

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO BIOGÁS  
PROVENIENTE DE ATERRO SANITÁRIO

por

Luís Ricardo Pedra Pierobon

Tese para a obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2007

SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO BIOGÁS  
PROVENIENTE DE ATERRO SANITÁRIO

por

Luís Ricardo Pedra Pierobon  
Mestre em Engenharia

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ademar Michels

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Dra. Luciana Paulo Gomes

Prof. Dr. Flávio José Lorini  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, abril de 2007

*Para:*  
*Raquel, Brenda & Eveline.*

*Agradecimentos:*

*Primeiramente a Deus.*

*Aos meus pais Geraldo (in memorian) e Eglá, pela educação que me deram.*

*À minha madrinha Leda (in memorian), por sempre me incentivar.*

*Ao meu irmão Paulo, pela grande ajuda com a parte eletrônica e de software no trabalho.*

*À minha família, pelo amparo nos momentos de desânimo.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Pedro B. Mello, pela indicação do caminho a seguir.*

*À Prefeitura Municipal de Porto Alegre, município do qual tenho orgulho de ser natural, que possibilitou, através do DMLU – Departamento Municipal de Limpeza Urbana, a utilização do biogás e de toda a estrutura do aterro sanitário da Extrema. Estendo o agradecimento a todos os seus servidores que colaboraram de alguma forma para esta pesquisa - em especial Gilberto, no aterro, e Arceu, na Azenha, pela ajuda incondicional.*

*À CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica, por ceder o equipamento para a pesquisa, agradeço em especial ao funcionário Clóvis, do setor de medição, pela grande ajuda.*

*A todos os colegas do CEFET/RS – Unidade Sapucaia do Sul, que de alguma forma me ajudaram ou estimularam nesta caminhada - em especial aos colegas Bork e Armando por sua sensibilidade e apoio, ao colega Firmino pelas preciosas medições e ao colega Adriano pela criteriosa revisão neste texto (lembrando que algum erro que possa ainda existir se deve, exclusivamente, a minha desatenção e teimosia).*

*Aos colegas do PROMEC: Fabiano, Luciano, Paulo, Giovanne, Serguei, Charles e Aryston.*

*Aos servidores da UFRGS: Batista, do LETA – Laboratório de Ensaio Térmicos e Aerodinâmicos e Paulo, secretário do PROMEC, pela paciência e auxílio.*

## RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido e colocado em funcionamento, por 295 horas, um protótipo de sistema de geração de energia de baixo custo que utiliza biogás proveniente de um aterro sanitário em Porto Alegre (RS – Brasil). Idealizado para a utilização da energia no manejo de um aterro sanitário durante o tempo de vida útil do mesmo. Também aplicável para processos industriais que gerem resíduos orgânicos e que devem ser tratados biologicamente. Consiste de um motor de combustão interna acoplado a um motor assíncrono capaz de gerar até 5 kW em 220 volts em três fases com 89% das medições dentro do padrão adequado, 9,9% precárias e 1,1% críticas, sendo as últimas preconizadas para 2004 pela agência reguladora em 7% e 1,1%, respectivamente. O biogás necessário para o funcionamento do protótipo é da ordem de 10,5 a 13,8 kg/h, com tratamento mínimo, ascendendo através de limalhas de aço em um recipiente onde também são retidos os condensados. O custo do quilowatt-hora para um sistema semelhante, mas com um poder de geração maior, na faixa de 40kW, foi estimado em torno de US\$0,04, valor que incorpora o custeio do equipamento mais o investimento de instalação. Concluiu-se que o sistema é operacional e pode em curto prazo ser utilizado para o manejo sustentável de um aterro sanitário. No aspecto impacto ambiental, a partir de uma análise exergética baseada nos indicadores ambientais: eficiência exergética ambiental ( $\eta_{ex. amb.}$ ) e razão de poluição total ( $R_{pol}$ ), o sistema representa uma alternativa vantajosa à queima simples do biogás, tendo rendimento exergético ambiental ( $\eta_{ex. amb.}$ ), da ordem de 8 vezes maior e uma razão de poluição total ( $R_{pol}$ ), 10 vezes menor. No aspecto econômico compete com vantagem com qualquer outro energético.

**Palavras-chave:** biogás, resíduos, geração assíncrona, exergia.

## ABSTRACT

### “LOW COST ENERGY GENERATION SYSTEM USING BIOGAS FROM A SANITARY LANDFILL”

This work developed and put in operation, for 295 hours, a prototype of low cost energy generation system that uses biogas originated from a sanitary landfill in Porto Alegre (RS-Brazil). It was idealized for the use of the energy in the sanitary landfill handling its useful life time. Also applicable for industrial processes that generate organic residues and that should be treated biologically. It consists of a coupled internal combustion engine in an asynchronous motor capable of generating up to 5 kW in 220 volts in three phases, with 89% of measurements of the appropriate pattern, 9,9 % precarious and 1,1% critical, being the last ones required for 2004 by the regulatory agency in 7% and 1,1%, respectively. The necessary biogas for the prototype operation is ordered than 10,5 to 13,8 kg/h, with minimum treatment, ascending through steel filings in a container where also condensed ones are kept. The cost of kilowatt-hour for a similar system, but with a larger generation power, in the range of 40kW, it was estimated about US\$0,04, value that incorporates the installation investment and costs of operation. It was concluded that the system is operational and it can be used for the maintainable handling of a sanitary landfill in a short period. In the aspect of environmental impact, starting from an analysis exergy based on environmental indexes: environmental exergy efficiency ( $\eta_{ex. amb.}$ ) and total pollution rate ( $R_{pol}$ ), the system is an advantageous alternative to a simple burning of biogas, having an environmental income of exergy efficiency ( $\eta_{ex. amb.}$ ), 8 times bigger and a total pollution rate ( $R_{pol}$ ), 10 times smaller. In the economical aspect it competes advantageously with any other energy.

**Key-words:** biogas, waste, asynchronous generation, exergy.

# ÍNDICE

	Página.
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	3
2 GERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS .....	4
2.1 O biogás .....	4
2.2 Histórico do biogás .....	5
2.3 Características do biogás .....	6
2.4 Aspectos energéticos do biogás .....	7
2.5 Impacto ambiental.....	8
2.5.1 Créditos de carbono .....	9
2.6 Formação do biogás .....	10
2.7 Principais fontes de metano .....	13
2.7.1 Sistema de tratamento de esgotos .....	16
2.7.2 Indústria .....	21
2.7.3 Aterros sanitários.....	22
2.8 O aterro Sanitário da Extrema.....	23
2.8.1 Histórico .....	23
2.8.2 Características técnicas.....	25
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	33
3.1 O motor de combustão interna.....	33
3.2 O gerador assíncrono .....	38
3.2.1 Modelo elétrico em regime permanente .....	39
3.2.2 Geração assíncrona.....	41
3.3 Exergia .....	42
3.3.1 Análise exergética .....	46
3.4 Estimativas energéticas.....	50
3.5 Estimativas econômicas .....	53
4 METODOLOGIA .....	55
4.1 A captação do biogás .....	56
4.2 O sistema de depuração .....	56
4.3 O motor .....	57
4.4 O acoplamento .....	58

4.5 O gerador .....	59
4.6 O sistema de controle de tensão e o de proteção .....	62
5 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA E MÉTODOS DE MEDIÇÃO.....	64
6 RESULTADOS OBTIDOS.....	69
6.1 Apresentação dos resultados .....	69
6.1.1 Disponibilidade de biogás no aterro sanitário da Extrema.....	69
6.1.2 Relação entre consumos e potência gerados .....	70
6.1.3 Parâmetros de geração elétrica .....	73
6.1.4 Controle de emissões .....	78
6.1.5 Avaliação do motor .....	81
6.2 Análise de erros.....	85
6.3 Discussão dos resultados obtidos.....	88
6.3.1 Consumo de combustíveis e transformação de energia.....	88
6.3.2 Características da energia elétrica gerada.....	89
6.3.3 Emissões gasosas .....	91
6.3.4 Aquecimento do motor .....	92
6.3.5 Desgaste do motor .....	92
6.3.6 Eficiência energética do motor .....	93
6.3.7 Aspecto Econômico .....	94
6.3.8 Aspectos sociais.....	96
6.3.9 Análise exergética .....	96
6.3.10 Estimativas para outros empreendimentos .....	103
7 CONCLUSÕES.....	104
7.1 Dificuldades encontradas e sugestões para futuros projetos.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
ANEXO I.....	114
ANEXO II .....	122
ANEXO III.....	133
ANEXO IV .....	134
ANEXO V .....	135
ANEXO VI.....	136



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>[Unidade]</b>
$A$ – anergia.....	[J]
$B$ – exergia.....	[J]
$B_{ch}$ – exergia química.....	[kW]
$B_{des}$ – exergia de desativação dos resíduos.....	[kW]
$B_{disp}$ – exergia de manuseio e disposição dos resíduos.....	[kW]
$B_k$ – exergia cinética .....	[kW]
$B_p$ – exergia potencial.....	[kW]
$B_{ph}$ – exergia física.....	[kW]
$B_{prep}$ – exergia de preparação dos recursos naturais .....	[kW]
$B_{prod}$ – exergia útil produzida no processo .....	[kW]
$B_{rec-nat}$ – exergia dos recursos naturais e humanos utilizados.....	[kW]
$C_o$ – custo operacional por hora .....	[US\$/h]
$C_T$ – ciclo de troca de óleo lubrificante .....	[h]
$E$ – energia.....	[J]
$E_E$ – energia de entrada .....	[kJ]
$E_P$ – energia perdida .....	[kJ]
$E_S$ – energia de saída .....	[kJ]
$E_V$ – energia de funcionamento a vazio .....	[kJ]
$f$ – frequência .....	[Hz]
$I$ – corrente elétrica .....	[A]
$I_p$ – investimento de implantação .....	[US\$]
$I_{PMW}$ – custo de implantação do MWh .....	[US\$]
$L_t$ – tempo de vida útil .....	[h]
$M_E$ – custo de manutenções eventuais .....	[US\$]
$N_s$ – rotação síncrona associada .....	[rpm]
$p$ – número de pólos .....	[-]
$P$ – valor do kWh .....	[US\$]
$P_C$ – poder calorífico do combustível utilizado .....	[kJ /kg]
$P_L$ – custo do óleo lubrificante .....	[US\$/ℓ]
$pme$ – pressão média efetiva .....	[Pa]
$P_{MWh}$ – custo do MWh gerado .....	[US\$]

$R_l$ – parte real da impedância .....	[ $\Omega$ ]
$r_e$ – resistência do estator .....	[ $\Omega$ ]
$R_{pol}$ – razão de poluição total.....	[-]
$r_r$ – resistência do rotor.....	[ $\Omega$ ]
$\frac{r_r}{s}$ – representação elétrica da carga mecânica .....	[ $\Omega$ ]
$S$ – escorregamento .....	[-]
$t$ – tempo .....	[s]
$T$ – torque .....	[Nm]
$T_0$ – temperatura inicial (ambiente) .....	[K]
$V$ – tensão de cada fase.....	[V]
$V_C$ – volume de combustível utilizado .....	[m <sup>3</sup> ]
$V_T$ – tensão trifásica .....	[V]
$W$ – potência média gerada.....	[kW]
$X_l$ – parte imaginária da impedância .....	[ $\Omega$ ]
$x_e$ – reatância do estator .....	[ $\Omega$ ]
$x_r$ – reatância do rotor .....	[ $\Omega$ ]
$\delta B$ – exergia destruída .....	[kW]
$\Delta S$ – variação de entropia .....	[kW/K]
$\eta$ – rendimento total .....	[-]
$\eta_B$ – eficiência exergética .....	[-]
$\eta_{EC}$ – rendimento da energia potencialmente conversível .....	[-]
$\eta_{ex,amb}$ – eficiência exergética ambiental .....	[-]
$\rho$ – massa específica do combustível .....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega_s$ – frequência elétrica do rotor .....	[Hz]

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
2.1 – Foto microscópica de Archaea produtoras de metano..	4
2.2 – Transição da composição do biogás.....	11
2.3 – Mudança na abundância de metano na atmosfera em fração molar, ppb, partes por bilhão. ....	13
2.4 – Estação de Tratamento de Esgotos Pavuna – Rio de Janeiro.....	16
2.5 – Diagrama esquemático de uma central de tratamento de esgotos.....	17
2.6 – Central de tratamento de efluentes industriais: papel e celulose. ....	21
2.7 – Integração do aterro no sistema de gestão de resíduos sólidos. ....	23
2.8 – Cava de extração de saibro.....	24
2.9 – O aterro da Extrema em 2006. ....	25
2.10 – Vista da impermeabilização do aterro.....	26
2.11 – Esquema de conformação da base após a regularização e topografia após o encerramento do aterro. Vista em corte longitudinal.....	27
2.12 – Vista aérea do aterro. ....	27
2.13 – Estimativa da quantidade de metano gerado por ano ao longo de vinte anos no aterro sanitário da Extrema. ....	32
3.1 – Esboço de conjunto êmbolo cilindro para motores alternativos de ignição por centelha. ...	34
3.2 – Gráfico de pressão por deslocamento para um motor de combustão interna alternativo.....	35
3.3 – Relação entre o parâmetro lambda e potência e consumo específico. ....	37
3.4 – Emissões em função de lambda. ....	37
3.5 – Modelo elétrico em regime permanente, por fase, para uma máquina assíncrona trifásica.. .....	39
3.6 – Conjugado eletromagnético $T$ desenvolvido pelo motor em função do escorregamento. ...	40
3.7 – Esquema de ligação de um gerador assíncrono trifásico interligado. ....	42
3.8 – Esquema de ligação de um gerador assíncrono trifásico auto excitado. ....	42
3.9 – Fluxos de energia e exergia em uma caldeira acoplada a uma turbina e a um gerador de energia elétrica.....	44
3.10 – As cinco esferas da Terra em mútua interação.....	46
3.11 – O sistema Sol, Terra e Espaço.....	47
3.12 – O fluxo de energia entre o Sol, a atmosfera, a superfície da Terra e espaço. ....	47
3.13 – O fluxo exergético global na Terra. 1x corresponde a $1,2 \times 10^{13} \text{W}$ .....	48

3.14 – A sociedade retira mineral da litosfera e retorna para a biosfera na forma de resíduos. ..	49
3.15 – Os fluxos de exergia em um processo genérico.. ..	50
3.16 – Relação entre o rendimento e o percentual de potência de saída do motor assíncrono.. ...	52
3.17 – Plano cotado da relação entre <i>p.m.e.</i> , rotação e as diversas curvas de mesmo consumo específico.....	53
4.1 – O protótipo. ....	55
4.2 – Cenário dos testes, em visão noturna. ....	55
4.3 – Ponto de captação e pontos de saída de gás no aterro sanitário da Extrema.....	56
4.4 – Filtro para o biogás com reservatório para retenção de líquidos, esquema de operação e em uso. ....	57
4.5 – Entrada de gases no motor. ....	58
4.6 – O sistema de acoplamento.....	59
4.7 – Diagrama esquemático da conexão e polarização do sistema gerador. ....	60
4.8 – Estator, rotor e motor assíncrono parcialmente integrado. ....	61
4.9 – A válvula de entrada de ar semi-automática. ....	62
5.1 – Placa PCI-DAS08.....	64
5.2 – Medidor orçazonal de grandezas.....	64
5.3 – Sistema de medição de vazão de biogás e ar.....	66
5.4 – Medição de conicidade, ovalização (à esquerda) e rugosidade (à direita) dos cilindros. ....	67
5.5 – Analisador de gases.....	67
5.6 – <i>Professional Lambda Meter Motec</i> .....	67
5.7 – Esquema de ligação dos equipamentos de medição.....	68
6.1 – Vazão mássica natural de biogás.....	70
6.2 – Consumo horário de biogás por potência.....	70
6.3 – Consumo horário de biogás por potência, para 220V. ....	71
6.4 – Relação entre o consumo específico e a potência elétrica. ....	72
6.5 – Relação ar/biogás por potência elétrica.....	72
6.6 – Relação entre a potência elétrica dissipada e o parâmetro lambda. ....	73
6.7 – Gráfico da tensão ao longo do tempo.....	74
6.8 – Gráfico da potência ao longo do tempo. ....	74
6.9 – Frequência da rede ao longo do tempo.....	75
6.10 – Frequência em Hz por potência em kW. ....	75
6.11 – Relação entre tensão e frequência para carga de 2 kW. ....	76
6.12 – Potência em relação à frequência em 220V. ....	76

6.13 – Relação entre frequência da rede e a potência elétrica consumida para bancos de capacitores de 40 e 50 $\mu$ F. ....	77
6.14 – Desbalanceamento entre tensões em relação ao desbalanceamento entre potências por fase para tensão fixa em 220V. ....	77
6.15 – Gráfico da relação entre rotação do motor e tensão na fase R com e sem carga. ....	78
6.17 – Relação entre o parâmetro lambda e as emissões gasosas do motor, para biogás. ....	79
6.18 – Visão geral da parte superior do bloco do motor, a partir do cilindro número um. ....	82
6.19 – Detalhe da carbonização da face superior do êmbolo número um. ....	82
6. 20 – Visão geral da tampa superior do motor. ....	83
6. 21 – Detalhes da carbonização junto às válvulas na tampa superior do motor. ....	83
6.22 – Comparativo entre vela do protótipo (à esquerda) e o modelo do fabricante (à direita), para 25h, 165h e 295h. Fonte: Bosch (2006). ....	84
6.23 – Zona de medição de temperatura. ....	85
6.24 – Fluxos de exergia em um aterro sanitário. ....	97
6.25 – Variação do indicador eficiência exergética ambiental ao longo dos anos. ....	99
6.26 – Variação do indicador razão de poluição total ao longo dos anos. ....	100
6.27 – Fluxo de exergia no sistema de geração. ....	101
I.1 – Controlador de tensão: etapa de controle de motor do atuador. ....	114
I.2 – Controlador de tensão: etapa processadora. ....	115
I.3 – Controlador de tensão: etapa comparadora. ....	116
I.4 – Controlador de tensão e circuito de proteção: etapa de fonte e referência. ....	117
I.5 – Circuito de proteção: etapa comparadora. ....	118
V.1 – Chorume bruto do aterro sanitário da extrema - parâmetro: temperatura da amostra( $^{\circ}$ C). ....	135
VI.1 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 0,5 kW. ....	136
VI.2 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 1,1 kW. ....	136
VI.3 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 1,9 kW. ....	137
VI.4 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 3,6 kW. ....	138
VI.5 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 4,2 kW. ....	138
VI.6 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 5,0 kW. ....	139
VI.7 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 5,7 kW. ....	139

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
2.1 – Composição média do biogás.....	6
2.2 – Faixa de poder calorífico superior e inferior de diversas fontes em MJ/kg.....	7
2.3 – Poder calorífico de alguns combustíveis em MJ/kg. ....	8
2.4 – Distribuição dos totais de emissão e absorção global de metano por origem e destino, em Mt(CH <sub>4</sub> )/ano. ....	14
2.5 – Composição percentual de volume molar do biogás do biodigestor do DMAE. ....	20
2.6 – Composição percentual de volume molar do biogás de cervejaria.....	22
2.7 – Resíduos destinados ao aterro sanitário da Extrema, por ano e por origem (valores em t).. ....	28
2.8 – Composição dos resíduos sólidos domésticos de Porto Alegre em 2002. ....	29
2.9 – Caracterização, em percentagem de peso úmido, dos resíduos domésticos de Porto Alegre em 1997.....	30
2.10 – Composição molar do biogás do aterro da Extrema. ....	30
2.11 – Estimativa de produção de metano e biogás ao longo de toda a vida útil do aterro. ....	31
3.1 – O fator exergético de algumas formas de energia comuns.....	45
3.2 – Qualidade das substâncias de diferentes materiais.....	46
4.1 – Características do motor GM utilizado no protótipo.....	57
4.2 – Características nominais do motor elétrico assíncrono.....	61
4.3 – Características dos capacitores utilizados. ....	61
6.1 – Vazão natural média de biogás a partir do ponto de captação escolhido.....	69
6.2 – Consumo médio de gasolina. ....	73
6.3 – Energia elétrica total gerada, em kWh. ....	78
6.4 – Emissões para motor com carga - com biogás. ....	79
6.5 – Emissões do motor sem carga - com biogás. ....	80
6.6 – Emissões com o motor com carga - com gasolina. ....	80
6.7 – Emissões durante a operação normal. ....	80
6.8 – Medições de conicidade e ovalização. ....	81
6.9 – Rugosidade dos cilindros. ....	81
6.10 – Tempo de operação entre falhas, tipo de falhas e custo de reparo.....	84
6.11 – Temperatura de um mesmo ponto no sistema de escape com gasolina e biogás. ....	85

6.12 – Variação de pressão estática relativa de admissão com biogás e com gasolina.....	85
6.13 – Rendimento do protótipo de sistema de geração variando potência e combustível.....	94
6.14 – O fluxo médio das diversas variáveis para avaliação exergética. ....	98
6.15 – Indicadores exergéticos ambientais para as situações propostas para o aterro sanitário. ..	98
6.16 – O fluxo médio das diversas variáveis para avaliação exergética do sistema de geração.	102
6.17– Indicadores exergéticos ambientais para as situações propostas para o sistema gerador.	103
Tabela III.1 – Custo do MWh no Brasil. Fonte: CanalEnergia (2006).....	133

## 1 INTRODUÇÃO

Como na década de setenta do século passado, uma nova crise energética se vislumbra, não só pelas variações do preço do petróleo, mas até mesmo pelas alterações climáticas que provêm de uma matriz energética predominantemente fóssil. Novamente se buscam fontes de energia sustentáveis. Assim, existe hoje um grande interesse pelas investigações na produção de energia a partir de fontes alternativas e economicamente atrativas; entretanto, desta vez com um enfoque global de microgeração, onde a idéia não é produzir muita energia em um único ponto e distribuí-la, mas gerar pequenas quantidades próximas ao consumidor.

