{\text{biogás}} = 333 \quad [\text{K}]$$

$$c_{v;\text{biogás}} = (0,27 \cdot 1,7354 + 0,48 \cdot 0,6529 + 0,07 \cdot 0,6618 + 0,18 \cdot 0,7448) \cdot 1 \quad [\text{kJ/kg-K}]$$

$$\text{PCI}_{\text{CH}_4} = 50000 \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$\text{PCI}_{\text{biogás}} = \text{PCI}_{\text{CH}_4} \cdot 0,27$$

$$e_{\text{ar}} = 5$$

$$\text{RAC} = 0,87 \cdot (1 + e_{\text{ar}}) \cdot \frac{28,97}{27,49}$$

$$Q_H = \frac{c_{v;\text{biogás}} \cdot (T_{\text{biogás}} - T_{\text{ref}}) + \text{PCI}_{\text{biogás}}}{\text{RAC}}$$

$$G = 475737 \quad [\text{gmol/h}]$$

$$G_{\text{unit}} = 108 \cdot \frac{G}{13000}$$

$$M_{\text{Biogás}} = 27,49 \quad [\text{g/gmol}]$$

$$\dot{m}_{\text{biogás}} = G_{\text{unit}} \cdot \frac{M_{\text{Biogás}}}{1000} \quad [\text{g/Kg}]$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} = \text{RAC} \cdot \dot{m}_{\text{biogás}}$$

$$\dot{W}_{\text{liq}} = \frac{\text{RAC} \cdot \dot{m}_{\text{biogás}} \cdot Q_H \cdot \eta_{\text{térmico}}}{3600} \quad [\text{s/h}]$$

$$k = 1,4$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{(k-1)}}$$

$$T_1 = T_{\text{ref}}$$

$$T_2 = T_1 \cdot r_v^{(k-1)}$$

$$cv_1 = \mathbf{Cv} (\text{'Air'} ; T=T_1)$$

$$c_v = cv_1$$

$$Q_H = c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = r_v^{(k - 1)}$$

$$Q_L = c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

ANEXO A – TABELA TÉCNICA ER-BR – GSCA330 – 330 kVA



GRUPO GERADOR À BIOGÁS GSCA330 - 330 kVA



GRUPO GERADOR - GSCA330		
Potência	Standby 330 kVA / 264 kW	Prime 300 kVA / 240 kW
Combustível	BIOGÁS (ideal - concentração de metano > 55%) GÁS NATURAL	
Consumo (Nm3)	Biogás @ 6500 kcal 108 Nm3/h	GÁS NATURAL 78 Nm3/h
Saída	127V / 220V AC 220V / 380 V AC	
Controle de Rotação	Eletrônico do tipo isócrono com controle por sensor eletromagnético e proteção contra sub e sobrevelocidade.	
Chassi	Perfis de chapa de aço carbono, dobrados em "U", frios ou laminados, soldados com tecnologia MIG, com pintura esmaltada.	
Dimensões Alt./Larg./Comp.	2900mm X 1150mm X 3200mm	
Peso (Kg)	2450	
MOTOR - SCANIA		
Modelo	SGI 12 6 cilindros / 24 válvulas	
Tensão de Operação	12VCC / 2 Baterias Chumbo ácida 200 AH	
Refrigeração	A água com radiador, ventilador e bomba d'água	
ALTERNADOR - WEG		
Acoplamento	Tipo rígido com flange	
Sistema de Ligação	Estrela com Neutro acessível (Trifásico)	
Distorção harmônica	Abaixo de 4% (média de 3,5%)	
Tensões de saída	220V / 127V (380V / 220V - opcional)	
Fator de Potência	0,8	
Corrente Max. (220/ 380)	867 A / 456 A	
Classe de isolamento	"F"	
Grau de proteção	IP-21	
Refrigeração	Ventilador centrífugo montado no próprio eixo	
Numero de pólos	4	
Rotação	1800 RPM	
Frequência	60 Hz	
Sobrecarga admitida	10 % durante 1h a cada 12h de funcionamento	
Especificações sujeitas a alteração sem prévio aviso.		

**AUMENTE O LUCRO DO SEU NEGÓCIO
GERANDO ENERGIA E PRESERVANDO A NATUREZA**