Neste contexto, o biogás, que até há pouco tempo era simplesmente encarado como um subproduto indesejado obtido a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos, resíduos animais e de estações de tratamento de efluentes líquidos domésticos e industriais, conforme Pecora (2006), tem no seu aproveitamento a possibilidade de redução custos ou até mesmo de instrumento de viabilização econômica para projetos de despoluição.

Este momento tornou-se atrativo para a utilização do biogás, que é um combustível que pode ser aplicado diretamente às máquinas hoje existentes, num período de transição para novas tecnologias. Como por exemplo, células de combustível citadas em Harisson e Lovell (1996) e Van herle *et al.* (2004).

A viabilidade e o efetivo uso de biogás proveniente de diversos resíduos para geração de energia elétrica é uma realidade ou esta sendo discutida em diversos pontos do planeta como relatado em Goldstein (2004), Costello (2005), Azevedo (2000), Brookshire (1999), Sampat (1995) e Nogueira (1992). Ou como parte de uma estratégia de montagem de uma matriz energética baseada em energias sustentáveis como relatado em Rynk e Goldstein (2002), Goldstein (2003).

Uma cidade como Porto Alegre produz, diariamente, mais de um milhão de quilogramas de lixo, que em grande parte é disposto em aterros sanitários. Estes aterros cumprem normas internacionais de controle, mesmo assim representam um problema para a localidade onde são instalados, tanto no aspecto ambiental quanto no aspecto social.

O gás liberado representa um problema ambiental, pois contribui significativamente para o efeito estufa. Mesmo sua simples queima representa um ganho em relação a esse efeito.



Este estudo foi desenvolvido no aterro sanitário da Extrema, na zona sul de Porto Alegre, que se encontra concluído há mais de quatro anos, onde uma equipe de funcionários continua monitorando, realizando reparos e manejando resíduos líquidos e gasosos que de lá emanam. As emanações gasosas são ricas em metano, e foram utilizadas como combustível de um protótipo de sistema de geração de energia elétrica.

Neste contexto, este trabalho se propôs a desenvolver um sistema que:

- possa ser facilmente reproduzido;
- possua uma relação custo-benefício favorável, produzindo energia abaixo de US\$ 0,04 por kWh;
- a peça chave do processo, o motor de combustão interna possa ser simplesmente substituído ao cabo de uma vida útil de no mínimo 2000 horas;
- seja utilizado junto à fonte de biogás, sem a necessidade de pressurização;
- para seu funcionamento seja necessário um tratamento mínimo do biogás;
- funcione com pequenas adaptações no motor;
- produza energia de boa qualidade;
- possa ser utilizado como compensação a populações lindeiras a aterros sanitários ou outros empreendimentos com potencial para geração de biogás e com possibilidade técnica de captação.

- seja sustentável e ambientalmente limpo.

Com esses objetivos, foi:

- utilizado como gerador um motor assíncrono, de baixo custo.
- instalado um controle de tensão por alteração de rotação através de servo-mecanismo, o que reduziu custos drasticamente;
- ensaiado o protótipo por um período de 295 horas, aproximadamente 15% da vida útil do motor, demonstrando sua viabilidade técnica;
- verificado se a mistura, no período de testes provocaria corrosão perceptível a partir da análise visual do estado do bloco e das velas. Também foram feitas medições de conicidade, ovalização e rugosidade, antes e depois dos ensaios, onde se encontrou um desgaste compatível com o tempo de utilização do sistema;
- feita uma análise qualitativa da energia elétrica gerada, considerada adequada em 89% das medições.
- medida a quantidade de gás consumida em cada regime de operação, entre 10,5 e 14,5 kg/h.

- realizada a análise exergética do sistema, visando à determinação de índices ambientais, os quais apresentaram resultados favoráveis.

Os principais diferenciais deste trabalho são: a utilização de um motor de baixo custo associado a um motor assíncrono, robusto e barato, sem compressão de biogás; a ideia que o motor a combustão interna é uma peça de desgaste do sistema e deve periodicamente ser substituído; e a análise exergética ambiental feita tanto no aterro como no sistema gerador.

No aspecto social a energia gerada pelo sistema pode ser aplicada nas proximidades dos aterros, melhorando a qualidade de vida das populações limítrofes, representando uma contrapartida da empresa administradora de aterros em relação aos transtornos criados (mau cheiro, circulação de caminhões de lixo e atração de animais que representam vetores de zoonoses).

Nos casos em que a produção de biogás é uma consequência inevitável, como nos aterros sanitários e diversos sistemas de tratamento de efluentes, é ainda possível negociar os chamados créditos de carbono.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e testar um sistema de baixo custo que possa ser facilmente reproduzido e utilizado junto a fontes geradoras de biogás, para a geração de energia elétrica, de uma forma sustentável e ambientalmente positiva.

Os objetivos específicos são:

- aplicar a análise exergética para determinar os indicadores ambientais, rendimento exergético ambiental,  $\eta_{exer.amb.}$ , e razão de poluição total,  $R_{pol.}$ , do protótipo e do aterro. E por extrapolação para sistemas semelhantes;

- quantificar o consumo de biogás do protótipo no sentido de estimar consumo de sistemas semelhantes;

- qualificar a energia elétrica gerada;

- avaliar visualmente e através de medições de rugosidade, conicidade e ovalização, o desgaste do motor durante os ensaios, com o intuito de detectar avarias que poderiam indicar a inviabilidade da utilização do biogás com tratamento mínimo;

- determinar os custos operacionais e de instalação do protótipo para estimar o custo de projetos semelhantes.

## 2 GERAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS

### 2.1 O biogás

O biogás pode ser definido simplificadaamente como uma das inúmeras formas de fixação da energia proveniente do sol na forma de energia química disponível através de uma queima simples.

Ele é proveniente da degradação química de organismos mortos ou de excreções, através da ação de microorganismos decompositores anaeróbios (sem a presença de oxigênio), que agem como catalisadores das reações de formação do biogás. A figura 2.1 mostra Archaea produtoras de metano.

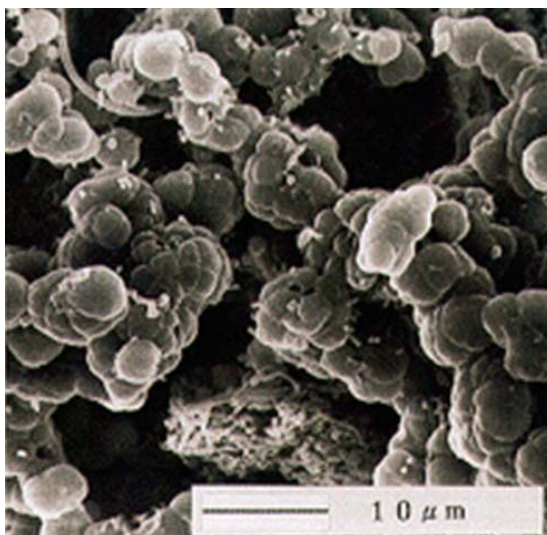


Figura 2.1 – Foto microscópica de Archaea produtoras de metano. Fonte: Kajima (2006).

No entanto, recentemente foi publicado um trabalho na revista *Nature*, Keppler *et al.* (2006), onde pesquisadores do Instituto Max Planck de Física Nuclear detectaram a emissão de metano por plantas vivas na presença de oxigênio, com mecanismos ainda não explicados, e com taxas de emissão extremamente significativas, na ordem de 65 a 236 Mt/ano (mega toneladas por ano) se comparadas a emissões de folhas mortas, que está na ordem de 1 a 7 Mt/ano.

Conforme Azevedo (2000), o biogás é essencialmente constituído de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e CH<sub>4</sub> (metano), com pequenas concentrações de NH<sub>3</sub> (amônia), H<sub>2</sub>S (gás sulfídrico), indol<sup>2</sup> e mercaptanas<sup>3</sup> (as pequenas concentrações podem ser desprezadas), de tal forma que o biogás é por aproximação, uma mistura de metano e dióxido de carbono.

---

<sup>2</sup> Composição química C<sub>8</sub>H<sub>7</sub>N

<sup>3</sup> O mesmo que Tiol, designação genérica das substâncias que contém o grupo -SH ligado a carbono saturado.

## 2.2 Histórico do biogás

O biogás foi identificado, inicialmente, segundo Nogueira (1992), por Robert Boyle, em 1682. Outros trabalhos a respeito deste gás foram feitos por Alessandro Volta, em 1776, e Humphrey Davy, em 1806.

Ainda no século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, a 35°C, conseguindo obter 100 litros de gás por m<sup>3</sup> de matéria. Em 1884, Louis Pasteur, ao apresentar à Academia das Ciências os trabalhos do seu aluno, considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de aquecimento e iluminação, segundo CAEEB (1981).

Entretanto, na Índia, a idéia de aproveitar o gás metano produzido por digestão anaeróbia já não era estranha. Remonta à metade do século XIX (ano de 1857), quando numa colônia de hansenianos, perto de Mumbai, realizou-se a primeira experiência de utilização direta de biogás, segundo CAEEB (1981). Mais de 30 anos depois, em 1895, teve lugar a primeira experiência européia, com a utilização do biogás para iluminação de algumas ruas da cidade de Exter, na Inglaterra, segundo Ross e Drake (1996). Outras experiências se seguiram, motivadas principalmente pelo entusiasmo inicial que este processo atingiu. Apesar disso, este combustível não conseguiu se impor como substituto dos tradicionais. A exploração do biogás foi bastante reduzida, limitando-se a utilização em alguns casos esporádicos. Foi apenas nos anos 40 do século XX, devido a carências energéticas significativas, provocadas pela Segunda Guerra Mundial, que o biogás voltou a ser utilizado na cozinha e no aquecimento das casas, e também na alimentação de motores de combustão interna.

Nas décadas de 50 e 60, devido a uma relativa abundância das fontes de energia convencionais, desencorajou-se a recuperação do uso do biogás na maioria dos países desenvolvidos, e apenas em países com poucos recursos de capital e energia, como Índia e China, o biogás desempenhou um papel de certa importância, sobretudo em pequenos aglomerados rurais, segundo Nogueira (1992).

A partir da crise energética dos anos 70, o gás metano dos digestores anaeróbios voltou a despertar o interesse geral, conduzindo a um aumento da sua produção nos países desenvolvidos.

Com a preocupação ambiental dos dias atuais, aliada a um horizonte de esgotamento de combustíveis fósseis, o biogás vem se tornando, junto com outros energéticos sustentáveis, parte significativa da matriz energética mundial na busca do uso racional de energia.

### 2.3 Características do biogás

O biogás é um gás incolor, insolúvel em água e de baixa densidade. A composição média da mistura gasosa, segundo levantamento realizado por Azevedo (2000), nos trabalhos de Nogueira (1992), Michereff (1979), Lima (1991) e Bhattacharya *et al.* (1988), é a apresentada na Tabela 2.1 – Composição Média do Biogás. Fonte: Azevedo (2000).

Tabela 2.1 – Composição Média do Biogás. Fonte: Azevedo (2000).

Substância	Percentual de volume molar
Metano (CH <sub>4</sub> )	55 a 75 %
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 45 %
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0 a 3 %
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0 a 1 %
Sulfeto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	0 a 1 %
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0 a 0.5 %
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.1 %

Mais leve do que o ar atmosférico, contrariamente a outros gases como o butano e o propano, o biogás apresenta menores riscos de explosão na medida em que a sua acumulação ao nível do solo se torna mais difícil. A sua baixa densidade implica, em contrapartida, que ele ocupe um volume significativo e que a sua liquefação seja possível a temperaturas muito abaixo de 0°C, o que lhe confere algumas desvantagens em termos de transporte e utilização.

O biogás, em condições normais de produção, devido ao seu baixo teor de monóxido de carbono, inferior a 0,1%, é pouco tóxico.

Por outro lado, devido às impurezas que contém, principalmente compostos de enxofre, segundo Andersson *et al.* (2004) e Bishop (2004), o biogás é geralmente muito corrosivo. O componente mais corrosivo desta mistura é o sulfeto de hidrogênio que ataca, além de outros materiais, o cobre, o latão e o aço, desde que a sua concentração seja considerável. Quando o teor deste componente é baixo apenas o cobre é atacado de maneira significativa. Para teores elevados deste componente, da ordem de 1%, excepcionais nas condições normais de produção do biogás, o último torna-se tóxico e mortal. A presença do sulfeto de hidrogênio pode constituir um problema a partir do momento que houver uma combustão do gás e que sejam inalados os produtos desta combustão, dado que a formação do dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), que é extremamente nocivo, causa, normalmente, perturbações pulmonares.

O amoníaco, sempre em concentrações muito baixas, é corrosivo para o cobre, sendo os óxidos de nitrogênio libertados durante a sua combustão, igualmente tóxicos. Os outros gases contidos no biogás não suscitam problemas em termos de toxicidade ou nocividade. O gás carbônico, em proporção significativa (em torno de 35%), é inerte e apenas ocupa espaço,

empobrece a mistura e cria a necessidade de um aumento da capacidade de armazenamento. O vapor de água pode ser corrosivo para as canalizações depois de condensado, uma vez que é rico em materiais dissolvidos.

## 2.4 Aspectos energéticos do biogás

A comparação entre outros energéticos e o biogás é feita a partir da determinação do poder calorífico do biogás.

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de calor liberada quando uma queima completa é realizada. Entende-se por queima completa o processo de oxidação total por unidade de massa. Havendo hidrogênio no combustível, existirá a formação de água como um dos produtos da combustão. Define-se por poder calorífico superior quando essa água resulta sob a forma de vapor, e poder calorífico inferior quando se apresenta na forma líquida.

Azevedo (2000) levantou cromatograficamente<sup>4</sup> a composição química do biogás de diversas amostras na região metropolitana de Porto Alegre, do aterro sanitário da Extrema, do aterro sanitário da Zona Norte, do biodigestor de esgoto cloacal da Vila Esmeralda e do biodigestor de tratamento de efluentes de uma cervejaria, determinando o poder calorífico superior e inferior de cada fonte, com os seguintes parâmetros: temperatura das amostras 15°C e pressão de 1 atm e levando em conta as densidades relativas ao ar. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Faixa de poder calorífico superior e inferior de diversas fontes em MJ/kg. Fonte: Azevedo (2000).

	Aterro Extrema	Aterro Zona Norte	Biodigestor Vila Esmeralda	Biodigestor Cervejaria
Poder Calorífico Superior em MJ/kg	24	17	37	37
Poder Calorífico Inferior em MJ/kg	21	15	34	33

Conhecendo-se o poder calorífico de cada amostra, é possível fazer comparações com outros combustíveis que são apresentados na tabela 2.3, em ordem decrescente de poder calorífico.

<sup>4</sup> determinada pelo equipamento cromatógrafo da marca HP modelo 5890-A, com 6 colunas empacotadas (sebaconitria – 2 pés; sebaconitria– 30; peneira 13 – 2 pés; porapak-q – 6 pés; peneira molecular seguida de porapak-q – 3 pés).

Tabela 2.3 – Poder calorífico de alguns combustíveis em MJ/kg Fonte: Azevedo (2000).

Combustível	Poder Calorífico Superior	Poder Calorífico Inferior
Metano	55,5	50,0
Gás Natural	50,0	45,0
Gasolina	47,3	44
Diesel (leve)	44,8	42,5
Diesel (pesado)	43,8	41,4
Gás de Refinaria	42,3	38,6
Etanol	29,7	26,9
Carvão Vegetal	29,7	
Metanol	22,7	20,0
Madeira Seca	19,8 a 20,9	
Madeira (25% a 30% de umidade)	14,6	

É possível observar que o biogás *in natura* apresenta um poder calorífico menor do que o metano, o gás natural, o diesel, a gasolina e o gás de refinaria. Ele apresenta um poder calorífico comparável ao do etanol e do carvão vegetal e supera o metanol e a madeira na maioria das amostras. Portanto, mesmo na forma bruta, é competitivo com os outros energéticos renováveis, pois aqueles que apresentam poder calorífico sensivelmente maior são combustíveis fósseis, exceção do metano, que também pode ter origem sustentável.

O principal componente do biogás é o metano, que é o combustível de maior poder calorífico, por isso se o biogás passar por um processo de depuração, aumentando seu percentual de metano, poderá atingir alto poder energético, superando até mesmo a gasolina e o diesel.

Outras comparações em nível de energéticos podem ser feitas entre o biogás e os outros combustíveis - em especial os líquidos. O biogás, por se apresentar em estado gasoso, e ser mais leve que o ar, tende a se dissipar com muita facilidade, diminuindo o risco de acidentes explosivos, e permite uma queima muito mais homogênea, melhorando o rendimento dos sistemas. Por outro lado, não podendo ser liquefeito à temperatura ambiente, cria uma grande dificuldade de armazenamento, necessitando de grandes pressões para que quantidades significativas de biogás sejam armazenadas.

## 2.5 Impacto ambiental

Acredita-se que o aumento de gás carbônico na atmosfera terrestre esteja provocando um aumento da temperatura média global - fenômeno este chamado de “efeito estufa”. Infelizmente, o gás metano tem potencial para o aumento deste efeito da ordem de vinte e uma vezes o potencial do dióxido de carbono, segundo Leite e Monteiro (2005) e Kumar *et al.* (2004). Como o biogás é composto em sua maior parte por este gás, a sua simples queima diminui o potencial danoso deste seu componente.

Portanto, a queima do biogás tem aspecto favorável, e deve ser motivo de preocupação em todos os processos de onde a geração do biogás ocorra. Nesta mesma linha de raciocínio, pode-se afirmar que o biogás representa uma ameaça ambiental, principalmente por se tratar de um gás que acelera o “efeito estufa” e é produzido em grande quantidade em processos naturais e industriais, onde na maioria dos casos não pode ser convertido em gás carbônico.

O problema ambiental é representado pelo aumento da concentração mássica de metano na atmosfera, que ocorre devido a diferença entre as quantidades de biogás emitidas e absorvidas. As emissões de metano provenientes de aterros sanitários correspondem entre 67 e 365% da quantidade de metano a mais lançado na atmosfera<sup>5</sup>, segundo Hein *et al.* (1997) e Houweling *et al.* (1999), respectivamente. Portanto o controle do biogás emitido por aterros sanitários, que é técnica e economicamente viável, pode representar até mesmo a solução do problema do metano atmosférico.

### **2.5.1 Créditos de carbono**

A partir de 1988, houve uma intensificação dos debates a respeito da influência humana nas mudanças do clima, com a criação do IPCC, sigla em inglês para Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Em 1990, o IPCC divulgou o seu primeiro relatório com a confirmação das ameaças de mudança climática e com a recomendação de um tratado internacional para a análise do problema. No Rio de Janeiro, durante a Conferência Eco 92, foi realizada a chamada Cúpula da Terra, então a Convenção sobre Mudanças Climáticas foi assinada por 175 países, dentre eles o Brasil, com o objetivo de reduzir até níveis seguros a concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera.

Na Convenção Marco sobre Mudanças Climáticas, em 1997, foi adotado o Protocolo de Kyoto, cujo teor obrigava os países industrializados a reduzir suas emissões de gases que provocam o efeito estufa em 5,2% entre 2008 e 2012 em relação aos níveis registrados em 1990.

Os Estados Unidos, entre outros, negaram-se a assinar o documento, que para entrar em vigor e tornar-se um Tratado precisava da assinatura de um número de países cuja soma das emissões representassem 55% das emissões globais de carbono. As negociações se estenderam até 2004, quando a Rússia ratificou o Protocolo. Desta forma, o Tratado de Kyoto entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005.

---

<sup>5</sup> Vide tabela 2.4, na página 14.



Nos países industrializados, existe a impossibilidade de redução de emissões por questões econômicas, segundo Leite e Monteiro (2005). Nestes países o custo da redução da emissão de carbono podem superar US\$ 500,00 por tonelada, enquanto nos países em desenvolvimento oscila entre US\$ 1,00 e 30,00 por tonelada de carbono não emitido ou seqüestrado (fixado em vegetais, por exemplo).

Com base nessa diferença de custos criou-se um mercado mundial de créditos de carbono, em Schmidt (1999), onde os países que não puderem reduzir suas emissões de gases causadores do efeito estufa podem comprar créditos dos países que retiram esses gases da atmosfera mais do que emitem. O valor da tonelada de carbono não emitida ou seqüestrada oscila em torno de US\$ 5,00.

São seis os gases abrangidos pelo Tratado de Kyoto: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ).

## **2.6 Formação do biogás**

Como citado anteriormente, o biogás tem sua origem profundamente conhecida na degradação anaeróbia de matéria orgânica. Este processo de fermentação anaeróbia que produz o gás metano, é há muito tempo utilizado pelo homem para o tratamento dos esgotos, nos sistemas conhecidos por "fossas sépticas", ou simplesmente no ato de enterrar lixo para sua decomposição.

A digestão anaeróbia é um processo segundo o qual, algumas espécies de Archaea, que vivem na ausência de oxigênio, atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos, para produzir compostos simples: metano, dióxido de carbono, água, entre outros, extraindo simultaneamente a energia e os compostos necessários para o seu próprio crescimento.

Neste trabalho, existe especial interesse pela produção de biogás em aterros sanitários, onde também ocorre a sua produção pela fermentação anaeróbia do material orgânico disposto. A estabilização dos resíduos sólidos em um aterro sanitário normalmente segue uma seqüência de eventos durante o processo de decomposição. Inicialmente a decomposição bacteriana ocorre em nível aeróbio, pois certa quantidade de ar é aprisionada entre os detritos. A fase aeróbia é a mais curta no ciclo de atividade do aterro, uma vez que a quantidade de ar retida é limitada. Os microorganismos aeróbios produzem dióxido de carbono, água e calor, além de degradarem parcialmente a matéria orgânica, segundo Han (1979).

Enquanto o oxigênio é consumido, um segundo grupo de microorganismos se torna dominante, as Archaea anaeróbias produtoras de ácidos. Nesta fase, ocorre uma transformação das moléculas orgânicas em ácidos graxos e dióxido de carbono em grande quantidade, com um pico de emissão que ocorre em torno de quarenta dias após o confinamento do aterro, segundo Boyle 1977. Durante este período, inicia-se a produção de hidrogênio e ocorre a eliminação do nitrogênio.

Quando o oxigênio acaba, os microorganismos formadores de metano se tornam dominantes. Estas Archaea são anaeróbias e não toleram oxigênio, que mesmo em pequenas quantidades detém sua atividade; porém nessa situação formam esporos que, com condições favoráveis voltarão a produzir metano, conforme Cheremisinoff e Morresi (1976). Os microorganismos trabalham lentamente, usando os ácidos para formar metano, dióxido de carbono e água. O volume percentual de metano produzido aumenta, enquanto a produção de hidrogênio diminui. Isto ocorre, em geral, entre 180 e 500 dias depois do confinamento, segundo Boyle 1977. O tempo necessário para a produção significativa de metano é em geral de um ou dois anos após a disposição no aterro. O aterro como um todo normalmente sobrepõe pelo menos duas, quando não todas, as fases biológicas simultaneamente, segundo Schumacher (1983). A figura 2.2 apresenta as curvas transição da composição do biogás de um aterro sanitário em relação ao tempo entre o confinamento e a produção estável de metano. A escala de tempo apresentada corresponde a uma média, podendo variar dependendo de diversos fatores como composição dos resíduos, quantidade de água disponível e temperatura ambiente. O nitrogênio e sulfeto de hidrogênio também são produzidos, porém, em pequenas quantidades.

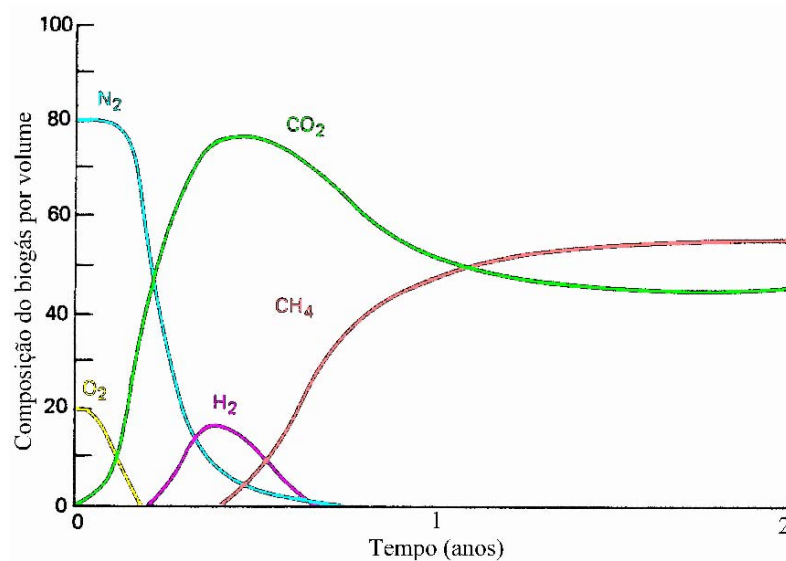


Figura 2.2 – Transição da composição do biogás. Fonte: Cheremisinoff e Morresi (1976) (adaptado)

A atividade enzimática das Archaea está ligada intimamente à temperatura. Ela é fraca até 10°C e insignificante acima dos 65°C. A faixa dos 20°C a 45°C corresponde à fase mesófila, enquanto que entre os 50°C e os 65°C, ocorre a fase termófila, segundo Han *et al.* (1979). Quando é possível controlar a variável temperatura se deve optar por uma temperatura de trabalho que leve em consideração as variáveis: volume de gás a produzir, grau de fermentação e tempo de retenção. Na fase mesófila, as variações de temperatura são aceitáveis, desde que não sejam bruscas. O mesmo não acontece com a fase termófila, onde as variações não são aconselháveis. No entanto, ela permite cargas mais elevadas e um tempo de retenção menor, com maiores taxas de produção de gás.

Outro parâmetro importante na digestão anaeróbia é o pH do meio. Em meio ácido, a atividade enzimática das Archaea é nula. Num meio alcalino, a fermentação produz anidrido sulfuroso e hidrogênio. A digestão pode se efetuar entre os pH 6,2 e 7,6, encontrando-se o valor ótimo em 7. Em aterros sanitários o pH não cai abaixo de 6,2, enquanto o metano está sendo gerado, segundo Rhyne e James 1978.

Vários nutrientes são necessários para o crescimento das Archaea produtoras de metano no aterro sanitário. Primeiramente carbono, hidrogênio, nitrogênio e fósforo devem estar presentes em suficientes quantidades, além de pequenas quantidades de sódio, potássio, enxofre, cálcio e magnésio que também são necessárias, em EMCOM *Associates* (1980).

A presença de materiais tóxicos (detergentes e outros produtos químicos) devem ser evitados ao máximo, pois basta uma concentração muito baixa destes produtos para provocar a intoxicação e a morte das Archaea.

## 2.7 Principais fontes de metano

O metano é um dos gases que compõem a atmosfera terrestre, e anualmente uma grande quantidade desse gás é produzida e também absorvida globalmente. O desequilíbrio entre a produção de metano e sua absorção natural vem provocando um acréscimo deste gás na atmosfera terrestre. A figura 2.3 apresenta a evolução do metano na atmosfera terrestre no último milênio obtido através da análise de bolhas de ar aprisionadas em blocos de gelo na Antártida, Etheridge *et al.* (1998) e Dlugokencky *et al.* (1998). É possível observar um acréscimo significativo, a partir de 1800 até 2000, na concentração de metano na atmosfera.

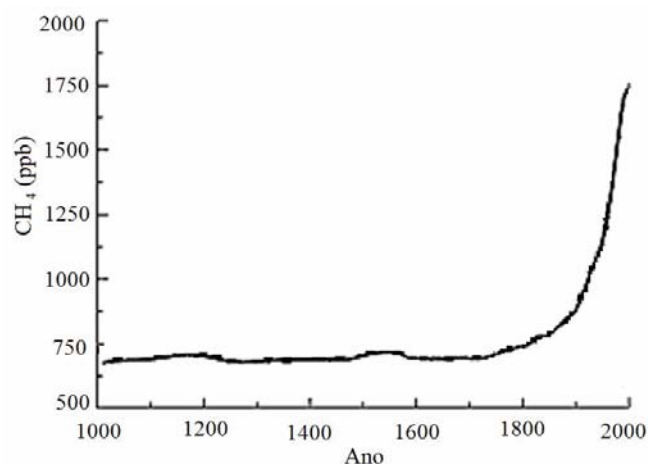


Figura 2.3 – Mudança na abundância de metano na atmosfera em fração molar, ppb, partes por bilhão. Fonte: Etheridge *et al.* (1998) and Dlugokencky *et al.* (1998).

A produção global de metano é formada por emissões naturais somadas às emissões, de alguma forma, provocadas pelo homem. Algumas destas fontes têm emissões importantes para o aumento do efeito estufa. Estas emissões foram estimadas por diversos pesquisadores. A tabela 2.4 apresenta as totalizações obtidas por Fung *et al.* (1991), Hein *et al.* (1997) e Lelieveld *et al.* (1998) para as emissões anuais de metano, nas décadas de oitenta e noventa, bem como resultados de estimativas parciais de Houweling *et al.* (1999), Mosier *et al.* (1998), Olivier *et al.* 1999, Cao *et al.* (1998) e Keppler *et al.* (2006), onde é possível verificar a representatividade de cada fonte no total de emissões. Também da tabela 2.4 é possível inferir que, pelos dados obtidos por três autores que fecharam seus balanços, existe um desequilíbrio entre a produção de metano e a capacidade global de absorção, isto provocado claramente pelas emissões antropogênicas, levando ao incremento na fração molar de metano na atmosfera, já apresentado na figura 2.3, e conseqüentemente ao incremento do efeito estufa. A unidade adotada é a Mt/ano (mega tonelada por ano), que equivale a milhões de toneladas por ano.

Tabela 2.4 – Distribuição dos totais de emissão e absorção global de metano por origem e destino, em Mt(CH<sub>4</sub>)/ano. Fonte: IPCC (2001) e Keppler *et al.* 2006. (Adaptado).

Referência	Fung <i>et al.</i> 1991	Hein <i>et al.</i> 1997	Lelieveld <i>et al.</i> 1998	Houweling <i>et al.</i> 1999	Mosier <i>et al.</i> 1998	Olivier <i>et al.</i> 1999	Cao <i>et al.</i> 1998	Keppler <i>et al.</i> 2006
<b>Ano base</b>	1980	-	1992	-	1994	1990	-	-
<b>Emissões Naturais</b>								
Pântanos	115	237	225 <sup>B</sup>	145	-	-	92	-
Cupins	20	-	20	20	-	-	-	-
Oceano	10	-	15	15	-	-	-	-
Hidratos	5	-	10	-	-	-	-	-
Folhas Vivas	-	-	-	-	-	-	-	65-236
<b>Total</b>	<b>150</b>	<b>237</b>	<b>270</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Emissões Antropogênicas</b>								
Energia	75	97	110	89	-	109	-	-
Aterros Sanitários	40	35	40	73	-	36	-	-
Ruminantes	80	90 <sup>A</sup>	115	93	80	93 <sup>A</sup>	-	-
Tratamento do Lixo		<sup>A</sup>	25	-	14	<sup>A</sup>	-	-
Plantações de Arroz	100	88	<sup>B</sup>	-	25-54	60	53	-
Queima de Biomassa	55	40	40	40	34	23	-	-
<b>Total</b>	<b>350</b>	<b>350</b>	<b>330</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Emissões Totais</b>	<b>500</b>	<b>587</b>	<b>600</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Absorções</b>								
Solos	10		30	30	44	-	-	-
OH Troposférico	450	489	510	-	-	-	-	-
Perdas na Estratosfera		46	40	-	-	-	-	-
<b>Absorções Totais</b>	<b>460</b>	<b>535</b>	<b>580</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Desequilíbrio</b>								
<b>Desequilíbrio Total</b>	<b>+40</b>	<b>+52</b>	<b>+20</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

<sup>A</sup> Tratamento de lixo somado aos ruminantes. <sup>B</sup> Plantações de arroz somadas aos pântanos.

A absorção de metano se dá em três níveis principais: a absorção pelo solo, pela troposfera por combinação com OH, CL e O e por perdas na estratosfera. Sendo que a perda mais significativa ocorre por combinação na troposfera, onde são retidos entre 87 a 97 % do metano absorvido. Pode-se observar que da década de oitenta para a de noventa houve um acréscimo neste tipo de absorção da ordem de 13%, o que não pode ser facilmente explicado, porém parece ter relação com a erupção do vulcão Pinatubo<sup>6</sup>, em Dlugokencky *et al.* (1996).

As plantações de arroz do molhado, pântanos e alagamentos de grandes áreas provocam a degradação da matéria orgânica em ambiente anaeróbico, produzindo biogás. Esta produção de biogás ocorre de forma indesejável e inevitável. O gás produzido não pode ser captado com viabilidade econômica, ecológica ou técnica. Representam, somadas, entre 37% a

55% das emissões globais de metano, segundo Hein *et al.* (1997), Fung *et al.* (1991) e Lelieveld *et al.* (1998).

Outra fonte importante de biogás são os cupins, cuja produção global de biogás é estimada em torno de 20 Mt/ano, e representam pelo menos 3,5% das emissões totais de metano, ou mais de 13% das emissões naturais. O metano é produzido nos cupins como parte do processo digestivo normal. A quantidade gerada varia entre as diferentes espécies. As emissões de cupins, naturalmente, dependem em grande parte da população destes insetos que podem variar significativamente entre regiões diferentes do mundo devido aos mais diversos fatores, incluindo desequilíbrio ecológico como falta de predadores ou excesso de alimento.

Os ruminantes em geral - bois, búfalos, ovelhas, cabras e camelos - produzem quantias significativas de metano e existem em um número só justificável pelo manejo humano. A produção de metano, tal qual nos cupins, ocorre em processos digestivos normais. No rúmen, ou primeiro estômago (de um total de quatro) destes animais, ocorre a fermentação microbiana, que converte principalmente a celulose em nutrientes mais facilmente digeríveis que podem ser utilizados pelo animal. Este processo de fermentação microbiana, chamado fermentação entérica, produz metano como um subproduto que pode ser exalado pelo animal. Metano também é produzido em quantidades menores pelos processos digestivos de outros animais, inclusive pelos seres humanos, mas emissões destas fontes são insignificantes. A produção anual de metano pelos ruminantes chega a 16 % das emissões totais, porém não existe tecnologia para seu aproveitamento energético.

Os oceanos são responsáveis por aproximadamente 2% das emissões globais de metano; anualmente emitem mais de 10 Mt de metano para a atmosfera. A origem do metano oceânico não está totalmente clara, mas duas fontes identificadas incluem a digestão anaeróbia no zooplâncton marinho e peixes, e também a formação de metano em sedimentos em áreas litorâneas.

O metano também é proveniente da produção de energia como o manejo de petróleo, gás natural e carvão mineral, que chegam a perfazer 15% das emissões totais anuais, além da queima direta de biomassa como as queimadas, o uso de lenha e resíduos florestais.

Os aterros sanitários representam entre 6 a 8% do total de emissões de metano, ou até mesmo 12% com base no trabalho de Houweling *et al.* (1999); têm origem antropogênica e hoje existem tecnologias de baixo custo para a captação de um grande percentual destas emissões, próximo de 90%.

---

<sup>6</sup> Localizado na ilha de Luzon, nas Filipinas. Erupção violenta em 1991.

Uma outra questão ainda mais importante é que ao se observarem as emissões de metano que partem de aterros sanitários à luz do desequilíbrio hoje existente no metano atmosférico, obtêm-se que estas emissões representavam 67% do desequilíbrio de metano na década de oitenta e entre 200% e 367% na década de noventa. Ou seja, contendo-se as emissões em aterros sanitários, é possível resolver o problema do acréscimo de metano na atmosfera terrestre, naturalmente, tendo como base os estudos apresentados na Tabela 2.4.

### 2.7.1 Sistema de tratamento de esgotos

O sistema de tratamento de esgoto tem potencial de geração de biogás, e o mesmo pode ser captado com viabilidade econômica. O uso de biogás proveniente do tratamento de esgotos é visto como viável por Stefan (2003) e em aplicação em Haug *et al.* (2000) e Hernandez *et al.* (2002).

Os processos de depuração de esgotos domésticos ou industriais, quando possuírem etapas anaeróbias efetivamente, produzem biogás, que deve ser captado e pelo menos queimado para a redução de seu impacto ambiental. Na figura 2.4 vê-se a Estação de Tratamento de Esgotos Pavuna no Rio de Janeiro.



Figura 2.4 – Estação de Tratamento de Esgotos Pavuna – Rio de Janeiro Fonte: Aquacon (2006).

Um sistema padrão de tratamento de esgotos é apresentado pela SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo de maneira sucinta a partir da figura 2.5, onde as etapas do tratamento se encontram esquematizadas.

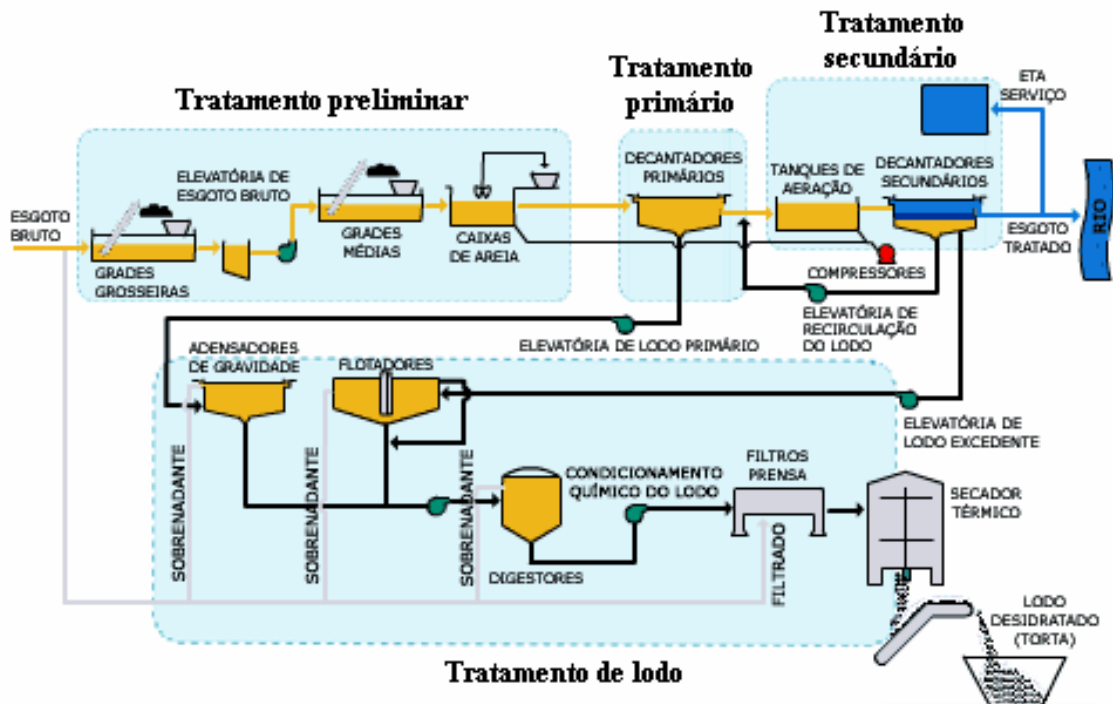


Figura 2.5 – Diagrama esquemático de uma central de tratamento de esgotos. Fonte: SABESP (2006).

Na etapa de tratamento preliminar ocorre o gradeamento e a desarenação. O gradeamento consiste na remoção de sólidos grosseiros, onde o material de dimensões maiores do que o espaçamento entre as barras de uma ou mais grades é retido. Os sólidos grosseiros precisam ser removidos para a proteção: dos dispositivos de transporte dos esgotos (bombas e tubulações), das unidades de tratamento subsequentes e dos corpos receptores. A desarenação é feita por sedimentação: os grãos de areia, devido às suas maiores dimensões e densidade, vão para o fundo de um tanque, enquanto a matéria orgânica, de sedimentação bem mais lenta, permanece em suspensão, seguindo para as unidades seguintes. As finalidades básicas da remoção de areia são: evitar abrasão nos equipamentos e tubulações, eliminar ou reduzir a possibilidade de obstrução em tubulações, tanques, orifícios, sifões e facilitar o transporte líquido, principalmente a transferência de lodo, em suas diversas fases.

O tratamento primário é feito em tanques de decantação. Os esgotos fluem vagarosamente através destes decantadores, permitindo que os sólidos em suspensão, que apresentam densidade maior do que a densidade do líquido circundante, sedimente-se gradualmente no fundo. Essa massa de sólidos, denominada lodo primário bruto, pode ser adensada no poço de lodo do decantador e ser enviada diretamente para a digestão ou ser enviada para os adensadores. Uma parte significativa destes sólidos em suspensão é composta de matéria orgânica.



Dependendo da natureza e da granulometria dos sólidos, as peneiras rotativas podem substituir o sistema de gradeamento (do tratamento preliminar) ou serem colocadas em substituição aos decantadores primários (do tratamento primário). A finalidade é separar sólidos com granulometria superior à dimensão dos furos da tela. O fluxo atravessa o cilindro de gradeamento em movimento, de dentro para fora. Os sólidos retidos pela resultante de perda de carga na tela são removidos continuamente e recolhidos em caçambas.

O tratamento secundário consiste de tanques de aeração, decantadores secundários e retorno do lodo. A remoção da matéria orgânica é efetuada por reações bioquímicas, realizadas por microrganismos aeróbios (Archaea, protozoários e fungos) no tanque de aeração. A base de todo o processo biológico é o contato efetivo entre esses organismos e o material orgânico contido nos esgotos, de tal forma que esse possa ser utilizado como alimento pelos microrganismos. Os microrganismos convertem a matéria orgânica em gás carbônico, água e material celular (crescimento e reprodução dos microrganismos). Já os decantadores secundários exercem um papel fundamental no processo de lodos ativados, sendo responsável pela separação dos sólidos em suspensão presentes no tanque de aeração, permitindo a saída de um efluente clarificado, e pela sedimentação dos sólidos em suspensão no fundo do decantador, permitindo o retorno do lodo em concentração mais elevada. O efluente do tanque de aeração é submetido à decantação, onde o lodo ativado é separado, voltando para o tanque de aeração. O retorno do lodo é necessário para suprir o tanque de aeração com uma quantidade suficiente de microrganismos e manter uma relação, entre alimentos e microrganismos, capaz de decompor com maior eficiência o material orgânico. O efluente líquido oriundo do decantador secundário é descartado diretamente para o corpo receptor (rio) ou passa por tratamento para que possa ser reutilizado internamente ou oferecida ao mercado para usos menos nobres, como lavagem de ruas e rega de jardins.

O lodo gerado nas etapas anteriores é tratado em adensadores, flotadores, digestão anaeróbia, desidratação e secagem. Esta etapa inicia-se nos adensadores de densidade e nos flotadores. Como o lodo contém uma quantidade muito grande de água, deve-se realizar a redução do seu volume. O adensamento é o processo para aumentar o teor de sólidos do lodo e, conseqüentemente, reduzir o volume. Este processo pode aumentar, por exemplo, o teor de sólidos no lodo descartado de 1% para 5%. Dentre os métodos mais comuns, temos o adensamento por gravidade e por flotação. O adensamento por gravidade do lodo tem por princípio de funcionamento a sedimentação por zona; o sistema é similar aos decantadores convencionais. O lodo adensado é retirado do fundo do tanque. No adensamento por flotação, o

ar é introduzido na solução através de uma câmara de alta pressão. Quando a solução é despressurizada, o ar dissolvido forma microbolhas que se dirigem para cima, arrastando consigo os flocos de lodo, que são removidos na superfície.

A digestão anaeróbia é realizada com as seguintes finalidades: destruir ou reduzir os microrganismos patogênicos, estabilizar total ou parcialmente as substâncias instáveis e matéria orgânica presentes no lodo fresco, reduzir o volume do lodo através dos fenômenos de liquefação, gaseificação e adensamento, dotar o lodo de características favoráveis à redução de umidade, permitir a sua utilização, quando estabilizado convenientemente, como fonte de húmus ou condicionador de solo para fins agrícolas. Convém salientar que a função energética do biogás gerado não costuma ser citada como finalidade da etapa de digestão anaeróbia em centrais de tratamento de esgoto, que pode, inclusive, ser substituída pela etapa de condicionamento ou estabilização química do lodo, onde não existe geração significativa de biogás. O condicionamento químico resulta na coagulação de sólidos e liberação da água adsorvida; é usado antes dos sistemas de desidratação mecânica, tais como filtração e centrifugação. Os produtos químicos usados incluem cloreto férrico, cal, sulfato de alumínio e polímeros orgânicos.

A retirada mecânica de água do lodo é feita em um filtro-prensa de placas. A desidratação é feita ao forçar a água do lodo sob alta pressão. As vantagens do filtro prensa incluem: alta concentração de sólidos da torta, baixa turbidez do filtrado e alta captura de sólidos.

A secagem térmica do lodo é um processo de redução de umidade através de evaporação de água para a atmosfera com a aplicação de energia térmica, podendo-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95%. Com isso, o volume final do lodo é reduzido significativamente.

Outro tipo de tratamento, com grande facilidade para a captação de biogás, é o realizado através do Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), que corresponde a um reator fechado. O tratamento biológico ocorre por processo anaeróbio e a decomposição da matéria orgânica é feita por microorganismos presentes num manto de lodo.

O esgoto sai da parte inferior do reator e passa pela camada de lodo que atua como se fosse um meio filtrante. A eficiência atinge de 65% a 75% e, segundo a SABESP (2006), por

isso, necessita de um tratamento complementar que pode ser através da lagoa facultativa. É um mecanismo compacto e de fácil operação.

As lagoas facultativas correspondem às lagoas com 1,5 a 3 metros de profundidade. O termo "facultativo" refere-se à mistura de condições aeróbias e anaeróbias. Em lagoas facultativas, as condições aeróbias são mantidas nas camadas superiores próximas à superfície das águas, enquanto as condições anaeróbias predominam no sentido e em camadas próximas ao fundo da lagoa. Embora parte do oxigênio necessário para manter as camadas superiores aeróbias seja fornecido pela aeração atmosférica através da superfície, a maior parte é suprida pela atividade fotossintética das algas, as quais crescem naturalmente nas águas onde estão disponíveis grandes quantidades de nutrientes, e a energia da luz solar incidente. As Archaea existentes nas lagoas utilizam oxigênio produzido pelas algas para oxidar a matéria orgânica. Um dos produtos finais do metabolismo bacteriano é o gás carbônico, que é imediatamente utilizado pelas algas na sua fotossíntese. Neste tipo de tratamento, grande parte do volume de lodo é reduzida, e o sistema é favorável para comunidades pequenas, normalmente situadas no interior.

Em Porto Alegre, a Estação de Tratamento de Esgotos da Vila Esmeralda do DMAE (Departamento Municipal de Águas e Esgotos) possui um biodigestor usado como uma das etapas de tratamento do esgoto. Azevedo (2000) realizou uma análise cromatográfica do biogás gerado, e os resultados foram obtidos em função do percentual de volume molar, apresentados na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Composição percentual de volume molar do biogás do biodigestor do DMAE.

Fonte: Azevedo (2000).

Componentes	Percentual de Volume Molar
O <sub>2</sub>	0,52 ± 0,02 %
N <sub>2</sub>	9,57 ± 0,02 %
Ar	0,11 ± 0,02 %
CO	0,00 ± 0,02 %
H <sub>2</sub> S	0,00 ± 0,02 %
CO <sub>2</sub>	5,49 ± 0,02 %
CH <sub>4</sub>	84,30 ± 0,02 %

## 2.7.2 Indústria

Algumas indústrias, em especial aquelas do setor de produção de alimentos, setor de tratamento de couros e de produção de papel podem produzir e captar o biogás, utilizando seu potencial energético no próprio processo produtivo.

Sempre que uma indústria produzir efluentes orgânicos e tratá-los anaerobicamente ocorrerá a produção de biogás. Na figura 2.6 é apresentada uma central de tratamento de efluentes líquidos industriais.

A viabilidade do uso de biogás proveniente de resíduos industriais aparece na Índia com estudos de caso em Lata *et al.* (2002), na Dinamarca com estudo de caso em Murphy *et al.* (2004), e análise de vantagens e desvantagens em Raven e Gregersen (2005).



Figura 2.6 – Central de tratamento de efluentes industriais: Papel e Celulose. Fonte: Centroprojekt (2006).

Azevedo (2000) realizou uma análise cromatográfica do biogás liberado pelo biodigestor do sistema de tratamento de efluentes de uma cervejaria, em Porto Alegre. A sua composição percentual de volume molar é apresentada na tabela 2.6.

Tabela 2. 6 – Composição percentual de volume molar do biogás de cervejaria.

Fonte: Azevedo (2000).

Componentes	Percentual de Volume Molar
O <sub>2</sub>	0,25 ± 0,02 %
N <sub>2</sub>	3,50 ± 0,02 %
Ar	0,04 ± 0,02 %
CO	0,00 ± 0,02 %
H <sub>2</sub> S	0,00 ± 0,02 %
CO <sub>2</sub>	10,63 ± 0,02 %
CH <sub>4</sub>	85,58 ± 0,02 %

### 2.7.3 Aterros sanitários

Os aterros sanitários produzem, em geral, uma quantidade muito grande de biogás, de forma inevitável, com relativa facilidade de captação, por um período de tempo suficiente para que seja utilizado, com viabilidade econômica com fins energéticos como aparece em Nichols (2001) e Azevedo (2000). E casos de geração de energia elétrica em média e larga escala estão sendo planejados ou em operação em Taiwan, Tsai (2005), Estados Unidos, Fickes (2003), Reagin (2002), e no Chile, em Escobedo *et al.* (2005).

Um aterro sanitário comporta-se como um gigantesco biodigestor descontínuo, onde os resíduos são colocados em células herméticas com sistemas de coleta de efluentes líquidos e de biogás.

Os aterros sanitários representam a maneira mais barata de manejar resíduos sólidos domésticos e industriais e são amplamente utilizados em países em desenvolvimento e em cidades de todos os portes. Constituem-se em uma alternativa de muito menor impacto ambiental do que os antigos “lixões”. Atualmente existem projetos que incorporam todos os aspectos de gestão de resíduos sólidos e os aterros sanitários em um único sistema. Um exemplo é apresentado na figura 2.7. Nesse sistema, não está previsto o aproveitamento energético do biogás, somente sua queima.



Figura 2. 7 – Integração do aterro no sistema de gestão de resíduos sólidos.

Fonte: NetResíduos (2006)

## 2.8 O aterro sanitário da Extrema

No aterro sanitário da Extrema foi instalado o protótipo de geração de energia elétrica de baixo custo. O biogás gerado por esse aterro é o combustível desse equipamento; por isso, foi feita uma análise mais aprofundada desta fonte em especial.

### 2.8.1 Histórico

O aterro sanitário da Extrema localiza-se na região sul do município de Porto Alegre, nas encostas de um dos morros da Cadeia do Espigão. O morro da Extrema, do qual recebeu o nome, é um maciço de granito que conforma um promontório, mais especificamente na cava de uma antiga saibreira desativada, a cerca de 35 quilômetros do centro do município, conforme a figura 2.8.



Figura 2. 8 – Cava de extração de saibro. Fonte: DMLU (2004).

Foi o primeiro aterro, em Porto Alegre, em que foi realizado um Estudo de Impacto Ambiental (EIA), e seu Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). Entre os estudos iniciais e a primeira carga de resíduos, houve um intervalo de tempo de cinco anos. O projeto seguiu as normas e legislação ambiental em vigor na época, a partir de levantamentos em campo, segundo Anjos e Reichert (1997).

Esta área foi a escolhida entre onze inicialmente indicadas. A colocação do aterro visou à recuperação topográfica e paisagística do local, que deixou de ser um imenso buraco com sérios problemas de erosão e desmoronamentos para se tornar novamente um morro coberto por gramíneas e com características semelhantes a sua configuração natural, como pode ser visto na figura 2.9.



Figura 2.9 – O aterro da Extrema em 2006.

### 2.8.2 Características Técnicas

Devido a sua localização, em uma cava de extração de saibro, com taludes verticais de até 40 metros de altura, a área de disposição de resíduos é de forma irregular, buscando o melhor aproveitamento da área. O perfil vertical do projeto contém nove patamares de disposição, atualmente todos executados.

Para a regularização da plataforma do aterro foi executado o rebaixamento do nível do lençol freático em aproximadamente 2 metros e posteriormente procedida a execução das camadas de impermeabilização.

A impermeabilização inferior do aterro foi executada com dupla camada, sendo a primeira camada constituída por um metro de argila compactada, com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-7}$  cm/s e a segunda camada executada com a instalação de geomembrana (PEAD) com espessura de 2 mm, protegida por manta geotextil. A obra pode ser visualizada na figura 2.10.





Figura 2.10 – Vista da impermeabilização do aterro. Fonte DMLU.

A drenagem do lixiviado é feita por meio de drenos horizontais e verticais executados com pedra granítica, dispostos na massa de resíduos e interligados, a fim de direcioná-lo para o pré-tratamento. O pré-tratamento é constituído por um filtro anaeróbio executado dentro do aterro, no patamar inferior, elaborado por uma camada de brita nº 4 com espessura de 40 centímetros e área de um hectare, onde o lixiviado pode ser retido por meio de operação de registros. O lixiviado, após o pré-tratamento, é transportado para ETE (Estação de tratamento de esgoto da Vila Esmeralda) a fim de ser tratado em combinação com esgoto doméstico.

O biogás é captado em 100% do aterro, no interior da massa de resíduos pelos mesmos drenos verticais de pedra granítica, com diâmetro em torno de 1 metro e profundidade variada, e queimado em vários pontos da superfície por meio de queimadores do tipo *flare*.

Além destes pontos, foi necessária a execução de novos pontos de captação, por meio de perfuração na parte frontal do aterro. Existem 70 pontos de queima.

O aterro é executado em célula única, composta por vários patamares sobrepostos. Ao final de cada jornada de trabalho, os resíduos foram cobertos com uma camada provisória de 0,30 metro de saibro ou de solo de bota-fora, sendo esta camada removida para nova disposição, não havendo camadas de cobertura entre o resíduo. A disposição dos resíduos no aterro foi executada em camadas com espalhamento e compactação em rampa de inclinação 3H:1V (3 metros horizontais para 1 metro vertical), sendo que ao final para a conformação dos taludes

externos, esta inclinação foi executada com 2H:1V (2 metros horizontais para 1 metro vertical). O índice de compactação atingido foi da ordem de  $750 \text{ kg/m}^3$ . Na figura 2.11, pode ser visto um corte longitudinal esquemático do aterro.

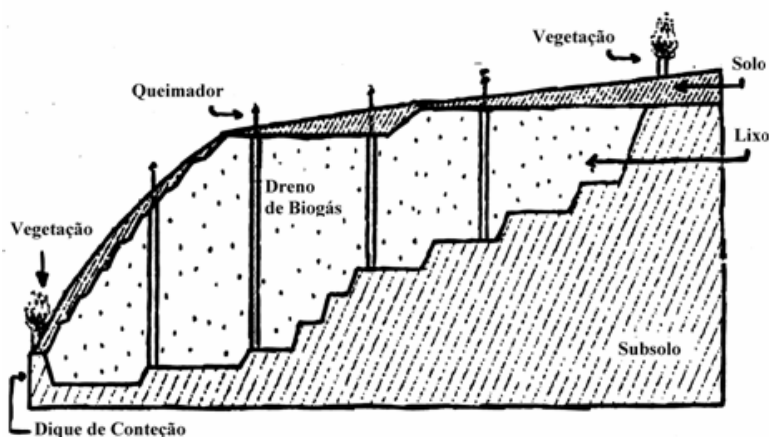


Figura 2.11 – Esquema de conformação da base após a regularização e topografia após o encerramento do aterro. Vista em corte longitudinal. Fonte Anjos e Reichert (1997).

A cobertura definitiva projetada é constituída por uma camada de 0,70 metro de argila compactada, dos quais atualmente 30% encontram-se executados, conforme plano de encerramento licenciado e em execução. Na figura 2.12 pode ser observado o seu formato em uma vista aérea.



Figura 2.12 – Vista aérea do aterro. Fonte: imagem do satélite QuickBird® apud DMLU (2004).

O aterro entrou em operação em 16 de junho de 1997, sendo que o encerramento da operação ocorreu em 31 de dezembro de 2002.

Área do aterro: 7 ha

Área total do empreendimento: 9 ha

Volume de projeto: 1.048.323 m<sup>3</sup>

A tabela 2.7 apresenta os quantitativos de resíduos destinados ao aterro durante sua operação.

Tabela 2.7 – Resíduos destinados ao aterro sanitário da Extrema, por ano e por origem. (valores em t). Fonte DMLU 2004.

ANO	TIPOS DE RESÍDUOS					TOTAL/ ANO
	Domésticos	Industrial C.II	Comercial	Público	Rejeito Reciclagem	
1997	15.647,456	-	-	-	-	15.647,456
1998	258.317,136	4.429,254	16.021,404	23.553,217	-	302.321,011
1999	168.774,375	2.380,560	10.259,996	16.107,947	-	197.522,878
2000	144.561,659	1.999,598	8.814,903	10.103,421	-	165.479,580
2001	84.101,696	967,042	258,503	1.550,919	728,310	87.606,469
2002	50.780,546	830,023	146,108	3.013,09	777,258	55.547,042
<b>TOTAIS</b>	<b>722.182,868</b>	<b>10.606,477</b>	<b>35.500,913</b>	<b>54.328,594</b>	<b>1.505,568</b>	<b>824.124,419</b>

A tabela 2.8 apresenta a composição dos resíduos sólidos domésticos em Porto Alegre em 2002, ano de fechamento do aterro sanitário da Extrema, em percentual de peso úmido, levantado em Reis *et al.* (2002).

Tabela 2.8 – Composição dos resíduos sólidos domésticos de Porto Alegre em 2002. Fonte: Reis *et al.* (2002).

COMPONENTES	Percentual Peso úmido
Matéria orgânica facilmente biodegradável	43,83%
Rejeito	20,29%
Plástico filme	5,35%
Jornais e revistas	4,57%
Plástico rígido	4,24%
Trapos	3,53%
Vidro	3,44%
Metal ferroso	3,18%
Papel	2,75%
Plástico PET	2,11%
Papelão	1,94%
Embalagem longa vida	1,60%
Madeira	0,73%
Alumínio	0,59%
Couros	0,55%
Isopor	0,48%
Borracha	0,29%
Outros metais	0,22%
Cerâmica	0,18%
Plástico PVC	0,13%
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>

A tabela 2.9 apresenta a composição dos resíduos sólidos domésticos de Porto Alegre em 1997, em percentual de peso úmido, ano de início da atividade do aterro sanitário da Extrema, segundo o DMLU.

Tabela 2.9 - Caracterização, em percentagem de peso úmido, dos resíduos domésticos de Porto Alegre em 1997. Fonte: (DMLU).

COMPONENTES	Percentual Peso úmido
Matéria orgânica facilmente biodegradável	52,10%
Papel	11,26%
Rejeito	11,00%
Plástico filme	7,57%
Plástico rígido	4,84%
Papelão	3,75%
Trapo/couro	2,78%
Metal ferroso	2,00%
Vidro	1,91%
Embalagens tipo “longa vida”	1,27%
Madeira	0,87%
Alumínio	0,46%
Outros metais	0,07%
Louça	0,07%
Borracha	0,05%
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>

A composição molar do biogás do aterro da Extrema está indicada na tabela 2.10, levantada no trabalho de Azevedo (2000).

Tabela 2.10 – Composição molar do biogás do aterro da Extrema. Fonte: Azevedo (2000).

Componentes	Volume molar (%)
O <sub>2</sub>	0,72 ± 0,02
N <sub>2</sub>	2,00 ± 0,02
Ar	0,02 ± 0,02
CO	0,00 ± 0,02
H <sub>2</sub> S	0,00 ± 0,02
CO <sub>2</sub>	27,99 ± 0,02
CH <sub>4</sub>	69,27 ± 0,02

### 2.8.3 Estimativa de produção de biogás

Entre 40 a 70 kg de metano são gerados por tonelada de resíduos úmidos, durante a vida útil de um aterro sanitário, em torno de vinte anos, segundo Ashworth *et al.* (1996), esta simplificação permite uma estimativa das quantidades de metano a serem geradas. A medição efetiva do biogás gerado é bastante complexa devido à imprecisão dos métodos empíricos utilizados conforme Walter (2003).

A partir dos dados totais obtidos do DMLU (2004), apresentados na tabela 2.7, pode-se estimar o potencial de geração total de metano do aterro sanitário da Extrema ao longo de toda a sua vida útil (vinte anos). O valor encontrado representa uma faixa de produção esperada, que na prática não tem muita utilidade, por se tratar de uma estimativa de total de produção, parte desse metano já foi gerada e queimada.

Sabendo-se ainda, que no aterro da Extrema o percentual de metano é de 69,27% conforme a tabela 2.10, e considerando que esse percentual não se altere significativamente ao longo do tempo, conforme apresentado nas curvas da figura 2.22, pode-se estimar a quantidade de biogás gerado. Esses valores são apresentados na tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Estimativa de produção de metano e biogás ao longo de toda a vida útil do aterro.

Faixa de Produção	Totais em T de Metano	Totais em T de Biogás
Nível Inferior de Produção	33.000	52.000
Nível Superior de Produção	58.000	91.000

A curva de produção anual de metano, apresentada na figura 2.13, foi determinada a partir do uso do *software* LandGEM, *Landfill Gas Emissions Model*, versão 3.02, com o uso do método US EPA *First Order Decay Model*, fornecido pela EPA (2006) *United States Environmental Protection Agency*. Outros estudos do potencial de geração de biogás por um aterro sanitário, bem como sua estimativa quantitativa, aparecem em Braz e Silva (2001), Kumar *et al.* (2004), Schmidt (1999).

Para a estimativa foram utilizados como parâmetros os dados da tabela 2.7, tabela 2.8 e tabela 2.9, levando em conta o clima de Porto Alegre, as condições de umidade, a temperatura média do interior do aterro (32,11°C, segundo DMLU 2006), medida através da temperatura do chorume bruto, vide ANEXO V, e considerando 60% de metano no biogás. Pode-se observar que a ordem de grandeza da geração total calculada se encontra no limite superior esperado por Ashworth *et al.* (1996), e a geração anual, apesar de sofrer diminuição progressiva a partir de

2002, continuará produzindo significativamente, em valores absolutos, até 2017, mesmo que, em valores relativos às emissões, representem apenas uma décima quarta parte das emissões entre 2001 e 2002.

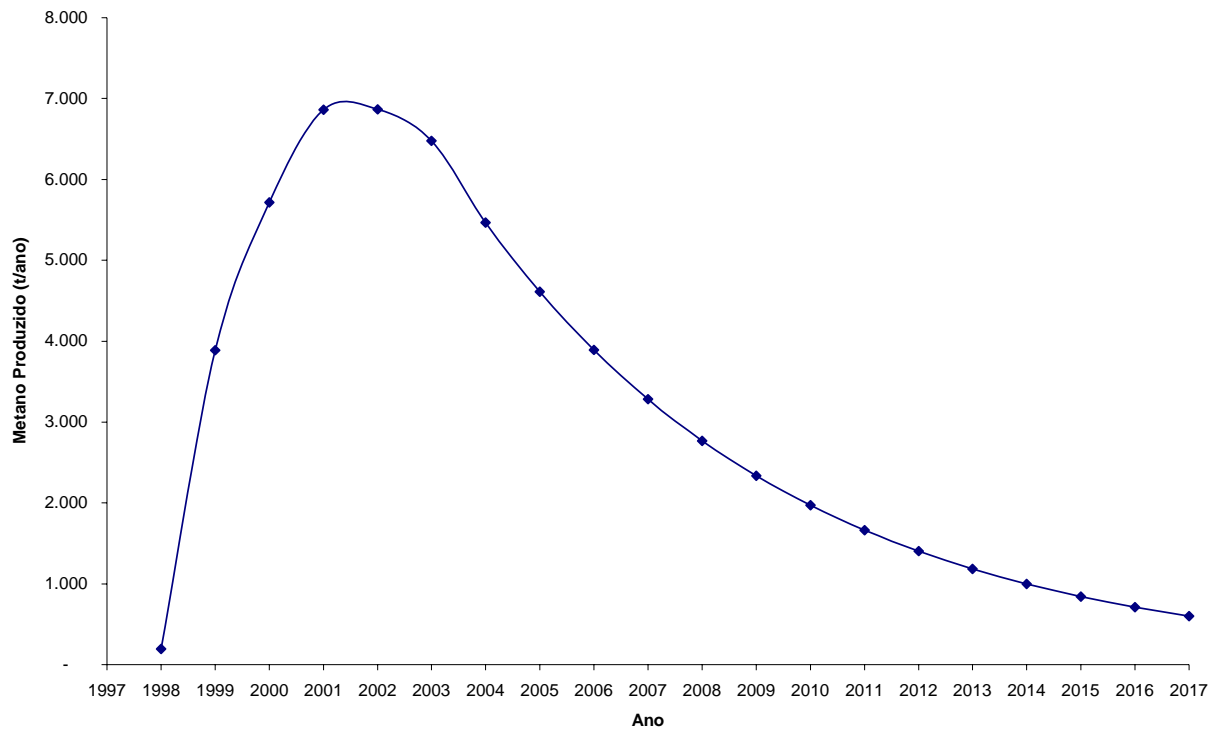


Figura 2.13 – Estimativa da quantidade de metano gerado por ano ao longo de vinte anos no aterro sanitário da Extrema. Fonte: determinado com uso do *software* LandGEM.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O sistema de geração de energia elétrica proposto como atividade experimental consiste em um motor a combustão interna de ciclo de ar padrão Otto conectado a um gerador assíncrono auto-excitado. Logo, fundamentalmente se está transformando energia térmica da queima do combustível termodinamicamente em energia mecânica. Esta, por sua vez, aciona o rotor de um motor assíncrono que tem conectado em seus enrolamentos de estator capacitores inicialmente carregados com um potencial em torno de 5% do seu valor nominal de tensão eficaz de operação. Após algum tempo de operação o sistema atinge os seus potenciais nominais de trabalho. Assim, a energia térmica da queima do combustível é transformada em energia elétrica. Aspectos exergéticos dessa troca de energia térmica em mecânica também são analisados.

#### 3.1 O motor de combustão interna

A nomenclatura “motor de combustão interna” é normalmente aplicada aos motores alternativos do tipo normalmente usados em automóveis, caminhões e ônibus. A maioria das turbinas a gás são motores de combustão interna, porém do tipo rotativo. Nos motores referidos, os processos ocorrem dentro de arranjos cilindro-êmbolo, com movimentos alternativos.

Os dois tipos de motores de combustão interna alternativo são: o motor com ignição por centelha e o motor com ignição por compressão. No motor com ignição por centelha, uma mistura de combustível e ar é incendiada por uma faísca de vela. No motor com ignição por compressão, o ar tem sua pressão e temperatura elevada até um ponto onde o combustível, ao ser injetado, incendeia-se espontaneamente.

Os motores de combustão interna com centelha são vantajosos para aplicações de baixa potência até 225 kW (300hp). Como são relativamente leves e de baixo custo, são especialmente utilizados em automóveis. Os motores com ignição por compressão são preferidos para operação em aplicações onde são requeridas grandes potências e economia de combustível – como, por exemplo, em caminhões pesados e ônibus.

A figura 3.1 mostra um esboço de um motor de combustão interna alternativo, onde é apresentado um êmbolo que se move dentro de um cilindro dotado de duas válvulas. A figura apresenta alguns termos típicos. A bitola do cilindro é seu diâmetro, e o curso é a distância que o êmbolo se move. O êmbolo está no ponto morto superior, *PMS*, quando ele se moveu até uma posição onde o volume do cilindro é mínimo. Este volume mínimo é chamado de volume da câmara de combustão. O ponto morto inferior, *PMI*, é a posição contrária onde o cilindro tem



seu maior volume. O volume percorrido pelo êmbolo entre o ponto morto superior e o inferior é o volume de deslocamento do êmbolo. A taxa de compressão,  $r$ , é obtida pela razão entre o volume total do cilindro no ponto morto inferior e o volume da câmara de combustão. O movimento alternativo do êmbolo é convertido em movimento de rotação por um mecanismo biela manivela.



Figura 3.1– Esboço de conjunto êmbolo cilindro para motores alternativos de ignição por centelha. Fonte: Moran e Shapiro, 2002 (adaptado).

Em um motor de combustão interna alternativo de quatro tempos, para cada duas rotações do eixo de manivelas o êmbolo executa quatro cursos distintos dentro do cilindro, completando um ciclo de trabalho útil, representado na forma de um gráfico de pressão por deslocamento na figura 3.2.

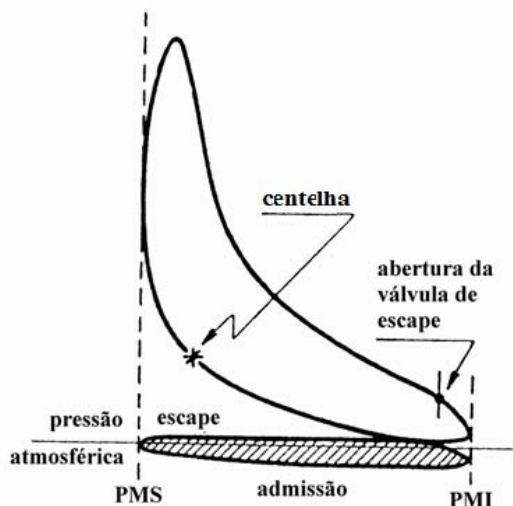


Figura 3.2 – Gráfico de pressão por deslocamento para um motor de combustão interna alternativo. Fonte: Giacosa (1988) (adaptado).

Com a válvula de admissão aberta, o êmbolo executa um curso de admissão quando aspira a mistura ar combustível, para o caso do motor com ignição por centelha. Na sequência, as válvulas se fecham e o êmbolo faz um curso de compressão, elevando a temperatura e a pressão da mistura. Esta etapa exige o fornecimento de trabalho do êmbolo para a mistura gasosa. Um processo de combustão é iniciado através de uma centelha na vela instalada na região da câmara de combustão, então com as válvulas ainda fechadas. Forma-se uma mistura de gases de alta pressão e alta temperatura no interior do cilindro. Um curso de potência ocorre em seguida ao curso de compressão, no qual a mistura gasosa se expande empurrando o cilindro ao ponto morto inferior, realizando trabalho sobre o êmbolo. Em seguida o êmbolo realiza a fase de escape, na qual os gases queimados são expelidos do cilindro através da válvula de escape, que fica aberta durante a movimentação do êmbolo do ponto morto inferior ao ponto morto superior. Quando a válvula de escape é fechada e a de admissão é aberta, inicia-se um novo ciclo completo.

Embora os motores de combustão interna executem ciclos mecânicos, o conteúdo do cilindro não executa um ciclo termodinâmico reversível, pois a matéria é introduzida com uma composição e descarregada com uma composição diferente. Por isso, um estudo detalhado do desempenho de um motor de combustão interna alternativo levaria em conta muitos aspectos, incluindo o processo de combustão que ocorre dentro do cilindro e os efeitos das irreversibilidades associadas com o atrito e com gradientes de pressão e temperatura, a transferência de calor entre os gases no cilindro e as paredes, e o trabalho necessário para carregar o cilindro e retirar os gases queimados. Devido à grande complexidade desse sistema, a modelagem precisa de motores de combustão interna necessita normalmente de simulação

computacional. Uma simplificação significativa deve ser aplicada nesse tipo de sistema com muitas idealizações para que análises termodinâmicas elementares possam ser realizadas.

Um desses processos consiste na aplicação de um modelo ideal de ciclo de ar-padrão com as seguintes hipóteses: (1) uma quantidade fixa de ar considerada como gás ideal é o fluido de trabalho; (2) a combustão é substituída por uma transferência de calor proveniente de uma fonte externa; (3) não existem processos de admissão e escape como nos motores reais; (4) todos os processos são internamente reversíveis e (5) em uma análise de ar-padrão frio, os calores específicos considerados constantes nos seus valores para temperatura ambiente.

Um parâmetro usado para descrever o desempenho de motores alternativos a êmbolo é a pressão média efetiva,  $pme$ , que corresponde à pressão teórica constante que, se atuasse no êmbolo durante o curso de potência, produziria o mesmo trabalho líquido que o realmente produzido em um ciclo, conforme a expressão (3.1).

$$pme = \frac{\text{trabalho líquido efetivo no eixo do motor para um ciclo}}{\text{volume de deslocamento do êmbolo}} \quad (3.1)$$

Para dois motores que apresentam o mesmo volume de deslocamento, o de maior  $pme$  produzirá o maior trabalho efetivo, e se ambos funcionarem à mesma velocidade, a maior potência.

Para a análise comparativa de emissões entre motores alternativos um parâmetro se faz necessário. O parâmetro lambda ( $\lambda$ ), que corresponde à razão entre a relação mássica real ar combustível e a relação ar combustível ideal teórica, conforme expresso na equação (3.2).

$$\lambda = \frac{\text{massa de ar real} / \text{massa de combustível real}}{\text{massa de ar teórica} / \text{massa de combustível teórica}} \quad (3.2)$$

Quando o parâmetro lambda tem valor um, a mistura é considerada estequiométrica, pois tem proporções reais iguais às teóricas. Para valores de lambda superiores a um, a mistura está “pobre”, com menor teor de combustível que o ideal teórico. Quando o valor de lambda é inferior a um, a mistura está “rica”, com maior teor de combustível.

Associada à variação de lambda estão os parâmetros potência desenvolvida e consumo específico para uma abertura constante da válvula de borboleta de aceleração ou a plena carga, observado na figura 3.3 para combustíveis líquidos.

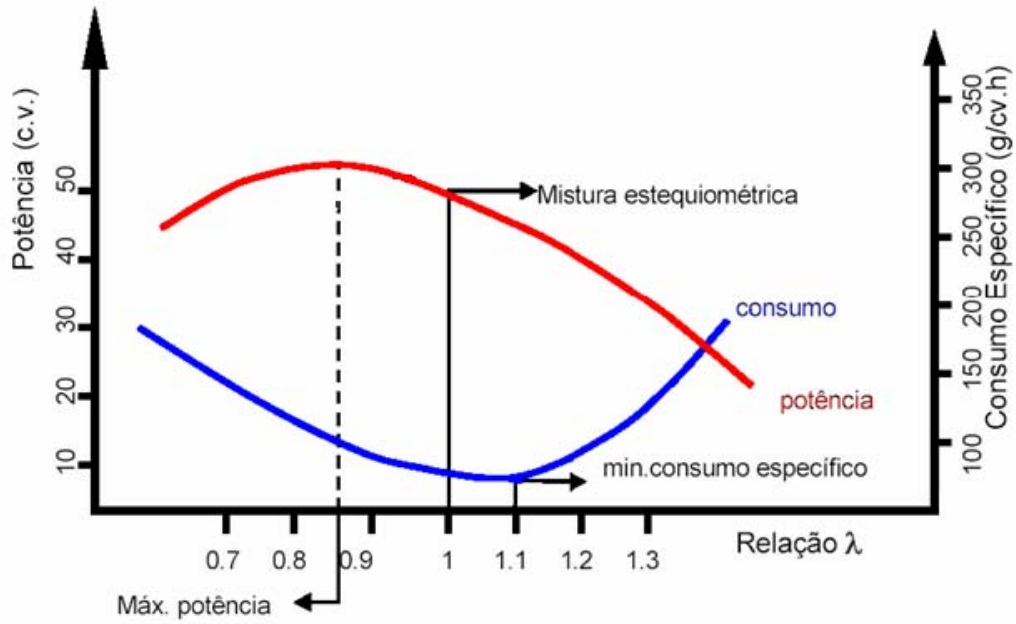


Figura 3.3 – Relação entre o parâmetro lambda e potência e consumo específico. Fonte: Penido (1991) *apud* Villanueva (2002) (adaptado).

As emissões também estão associadas ao parâmetro lambda, como apresentado na figura 3.4.

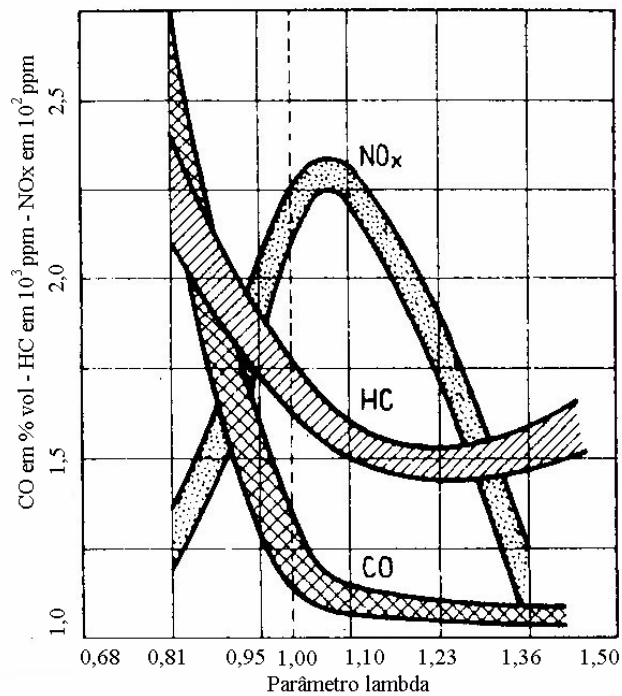


Figura 3.4 – Emissões em função de lambda. Fonte: Giacosa (1988) (adaptado).

O valor típico para a relação ar combustível é de 14,7:1 para gasolina e 16,9:1 para gás natural, segundo Giacosa (1988). Para o biogás é necessário levar em conta a proporção

mássica relativa de outros componentes inertes da mistura em relação ao metano, obtendo-se uma relação para o biogás do aterro da Extrema de 7,9:1.

### 3.2 O gerador assíncrono

A máquina assíncrona trifásica é um dispositivo de conversão de energia mecânica em elétrica que consiste, grosso modo, de uma parte fixa denominada estator e de uma parte móvel denominada rotor. No estator existem enrolamentos ou bobinados que, dispostos de maneira conveniente, formam um campo magnético girante ao redor do entreferro e um núcleo ferromagnético formado por chapas superpostas providas de ranhuras. Nelas estão alojados os lados ativos das bobinas. O núcleo ferromagnético tem a função de aumentar a permeabilidade magnética do meio facilitando a magnetização interna da máquina. O rotor também com seus circuitos elétrico e magnético apresenta enrolamentos por onde flui a corrente elétrica e um pacote de lâminas de material ferromagnético, complementando o circuito magnético do motor. Como existe um movimento relativo entre rotor e estator, é necessário que entre eles exista um espaço denominado entreferro ou *gap*.

Quanto ao enrolamento do rotor pode ser bobinado ou gaiola de esquilo. Conforme o próprio nome, o rotor bobinado possui um conjunto de bobinas semelhantes ao estator, com condutores formando bobinas cujos lados ativos estão alojados nas ranhuras do rotor. Neste tipo de motor os enrolamentos de rotor e estator são construídos de forma a concordarem quanto ao número de pólos. Este tipo de motor necessita de conexão elétrica com o rotor, o que se faz através de anéis e escovas. O rotor em gaiola de esquilo apresenta seu enrolamento constituído de barras condutoras distribuídas axialmente em seu perímetro. As extremidades das barras são unidas por anéis condutores. Neste tipo de rotor não existe a necessidade de uma conexão elétrica; as correntes que surgem em seus condutores são induzidas. O número de pólos é o mesmo do estator, pois esses são induzidos pelo campo criado pelo estator. A fixação do rotor e estator são feitas pela carcaça do motor que, portanto, tem função de fixação, além de proteção contra contaminantes e umidade.

O motor elétrico de gaiola de esquilo é o mais barato dos motores, principalmente pela simplicidade de seu rotor, que facilita a produção em escala, e pela ausência de contatos elétricos entre partes móveis. As peças sujeitas a desgaste são os rolamentos, que sustentam o eixo solidário ao rotor.

### 3.2.1 Modelo elétrico em regime permanente

A máquina assíncrona trifásica pode ser comparada a um transformador cujo enrolamento secundário é dotado de movimento. O enrolamento primário corresponde ao estator e o secundário ao rotor.

O modelo elétrico em regime permanente, por fase, para uma máquina assíncrona é representado na figura 3.5. Neste circuito,  $r_e$  e  $r_r$  representam, respectivamente, as resistências ôhmicas dos enrolamentos do estator e do rotor. A resistência  $\frac{r_r}{s}$  é a representação elétrica da carga mecânica no eixo da máquina. Enquanto,  $x_e$  e  $x_r$  representam, respectivamente, as reatâncias de dispersão dos enrolamentos do estator e do rotor. Logo,  $R_m$  e  $X_m$  compõem o ramo de excitação da máquina. Todas as grandezas são referidas ao enrolamento estatórico.

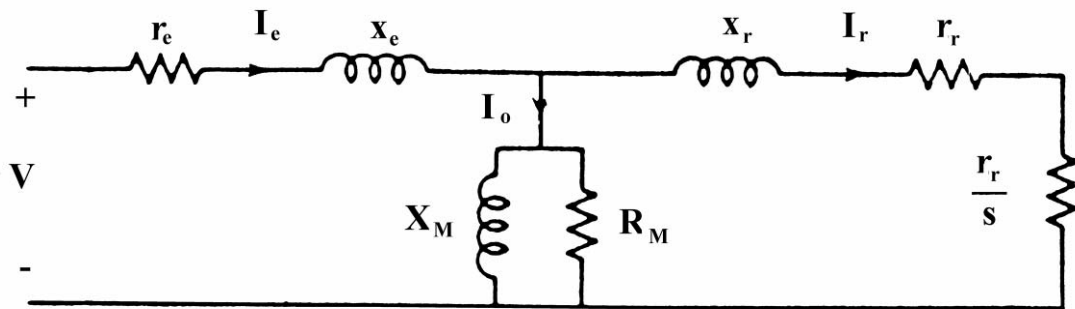


Figura 3.5 – Modelo elétrico em regime permanente, por fase, para uma máquina assíncrona trifásica. Fonte: Homrich *et al.* (1994) (adaptado).

O enrolamento do estator, quando energizado com tensões trifásicas equilibradas, estabelece um campo magnético girante ao redor do entreferro, cuja rotação é dependente do número de pólos do motor e da frequência das tensões aplicadas, conforme a expressão (3.3).

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (3.3)$$

Onde  $N_s$  em rpm (rotações por minuto) é a rotação síncrona associada,  $f$  em Hz (hertz) é a frequência, e  $p$  é o número de pólos do estator.

Para que o enrolamento do rotor seja induzido pelo campo magnético girante, é necessário que exista movimento relativo entre ambos, chamado de escorregamento, definido na equação (3.4).

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3.4)$$

Onde  $S$  representa o escorregamento, como a relação entre a diferença da rotação síncrona associada  $N_s$  e a rotação do rotor  $N_r$ , dividida pela rotação síncrona associada. Normalmente,  $S$  é expresso em percentual, como na equação (3.5).

$$S(\%) = 100(\%) \left( 1 - \frac{N_r}{N_s} \right) \quad (3.5)$$

O valor típico para motores de indução trifásicos é da ordem de 5%.

A representação gráfica do conjugado eletromagnético interno desenvolvido pelo motor em função do escorregamento é apresentada na figura 3.6. Analiticamente, o conjugado pode ser determinado pela equação (3.6).

$$T = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_T^2 \left( \frac{r_r}{s} \right)}{\left( R_1 + \left( \frac{r_r}{s} \right) \right)^2 + (X_1 + x_r)^2} \quad (3.6)$$

Onde  $T$  representa o torque, conjugado eletromagnético interno em Nm (newtons vezes metro),  $R_l$  e  $X_l$ , ambos em  $\Omega$  (ohms), são, respectivamente, a parte real e imaginária da impedância do rotor desprezando-se a resistência do estator, e  $\omega_s$  em Hz corresponde à frequência elétrica do rotor e  $V_T$  em V (volts) à tensão trifásica aplicada.

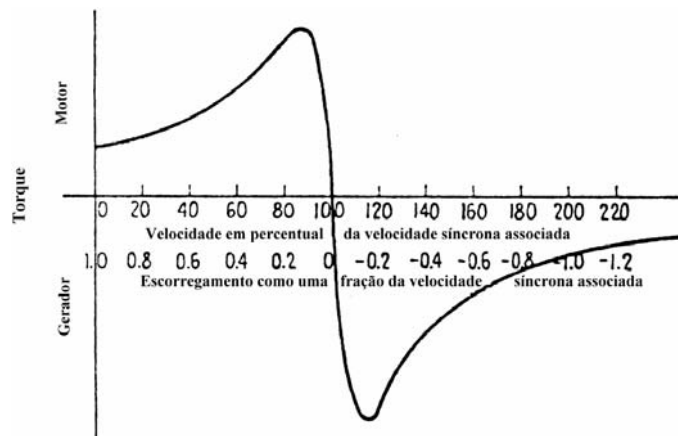


Figura 3.6 – Conjugado eletromagnético  $T$  desenvolvido pelo motor em função do escorregamento. Fonte: Homrich *et al.* (1994) (adaptado).

Na curva apresentada na figura 3.6 existem, pelo menos, duas regiões distintas a região motora ou de motor, que corresponde à situação mais comum para este tipo de máquina, onde o escorregamento se encontra na faixa  $0 < S < 1$ , e as rotações de rotor e de campos no estator podem ser assim relacionadas:  $0 < N_r < N_s$ ; e a região geradora ou de gerador, onde o escorregamento está abaixo de zero:  $S < 0$ , e a rotação do rotor é superior à rotação dos campos do estator:  $N_r > N_s$ . Esta situação só é possível se o rotor for levado à rotação superior à síncrona associada através de uma máquina motriz acoplada a seu eixo.

### 3.2.2 Geração assíncrona

É possível converter energia mecânica em elétrica em um gerador assíncrono trifásico de duas formas: através da geração assíncrona interligada e da geração assíncrona independente ou auto-excitada, como no trabalho de Levy e Liao (2000).

Os dois processos são semelhantes no que tange à necessidade de uma máquina motriz que leve o rotor acima da velocidade síncrona associada e no mesmo sentido de rotação do motor. A potência mecânica imposta pela máquina motriz no eixo do gerador assíncrono é convertida em potência elétrica de saída, descontadas as perdas no processo.

Para o funcionamento no sistema interligado é necessário conectar o gerador a uma rede elétrica trifásica já existente, que fornecerá os reativos necessários à excitação da máquina. A tensão e a frequência de operação são estabelecidas pela rede elétrica, enquanto a potência de saída é controlada através da máquina motriz. Sem a conexão à rede o sistema não converterá energia.

Para o funcionamento como gerador assíncrono independente, o gerador não precisa da conexão em uma rede elétrica trifásica já existente; no entanto, há a necessidade utilização de capacitores que fornecem os reativos necessários à excitação do gerador. Para que esse processo se inicie, é necessária a existência de magnetização residual no rotor da máquina, ou carga nos capacitores antes de serem conectados ao estator. A dificuldade nesse tipo de geração consiste no controle da frequência e da tensão de saída, uma vez que dependem da rotação, do escorregamento e das cargas vistas a partir dos terminais elétricos do gerador.

Na figura 3.7 é apresentado o esquema básico de ligação de um gerador assíncrono trifásico interligado. O gerador assíncrono auto-excitado é apresentado na figura 3.8.



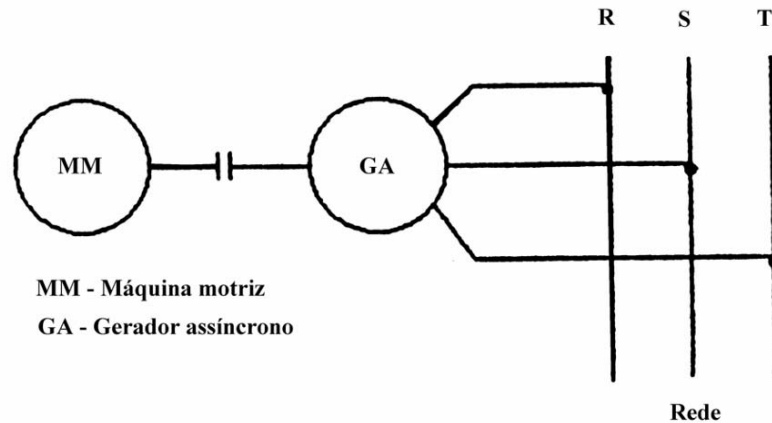


Figura 3.7 – Esquema de ligação de um gerador assíncrono trifásico interligado.

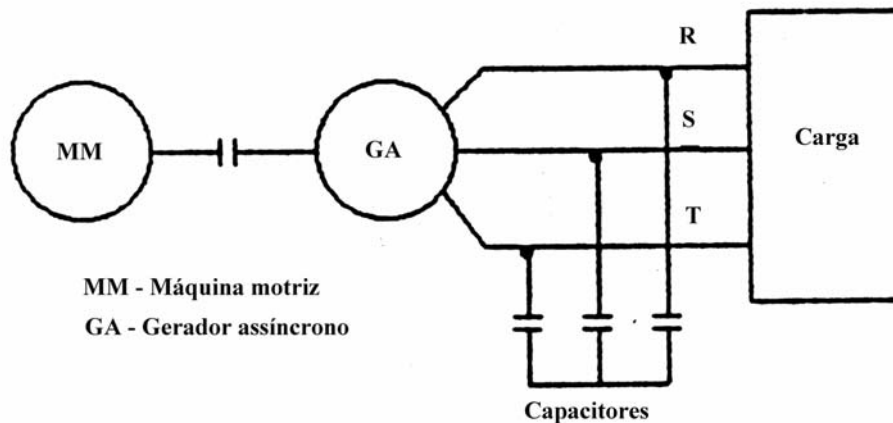


Figura 3.8 – Esquema de ligação de um gerador assíncrono trifásico auto-excitado.

### 3.3 Exergia

A energia é indestrutível e existe em toda a parte, porque é ligada à matéria em todas as suas formas. No entanto, a crise energética e a escassez de recursos naturais de energia representam uma contradição. Isso é possível, segundo Szargust *et al.* (1988), porque o termo energia possui dois significados: um cientificamente exato, relativo à indestrutibilidade da energia e outro aplicado na prática, que está ligado à possibilidade de alguns tipos de energia de alimentar máquinas e processos energéticos. Por isso existiu a necessidade da criação de um novo termo técnico para a expressão da “qualidade” da energia, sua capacidade de ser convertida em outros tipos de energia, em especial, no trabalho mecânico através dos processos tecnológicos hoje existentes. Esse termo foi apresentado por Rant (1956), a “exergia”. Outras palavras usadas com o mesmo sentido são: energia disponível, disponibilidade e essergia.

O método tradicional de avaliação das trocas de energia em um fenômeno é o chamado balanço energético e está baseado na primeira lei da termodinâmica - o princípio da conservação de energia -, que na maioria dos casos, com suficiente informação, poderá ser fechado. A informação contida no balanço energético não inclui perdas de calor inerentes aos processos técnicos envolvidos ou possíveis resgates por co-geração, portanto não fornece informações a respeito da degradação de energia que ocorre no processo, nem quantifica o calor útil contido nos vários participantes do processo como produto, resíduo e refrigerante.

A análise baseada na exergia supera as limitações da primeira lei da termodinâmica. O conceito da exergia é fundamentado na primeira e segunda lei da termodinâmica. Uma de suas aplicações é a determinação dos pontos em um processo em que a energia é degradada, o que pode levar à otimização de tecnologias ou sistemas. Portanto, acredita-se que o uso generalizado da análise exergética pode levar à redução do uso de recursos naturais e conseqüentemente da poluição.

Um dos principais objetivos da análise exergética é localizar e avaliar quantitativamente as causas das imperfeições termodinâmicas dos processos térmicos, e assim oferecer informações sobre a possibilidade de melhoria nesses processos. Na figura 3.9, podem ser observados os fluxos de energia e exergia em um sistema formado por uma caldeira, uma turbina e um gerador de energia elétrica é o conhecido diagrama de bandas. A largura das bandas representa a magnitude da exergia e energia. Em um processo termodinâmico sempre a exergia de entrada será maior que a de saída. Sendo uma parte destruída, embora outras partes possam ser perdidas, é importante diferenciar a destruição da exergia quando a saída não pode ser usada por sistema algum, com a perda exergética que corresponde à não utilização de parte do potencial exergético do sistema com seu simples descarte. A exergia destruída,  $\delta B$ , pode ser descrita como a medida da irreversibilidade de um sistema, apresentada na expressão (3.7).

$$\delta B = T_0 \cdot \sum \Delta S \quad (3.7)$$

A expressão (3.7) é chamada lei de Gouy-Stodola, onde o produto da temperatura inicial (ou do ambiente),  $T_0$ , com o somatório das variações de entropia do sistema,  $\Delta S$ , corresponde à exergia destruída no processo.

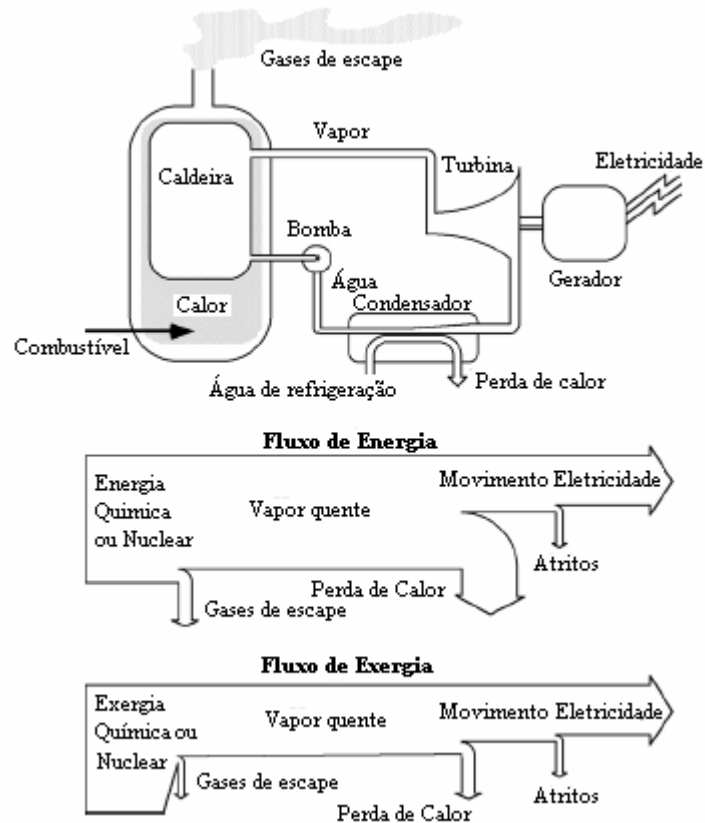


Figura 3.9 – Fluxos de energia e exergia em uma caldeira acoplada a uma turbina e um gerador de energia elétrica. Fonte: Wall e Gong 2001.

Rant (1956) definiu a exergia como a capacidade de realizar trabalho em relação ao nível zero o que foi posteriormente definido por Szargust *et al.* (1988) como:

“Exergia é a quantidade de trabalho obtido quando a matéria é levada a um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns das vizinhanças do sistema através de processos reversíveis, envolvendo somente interações com os componentes da natureza.”

Riekert (1974) também formulou uma definição sucinta de exergia:

“Exergia é o trabalho ou energia elétrica necessária para produzir um material no seu estado específico a partir de materiais comuns no meio ambiente de uma forma reversível, sendo o calor trocado somente com a temperatura ambiente  $T_0$ .”

Outro conceito interessante é a anergia,  $A$ , que corresponde à diferença entre a energia,  $E$ , e a exergia,  $B$ . Ou simplesmente a energia no nível do ambiente. Está apresentado na equação (3.9).

$$A = E - B \quad (3.9)$$

A exergia total de um sistema pode ser calculada pela expressão (3.10), excluindo-se os efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e interfaciais, como a soma de suas quatro principais

componentes: exergia potencial,  $B_p$ , exergia física,  $B_{ph}$ , exergia química,  $B_{ch}$  e exergia cinética,  $B_k$ .

$$B = B_p + B_{ph} + B_{ch} + B_k \quad (3.10)$$

A exergia cinética é igual à energia cinética quando a velocidade é considerada relativamente à superfície da Terra. A exergia potencial é igual à energia potencial, quando é avaliada com relação ao nível da superfície da Terra no local onde ocorre o fenômeno. A exergia física corresponde ao trabalho obtido ao levar-se a substância através de processos reversíveis de uma temperatura,  $T$ , e pressão,  $P$ , para o estado inicial do ambiente à temperatura  $T_0$ , e pressão  $P_0$ . A exergia química corresponde ao trabalho termodinâmico que pode ser obtido a partir da energia química contida nas diversas substâncias.

A relação entre a energia em algumas formas comuns e a respectiva exergia é representado pelo fator exergético na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - O fator exergético de algumas formas de energia comuns. Fonte: Wall (2006).

Forma de energia	Fator Exergético
Energia mecânica	1.0
Energia elétrica	1.0
Energia química	Aproximadamente 1.0
Energia nuclear	Aproximadamente 0.95
Luz solar	0.93
Vapor quente (600 °C)	0.6
Região aquecida (90 °C)	0.2-0.3*
Sala aquecida (20 °C)	0-0.2*
Radiação térmica de Terra	0

\* que dependem fortemente da temperatura ao ar livre.

A exergia química das substâncias está relacionada à concentração dessas substâncias em misturas. A exergia é maior no aço puro que em suas formas de minério natural. Isso pode ser explicado; para que o aço seja retirado do minério é necessário exergia. A tabela 3.2 apresenta o fator exergético de algumas substâncias em relação à concentração de seus elementos.

Tabela 3.2 - Qualidade das substâncias de diferentes materiais. Fonte: Wall (2006).

Forma do material	Fator exerético
Em uma forma ordenada <sup>1</sup>	1,0
Em bens comerciáveis <sup>2</sup>	Quase 1,0
Depósitos ricos em minerais <sup>3</sup>	Aproximadamente 0,5
Depósitos pobres em minerais <sup>4</sup>	Quase 0,0
Minerais dissolvidos na água do mar ou solo	Aproximadamente 0,0

<sup>1</sup> por exemplo: carbono na forma de diamante ou um organismo vivo

<sup>2</sup> por exemplo: ferro, ouro, dianteira, aço, ligas ou plásticos

<sup>3</sup> por exemplo: minério de ferro (limonita)

<sup>4</sup> por exemplo: bauxita

### 3.3.1 Análise exerética

A análise exerética vem sendo utilizada largamente para determinar a sustentabilidade de diversos empreendimentos, entre eles as centrais de tratamento de esgoto, o que aparece nos trabalhos de Herllström (1997) e Mora e Oliveira Jr. (2004).

Para que seja possível abordar o termo sustentabilidade, é importante citar as cinco esferas inter-relacionadas do planeta: biosfera, atmosfera, litosfera, hidrosfera e sociosfera, representadas na figura 3.10. A atmosfera corresponde à cobertura gasosa do planeta no seu sentido amplo; a litosfera corresponde à crosta terrestre; a hidrosfera ao ambiente aquático; a biosfera corresponde aos seres vivos em geral, excluindo o ser humano moderno, cujo ambiente corresponde à sociosfera, junto com todos os sistemas criados pela humanidade. Convém lembrar, segundo Wall (2006), que esta separação da Terra em cinco esferas é um modelo, e a distinção entre as esferas nem sempre está clara. Também é importante lembrar que, neste caso, o todo é maior que a soma de suas partes. O modelo não é exato, mas um guia para melhor entender alguns processos globais.

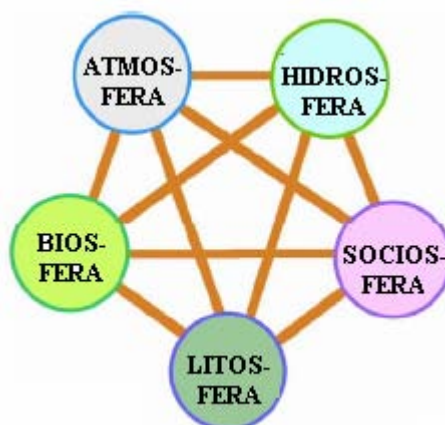


Figura 3.10 – As cinco esferas da Terra em mútua interação. Fonte: Wall (2006).

Outros autores propuseram a quantificação do impacto ambiental nos processos de conversão de energia através do conceito de exergia como Rosen e Dincer (1997), Gong (1999) e Wall e Gong (2001).

Ao contrário do fluxo energético através do planeta que tem caráter conservativo, o fluxo exergético é dissipado em grande parte, conforme o esquema da figura 3.11, onde é representado o fluxo energético entre o sol, a Terra e o espaço.

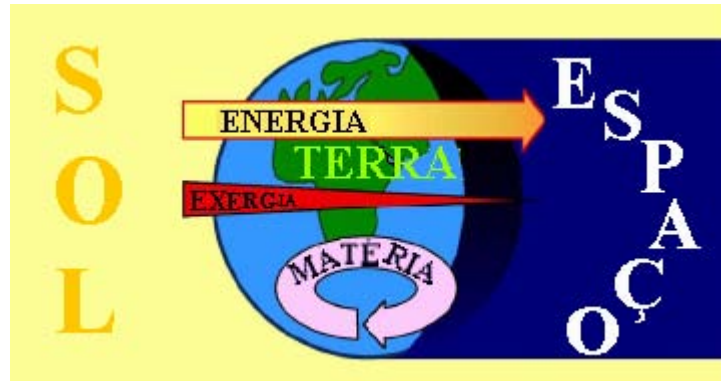


Figura 3.11 – O sistema Sol, Terra e Espaço. Fonte: Wall e Gong (2001).

O fluxo de energia na terra é detalhado na figura 3.12, onde os valores estão expressos em percentual da energia que chega do sol, que é da ordem de  $1,7 \times 10^{17}$  W. Foram feitas aproximações e estimativas devido à complexidade e à extensão do sistema terrestre.

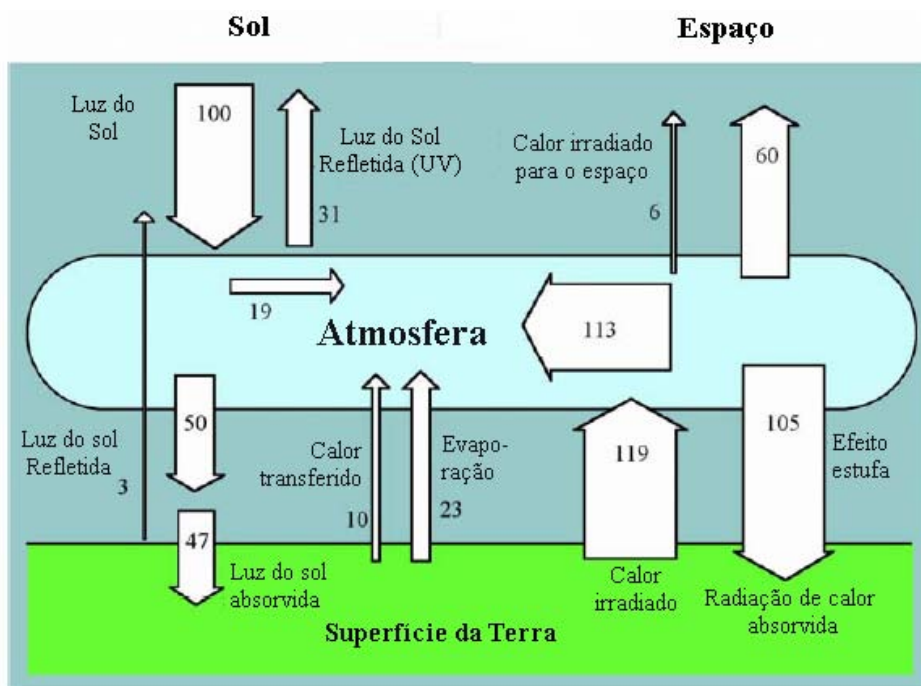


Figura 3.12 – O fluxo de energia entre o sol, a atmosfera, a superfície da Terra e o espaço. Os números estão em percentual de energia solar recebida. Fonte: Wall (2006).

O fluxo exergético detalhado na Terra pode ser observado na figura 3.13, onde os valores estão representados em  $1,2 \times 10^{13} \text{ W}$  que correspondem à exergia consumida na biosfera. A exergia recebida pela Terra a partir do sol corresponde a 93% da energia recebida, conforme a tabela 3.1, e é da ordem de  $1,6 \times 10^{17} \text{ W}$ . Todos os valores correspondem às estimativas em ordem de grandeza, uma vez que a interação entre todos os sistemas é praticamente impossível de ser determinada.

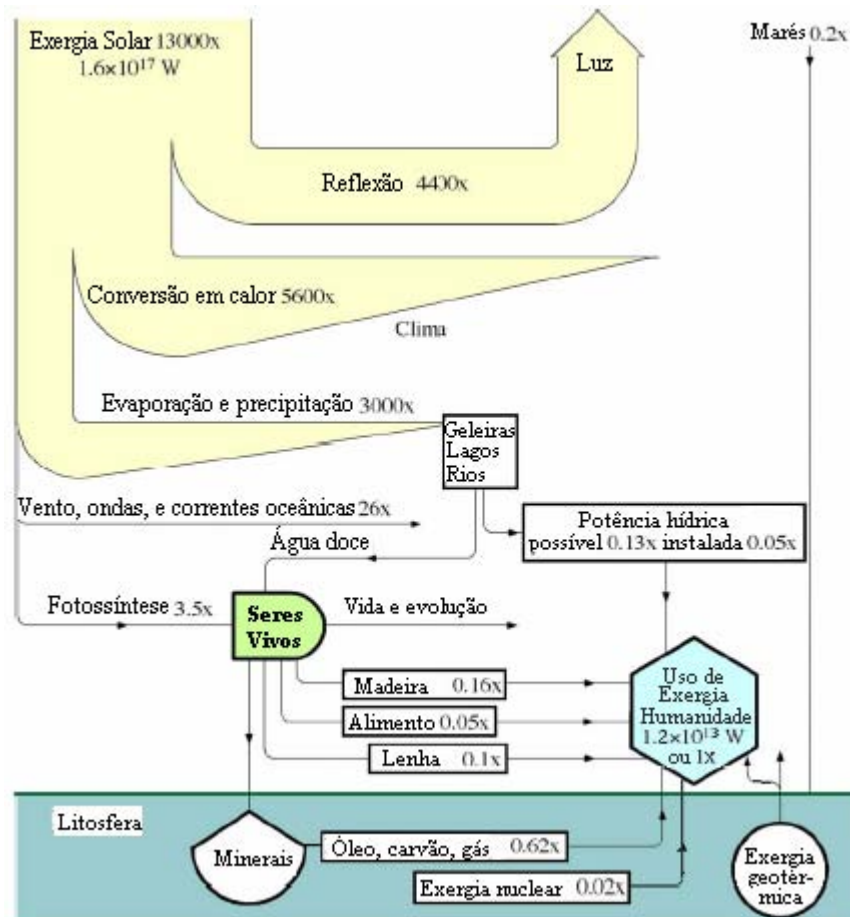


Figura 3.13 – O fluxo exergético global na Terra.  $1x$  corresponde a  $1,2 \times 10^{13} \text{ W}$ . Fonte: Wall e Gong (2001).

A exergia pode ser definida como um registro de desenvolvimento sustentável que enfatiza a conexão entre os serviços ou produtos gerados e os recursos utilizados e o rejeito dos processos. Conforme a figura 3.14, que poderia representar, por exemplo, a utilização de combustíveis fósseis.

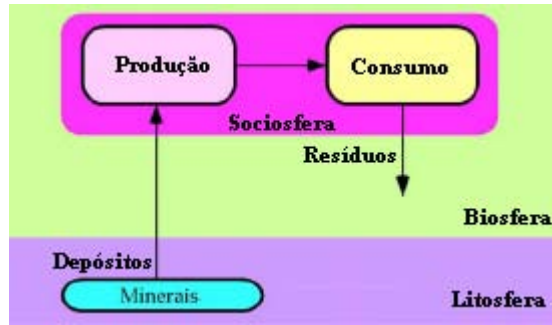


Figura 3.14 – A sociedade retira mineral da litosfera e retorna para a biosfera na forma de resíduos. Fonte Wall e Gong (2001)

A exergia pode ser utilizada como indicador ecológico, uma vez que a alta eficiência exérgica significa menos perdas exérgicas para o ambiente ou menor dano ambiental. Assim, o termo “eficiência exérgica”,  $\eta_B$ , é proposto como um índice de desempenho ambiental que inclui os aspectos de eficiência energética e impacto ambiental, e pode ser descrito pela expressão (3.8).

$$\eta_B = \frac{\text{Efeito útil da exergia}}{\text{Exergia de entrada}} \quad (3.8)$$

Neste trabalho serão utilizados dois índices de análise exérgica, a eficiência exérgica ambiental,  $\eta_{ex,amb}$ , e a razão de poluição total,  $R_{pol}$ , propostas por Makarytchev (1997) e Mora e Oliveira Jr. (2004), adaptadas para análise do aterro específico. Quanto maior a eficiência exérgica ambiental e menor a razão de poluição total, mais sustentável será o empreendimento.

A eficiência exérgica ambiental, apresentada na equação (3.11), é a razão entre a exergia de saída, exergia útil produzida no processo,  $B_{prod}$ , e a exergia de entrada, que corresponde à soma da exergia dos recursos naturais e humanos utilizados,  $B_{rec.nat.}$ , com a exergia de preparação dos recursos naturais,  $B_{prep}$ , com a exergia de desativação dos resíduos,  $B_{des}$ , e com a exergia de manuseio e disposição dos resíduos,  $B_{disp}$ .

$$\eta_{ex,amb} = \frac{B_{prod}}{B_{rec.nat} + B_{prep} + B_{des} + B_{disp}} \quad (3.11)$$

Estes fluxos exérgicos são apresentados esquematicamente na figura 3.15, onde estão indicadas as exergias envolvidas no processo e seus pontos de entrada ou saída.



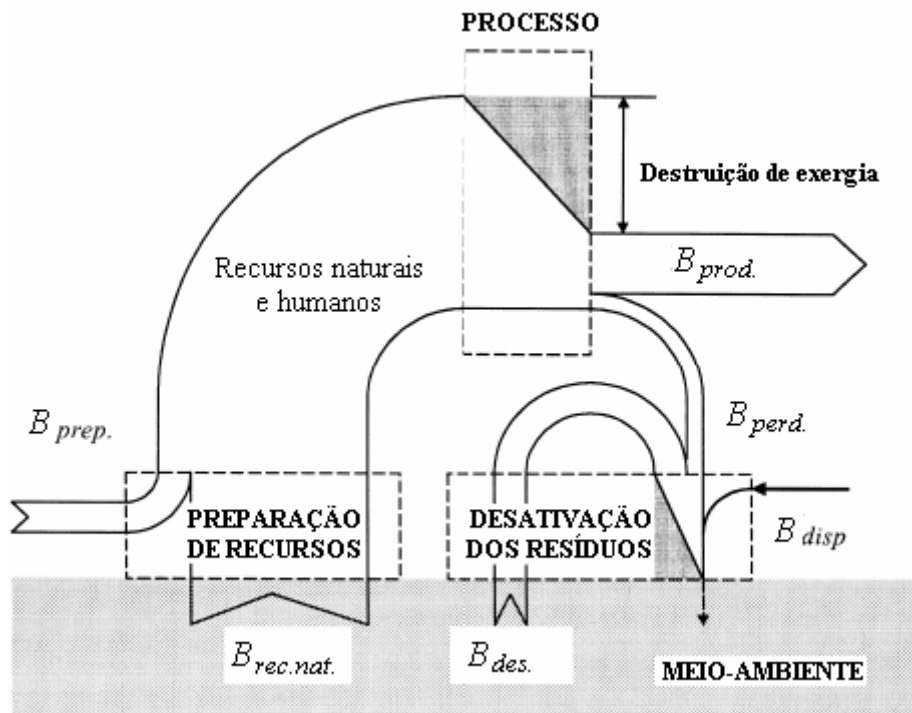


Figura 3.15 – Os fluxos de exergia em um processo genérico. Fonte: Makarytchev(1997).

A razão de poluição total, na expressão (3.12), é determinada como sendo a razão entre a exergia de entrada, que corresponde à soma da exergia perdida no processo,  $B_{perd}$ , com a exergia de desativação dos resíduos e a exergia de saída representada pela exergia útil produzida no processo.

$$R_{pol} = \frac{B_{perd} + B_{des}}{B_{prod}} \quad (3.12)$$

### 3.4 Estimativas energéticas

Existe a possibilidade da determinação de um balanço energético do sistema e a conseqüente avaliação do seu rendimento energético de forma aproximada.

Partindo do consumo de combustíveis ao longo do tempo em regimes de carga constante e a vazio e conhecendo o poder calorífico dos combustíveis, apresentados na tabela 2.2 e tabela 2.3, pode-se determinar a quantidade de energia na entrada do sistema, utilizando a expressão (3.13).

$$E_E = M_C \cdot P_C \quad (3.13)$$

Onde  $E_E$ , em kJ corresponde à energia de entrada,  $M_C$  representa o massa de combustível utilizado, em kg e  $P_C$ , em kJ/kg é o valor do poder calorífico do combustível utilizado.

Para determinar a energia de saída parte-se da determinação da potência dissipada na carga resistiva com a expressão (3.14).

$$E_S = 3 \cdot V \cdot I \cdot t \quad (3.14)$$

Onde  $E_S$ , em kJ, corresponde à energia de saída,  $V$ , em V, representa a tensão de cada fase, consideradas iguais,  $I$ , em A (ampères), equivale à corrente em cada fase, também supostas iguais, e  $t$ , em s (segundos), é o tempo que o sistema ficou em operação. A energia elétrica de saída também pode ser medida diretamente com o medidor orçazonal de grandezas.

Conhecendo a energia de entrada e a de saída é possível então determinar o rendimento do sistema, com a equação (3.15).

$$\eta = \frac{E_S}{E_E} \quad (3.15)$$

Onde  $\eta$  corresponde ao rendimento total do sistema.

É possível também dimensionar as perdas energéticas com a expressão (3.16).

$$E_P = E_E - E_S \quad (3.16)$$

Na expressão (3.16),  $E_P$ , em kJ, corresponde à energia perdida no sistema. Estas perdas estão relacionadas, principalmente, ao motor de combustão interna, onde boa parte da energia é transformada em calor e dissipada no ambiente, seja pela combustão direta ou por atritos ou trabalhos resistivos dos seus mecanismos. Além disto, existem também perdas no gerador assíncrono, por aquecimento, atrito e pela necessidade de polarização do mesmo. O rendimento do gerador assíncrono se comporta de maneira análoga ao motor assíncrono, onde o maior rendimento se encontra próximo ao valor nominal de operação do motor. Isso pode ser visualizado na figura 3.16, que representa a relação entre o rendimento de um motor assíncrono e o percentual de potência de saída em relação à potência nominal.

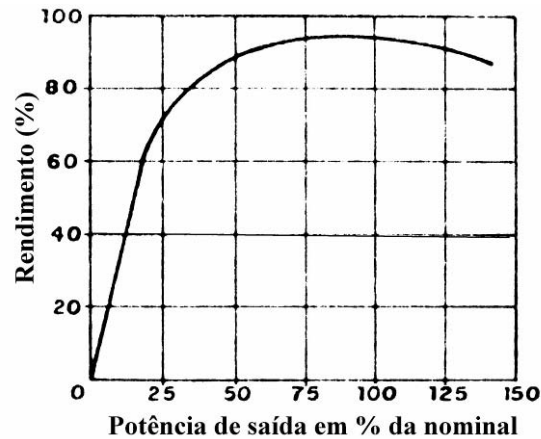


Figura 3.16 – Relação entre o rendimento e o percentual de potência de saída do motor assíncrono. Fonte: Falcone (1995).

É possível estimar estas perdas analisando também o consumo de combustíveis quando o sistema opera a vazio. Nesse caso não existe energia de saída, portanto, toda a energia de entrada está sendo consumida para levar o motor de combustão interna à rotação de trabalho e à polarização do gerador. Assim, neste caso particular, ter-se-ia a equação (3.17).

$$E_P = E_E = E_V \quad (3.17)$$

Onde  $E_V$ , em kJ, corresponde à energia de funcionamento a vazio.

Portanto, as perdas serão máximas se o sistema operar com a capacidade de geração muito menor do que a potência nominal do motor de combustão interna. Por outro lado, quanto mais abaixo do valor nominal de potência o motor trabalhar, certamente maior será sua vida útil.

A relação entre consumo e potência pode ser melhor expressa como consumo específico que corresponde à quantidade de combustível por trabalho líquido gerado, que torna mais vantajoso quanto mais próximo dos valores de potência nominal do motor de combustão interna. Embora o consumo total cresça com o incremento da potência, o consumo específico decresce, variando de maneira pouco significativa com a rotação. Na figura 3.17, pode-se visualizar um plano cotado, obtido experimentalmente em Giacosa (1988), onde estão representadas as curvas de mesmo consumo específico em relação a *p.m.e.* e a rotação de um motor de ciclo de ar padrão Otto de 1900 cm<sup>3</sup>. Na mesma figura, as curvas pontilhadas representam as linhas de mesma potência.

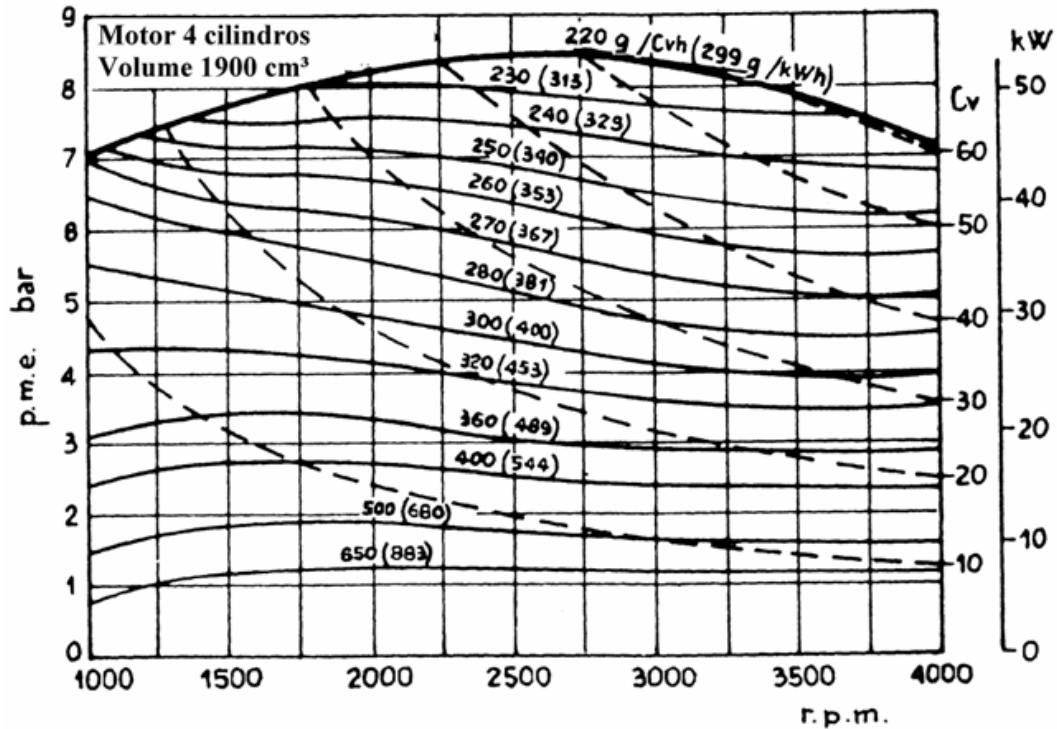


Figura 3.17 – Plano cotado da relação entre *p.m.e.*, rotação e as diversas curvas de mesmo consumo específico. Fonte: Giacosa (1998).

### 3.5 Estimativas econômicas

Os custos de geração do kWh do sistema podem ser calculados estimativamente pela equação (3.18), que contempla os custos de implantação e operação com relação à potência média gerada e a vida útil do sistema.

$$P = \frac{I_p + C_o \cdot L_t}{W \cdot L_t} \quad (3.18)$$

Onde,  $P$  em US\$ (dólares americanos), corresponde ao valor do kWh,  $I_p$ , em US\$, representa o investimento de implantação,  $C_o$ , em US\$/h (dólares americanos por hora), equivale ao custo operacional por hora de funcionamento,  $L_t$ , em h (horas), consiste no tempo de vida útil do sistema sem reposição de componentes fundamentais, e  $W$ , em kW (quilowatts), é a potência média gerada.

A equação (3.19) representa o custo operacional.

$$C_o = \frac{P_L \cdot N_L \cdot L_T}{C_T} + \frac{\sum M_E}{L_t} \quad (3.19)$$

O custo operacional,  $C_o$ , é representado pelo produto do custo do óleo lubrificante consumido,  $P_L$ , em US\$/ℓ (dólares americanos por litro), pela quantidade de óleo por troca,  $N_L$ , em ℓ (litros), por troca em cada ciclo de troca de óleo,  $C_T$ , em h, somados aos custos de manutenções eventuais,  $M_E$ , em US\$, que venham a ocorrer ao longo da vida útil do motor,  $L_t$ .

Para a estimativa do custo de implantação do MW (megawatt) instalado, deve-se usar a expressão (3.20).

$$I_{PMW} = \frac{I_P \cdot 1000}{W} \quad (3.20)$$

Onde  $I_{PMW}$ , em US\$, corresponde ao custo de implantação do MW.

Para a estimativa do custo de geração do MWh (megawatt hora) neste tipo de empreendimento, é necessário aplicar a expressão (3.21).

$$P_{MWh} = P \cdot 1000 \quad (3.21)$$

Onde  $P_{MWh}$ , em US\$, corresponde ao custo do MWh gerado. Convém salientar que neste valor está embutido a amortização do custo de implantação, e o sistema em questão não foi idealizado para operar nessa escala.

Para calcular a possibilidade receita a partir da venda dos créditos de carbono resultantes da queima do metano, é necessário considerar que cada tonelada de metano destruída corresponde a vinte e uma toneladas de dióxido de carbono a menos na atmosfera. Porém a simples queima do metano produz, entre outros, dióxido de carbono, a uma taxa de 2,75 toneladas para cada tonelada de metano queimado. A expressão (3.22) deve ser utilizada.

$$V_t = 18,25 \cdot T_{mq} \cdot C_C \quad (3.22)$$

Onde  $V_t$ , em US\$, equivale ao valor total dos créditos a serem vendidos ao longo da vida útil do empreendimento,  $T_{mq}$ , em t, corresponde ao total de metano que será queimado e  $C_C$ , em US\$, corresponde ao valor unitário do crédito de carbono.

## 4 METODOLOGIA

O protótipo desenvolvido utilizou um motor Otto 4 cilindros, um sistema polias e correia para acoplamento de um motor assíncrono usado como gerador de energia elétrica e um servomecanismo para o controle da tensão de saída. Além de um sistema elementar de depuração do biogás e retenção de condensados. O sistema instalado no aterro sanitário da Extrema pode ser visualizado na figura 4.1.



Figura 4.1 – O protótipo.

O trabalho foi desenvolvido no próprio aterro, com todas as medições e testes ocorrendo em um laboratório ao ar livre apresentado na figura 4.2, em uma visão noturna, onde a iluminação era provida por um sistema de lâmpadas incandescentes alimentadas pelo sistema de geração de energia elétrica em estudo.



Figura 4.2 – Cenário dos testes, em visão noturna.

#### 4.1 A captação do biogás

Atualmente, o biogás proveniente do aterro é queimado diretamente, sem nenhum aproveitamento energético. Na figura 4.3, é apresentada a disposição da tubulação de saída de biogás e o duto utilizado para coleta.



Figura 4.3 – Ponto de captação e pontos de saída de gás no aterro sanitário da Extrema.

A captação do biogás é feita diretamente de uma tubulação que provém de um único duto de captação apresentada na figura 4.3, onde existe uma pressão positiva em relação à pressão atmosférica.

O biogás passa então por uma tubulação de 28mm de diâmetro, com 1,8mm de parede, de PEBD (polietileno de baixa densidade), por uma distância de 85 metros até o sistema de filtragem. A tubulação de PEBD foi escolhida por ser robusta, barata (feita a partir de reciclados), possuir proteção contra os raios ultravioletas, não ressecando, e por não sofrer qualquer tipo de degradação significativa pela passagem de biogás ou por acúmulo de condensados.

#### 4.2 O sistema de depuração

O sistema de depuração adotado consiste de um filtro com reservatório de líquidos condensados.

O biogás entra no sistema de filtragem por uma tubulação de 32mm de PVC (policloreto de vinila) até o fundo de um recipiente vedado ao ar atmosférico, onde é forçado a ascender através de limalhas de aço até os dois tubos de saída, de 20mm, também de PVC. Estes tubos convergem para um único tubo, de onde vai diretamente para o motor, este sistema é

apresentado na figura 4.4, junto com um esquema para melhor visualização do processo. Este sistema é semelhante ao sistema utilizado por Escobedo *et al.* (2005), mas em escala reduzida. Outros sistemas de depuração são apresentados em Park *et al.* (2005) e Popov (2005).

Espera-se que parte dos compostos de enxofre reajam com o aço, além de uma quantidade significativa da umidade condensada do biogás que fica retida no filtro, como pode ser observado na mesma figura à direita. A maioria da matéria particulada fina está embutida nas gotículas de umidade no gás. Portanto, a remoção de umidade serve o objetivo duplo de também remover a matéria particulada, conforme Terraza *et al.* (2003). Optou-se por um recipiente transparente, apesar do tamanho reduzido para facilitar a visualização do líquido retido.

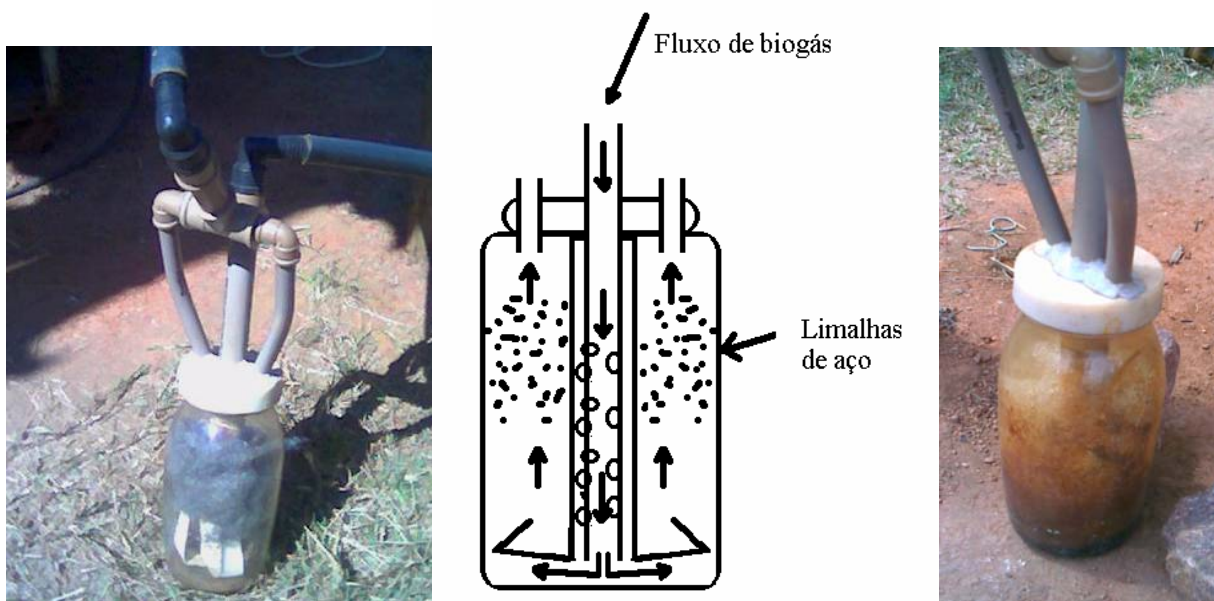


Figura 4.4 – Filtro para o biogás com reservatório para retenção de líquidos, esquema de operação e em uso.

### 4.3 O motor

Nesse sistema foi utilizado um motor Otto de 4 cilindros marca GM (General Motors) fabricado na década de 80, carburado, refrigerado a água, com características nominais apresentadas na tabela 4.1, para o funcionamento a gasolina. Este motor foi escolhido por ser de baixo custo, poder se adequar a ilustrar a possibilidade de uso de qualquer motor à disposição para construção de um sistema semelhante. Existem alguns estudos para utilização de micro-turbinas nos sistemas em pequena escala, como em Wiltsee e Emerson (2004), Cohen (1999), Goldstein (2002) e Pecora (2006).

Tabela 4.1 – Características do motor GM utilizado no protótipo.



Características	Motor GM
Número de cilindros	4
Volume total das câmaras de combustão (cm <sup>3</sup> )	2500
Potência nominal (cv )	90 <sup>(1)</sup>
Torque nominal (kgf.m)	18,0 <sup>(2)</sup>
Taxa de compressão	7,5 : 1

<sup>(1)</sup>(a 4500 rpm, para gasolina). <sup>(2)</sup>(a 2500 rpm, para gasolina)

O motor para operação com biogás sofreu pequenas adaptações, mas sua estrutura basicamente não mudou. Foi feita uma entrada direta de gás no sistema purificador de ar e um controle na entrada de ar do motor para que o mesmo pudesse aspirar o biogás de sua fonte, o que é apresentado na tabela 4.1. Foi instalado um ventilador adicional junto ao seu radiador. Pequenos ajustes de ponto e abertura de eletrodos das velas foram necessários.

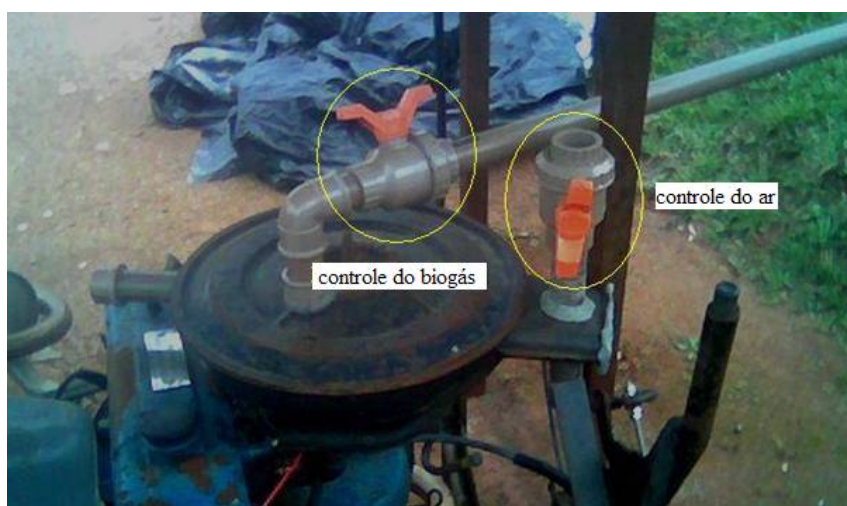


Figura 4.5 – Entrada de gases no motor.

O motor é acionado, inicialmente, com gasolina como combustível. Após entrar em regime estável de funcionamento, a gasolina é cortada, e o motor então passa a operar com a reserva de combustível do carburador. Assim, a válvula de entrada de biogás é aberta lentamente, até que o motor funcione exclusivamente com biogás.

Antes do início do experimento, foi realizada uma verificação no estado de conservação do motor, que se encontrava praticamente sem alterações, ainda com marcas de brunimento originais e ovalização irrelevante nos cilindros.

#### 4.4 O acoplamento

O sistema de tração e geração foi acoplado através de correias, que permitem ao motor a combustão certo grau de liberdade de oscilação, uma vez que está montado sobre um chassi metálico e apoiado sobre mancais de borracha. Já o gerador está fixado diretamente no chassi. O sistema de acoplamento pode ser visto na figura 4.6. As polias foram fixadas diretamente ao volante do motor de combustão interna e ao eixo do motor assíncrono. A relação entre polias é de 1,86.



Figura 4.6 – O sistema de acoplamento.

#### 4.5 O gerador

Um importante fator de redução de custos foi o gerador adotado. Trata-se de um motor assíncrono de baixo custo de aquisição e manutenção. O motor assíncrono é o tipo de motor mais intensamente utilizado na indústria, por sua robustez e simplicidade construtiva.

Para ser utilizado como gerador, é necessário polarizar corretamente as bobinas do estator com o uso de capacitores com alguma carga inicial. Para que estes forneçam os reativos que permitam a operação como gerador. A tensão de saída, segundo Homrich *et al.* (1994), pode ser regulada eficientemente pela variação de rotação do gerador. Esse processo é detalhado no capítulo de fundamentos teóricos.

O gerador foi polarizado conforme a figura 4.7. Quando o rotor atinge uma rotação acima de 3600 rpm, as chaves S1, S2 e S3 são acionadas simultaneamente energizando os campos do motor assíncrono através dos capacitores C1, C2 e C3, em uma configuração estrela. A partir daí o gerador é auto-excitado; parte da energia gerada é utilizada para a polarização de

seus enrolamentos. No entanto, segundo Homrich *et al.* (1994), o motor assíncrono é capaz de gerar uma potência muito próxima do seu valor nominal.

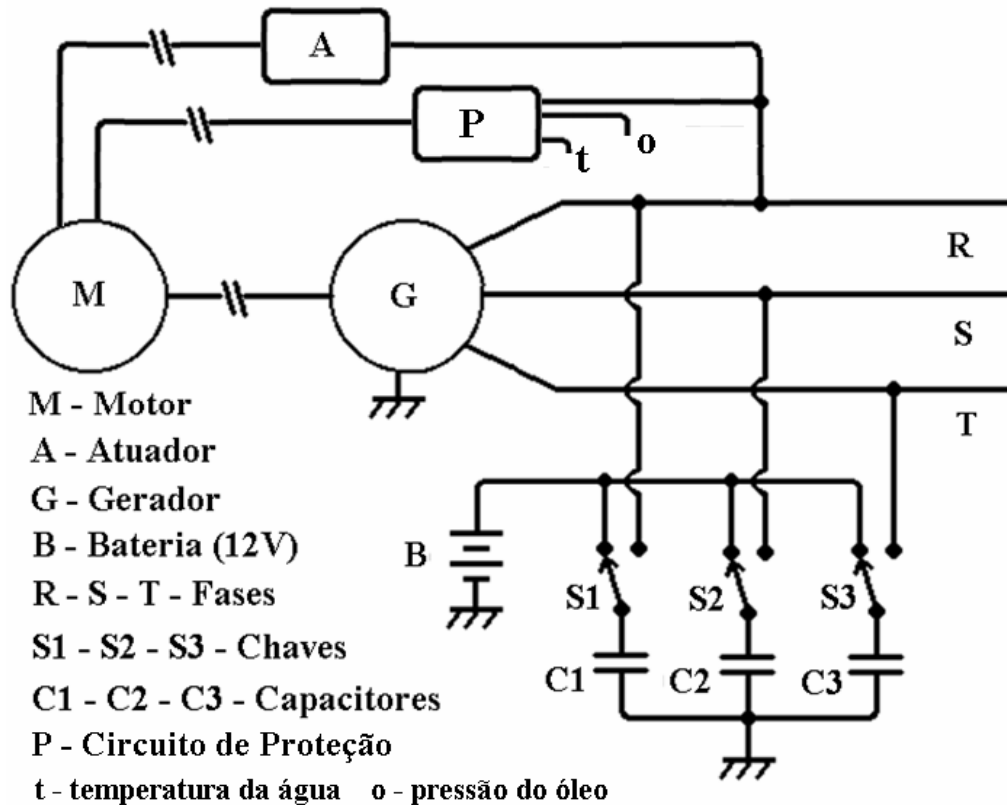


Figura 4.7 – Diagrama esquemático da conexão e polarização do sistema gerador.

O motor assíncrono utilizado no experimento fazia parte de uma fresa construída na década de 50 de procedência alemã, que foi desmontada devido a um alagamento, onde ficou submersa por alguns dias. Cinco anos após o ocorrido, o motor sofreu uma revitalização, que corresponde à lubrificação de rolamentos, desumidificação, reparo de um bobinado aberto, um banho de verniz em seus enrolamentos e a remoção de algumas crostas de ferrugem. Atualmente o motor encontra-se em bom estado de funcionamento tendo gerado energia elétrica por 295 horas descontínuas durante os ensaios. Tal qual o motor a combustão interna, este motor assíncrono presta-se à ilustração da possibilidade de repetir esse experimento com qualquer outro disponível.

As características de placa do motor assíncrono utilizado no protótipo são indicadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características nominais do motor elétrico assíncrono.

Motor Assíncrono	Características
Potência (kW)	6,6
Tensão por fase (V)	220
Frequência (Hz)	60
$\cos \varphi$	0.87
Número de Pólos	2
Rotação (rpm)	3480

O motor assíncrono utilizado pode ser visto desmontado na figura 4.8. São vistos respectivamente estator, rotor e o conjunto parcialmente integrado.



Figura 4.8 – Estator, rotor e motor assíncrono parcialmente integrado.

Outro fator importante na geração assíncrona auto-excitada são os capacitores utilizados, que são responsáveis pelos reativos necessários à polarização do estator do motor. A carga inicial destes é fornecida pela própria bateria responsável pela partida do motor de combustão interna.

As características dos capacitores utilizados na polarização do gerador assíncrono são descritas na tabela 4.3. Os capacitores foram associados em série, formando um banco de até 50 $\mu$ F por fase.

Tabela 4.3 – Características dos capacitores utilizados.

Capacitor	Características	Características
Marca	Lorenzetti	Lorenzetti
Tipo	Bipolar	Bipolar
Capacidade ( $\mu$ F)	40 $\pm$ 2	10 $\pm$ 2
Tensão de isolamento (V)	380 $\pm$ 16	380 $\pm$ 16
Frequência de operação (Hz)	60 $\pm$ 10	60 $\pm$ 10
Faixa de temperatura de operação (K)	248 até 358	248 até 358

#### 4.6 O sistema de controle de tensão e o de proteção

O sistema gerador conta com uma válvula de entrada de ar controlada pela tensão de saída do sistema, o que permite uma estabilidade adicional na geração de energia elétrica. No diagrama esquemático na figura 4.7 corresponde ao atuador A.

O dispositivo é semi-automático de controle de baixo custo, Seus componentes, bem como diagrama esquemático e descrição sucinta do funcionamento de cada etapa estão no ANEXO I.

Consiste de um circuito eletrônico comparador que monitora a tensão de saída da fase R, acoplado a um servomecanismo que controla a abertura da entrada de ar no motor, aspirando mais ou menos gás do aterro conforme a tensão de saída. O dispositivo pode ser visualizado na figura 4.9. O microprocessamento foi utilizado para simplificar o processo de determinação do valor ideal de tempo de acionamento para a válvula de entrada de ar, uma vez que o motor não responde instantaneamente às variações realizadas. Por isso é importante definir a histerese desse processo.



Figura 4.9 – A válvula de entrada de ar semi-automática.

O dispositivo foi idealizado para entrar em operação depois que o sistema gerador já estiver em operação, mantendo a tensão de saída entre 201V e 229V.

Mesmo sem o dispositivo de controle o sistema gera energia elétrica com boa estabilidade para cargas fixas. O dispositivo foi implementado visando à variação de cargas.

Junto com o sistema de controle foi instalado um sistema de proteção também de baixo custo, atuando sobre a corrente fornecida ao sistema de ignição. Sempre que havia um surto de tensão eficaz na fase R, a corrente de ignição era cortada até que a situação voltasse ao

normal ou o motor a combustão fosse desligado por medida de segurança. O sistema de proteção também desligaria o motor se a tensão de saída diminuísse a menos de 70V e se os sensores de temperatura e pressão do óleo acusassem problemas. Este sistema tem seu diagrama esquemático, bem como descrição sucinta, apresentados no ANEXO I.

## 5 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA E MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Para a obtenção de resultados foi utilizada a aquisição digital de dados através da placa Marca Modelo PCI-DAS08, de 12 bits, com faixa de variação entre -5 e 5V, apresentada na figura 5.1.

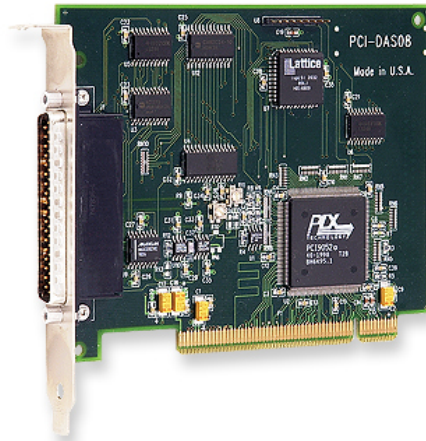


Figura 5.1 – Placa PCI-DAS08.

Também foi utilizado um medidor orçazonal de grandezas, cedido pela CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica), figura 5.2. O equipamento é calibrado e aferido por certificadores registrados no INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), com classe de erro menor que 1%. Foi utilizado para calibração dos equipamentos de aquisição de dados, validação de resultados e obtenção de diversas grandezas pertinentes à qualidade e à quantidade de energia elétrica gerada no experimento de maneira direta.



Figura 5.2 - Medidor orçazonal de grandezas.

As medições de rotações foram feitas através de um sensor indutivo colocado na polia do gerador elétrico, onde a medição é direta com o uso de um multímetro Minipa MA-108,

cuja resolução é de 20 rpm. Neste caso, a precisão é de  $\pm (1,5\% \text{ Leitura} + 5 \text{ rpm})$ . A rotação da polia do motor alternativo foi determinada dividindo-se a rotação da polia do gerador pela constante de relação entre polias de 1,86, e eletronicamente através de uma das portas digitais da placa PCI-DAS08.

A temperatura do líquido de arrefecimento do motor foi determinada a partir da curva resistiva do sensor original do motor à combustão interna. Determinada com o uso de óleo em resfriamento e um pirômetro ótico marca Raynger<sup>®</sup>, modelo *ST30 Pro Enhanced*, com precisão de  $\pm 1\%$  da leitura ou  $\pm 1^\circ\text{C}$  (o que for maior), equipamento utilizado para todas as medições de temperatura, excluindo-se a do próprio líquido de arrefecimento. A resistência foi medida com o uso do multímetro analógico Minipa MA-108, com resolução de 100 m $\Omega$  e precisão de  $\pm (1\% \text{ Leitura} + 4 \text{ Díg.})$ . A faixa de temperaturas que interessa nesse trabalho vai de 80°C a 110°C, que correspondem aproximadamente às temperaturas do líquido de arrefecimento em condições normais de trabalho do motor.

As tensões e as correntes das fases R, S e T foram medidas com o uso das portas analógicas da placa PCI-DAS08, sendo o nível de tensão eficaz da rede condicionado para que suas variações ficassem entre 0 e 5V. E concomitantemente foi feita a medição com o medidor orçazonal de grandezas modelo ELO 2313D.

A potência dissipada foi calculada a partir dos valores de corrente e tensão levantados e medida diretamente pelo ELO 2313D.

Foram utilizadas cargas resistivas de potência nominal de aproximadamente 700W, que são de baixo custo por se tratarem de ebulidores comerciais, postos em operação dentro de recipientes contendo água. E também um sistema de eletrodos em um tanque de 150 litros de água salgada que equivale a uma carga resistiva de aproximadamente 55 $\Omega$  por fase, nos ensaios realizados, mas com a variação da profundidade dos eletrodos foi possível variar a carga.

O consumo de gasolina foi determinado por variação volumétrica por unidade de tempo e convertido para massa por unidade de tempo através da massa específica média da gasolina brasileira.

O consumo de biogás foi medido a partir do uso de uma turbina ótica, e o de ar por uma turbina com o uso de efeito hall, calibradas com um tubo de Pitot, cujas informações fornecidas foram adquiridas também pela placa PCI-DAS08. Foi instalado um sistema de aquisição de dados para medição de fluxo de entrada de biogás, utilizando turbinas de medição de vazão (anemômetros), cuja instalação está apresentada na figura 5.3.



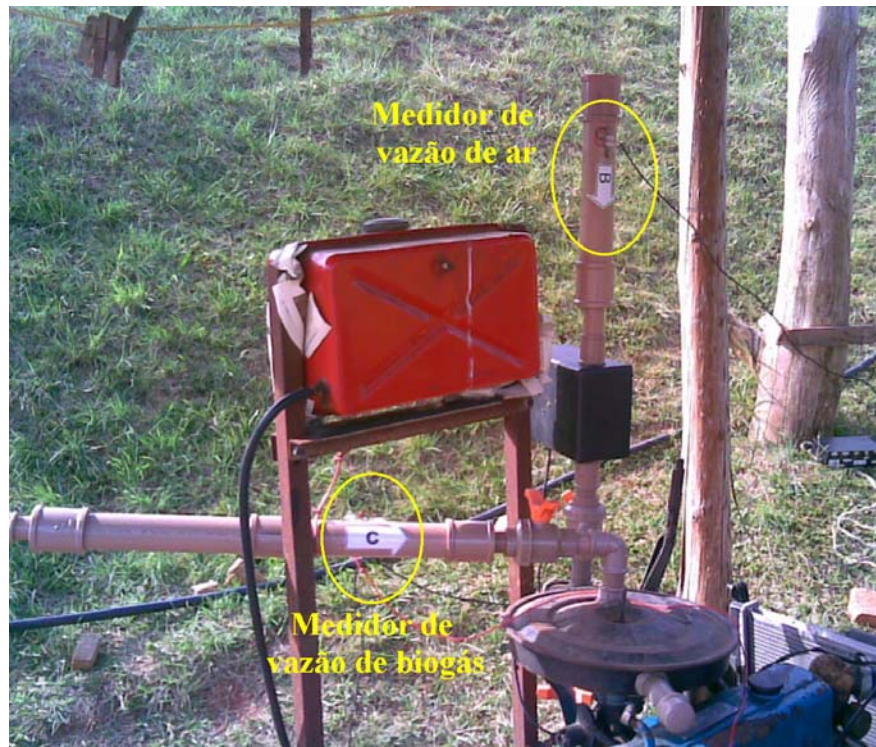


Figura 5.3 – Sistema de medição de vazão de biogás e ar.

As pressões foram medidas com o uso de um manômetro de coluna de água à temperatura ambiente.

Foram adquiridos de maneira simultânea a tensão e corrente de operação de cada fase, a rotação do sistema e a frequência da corrente alternada gerada.

A vida útil esperada do motor não foi alterada de maneira significativa, como se vê no final do experimento. Foi feita uma verificação visual do estado geral do interior da tampa superior da câmara de combustão, cilindros e superfície superior dos êmbolos e a medida de alguns parâmetros a serem comparados com o início do experimento, como variação de ovalização, conicidade e rugosidade dos cilindros, apresentados na figura 5.4, com a intenção de verificar qualquer anomalia ou desgaste excessivo no motor. Também foram realizadas avaliações do estado das velas de ignição em comparação a modelos fornecidos pelo fabricante.



Figura 5.4 – Medição de conicidade, ovalização (à esquerda) e rugosidade (à direita) dos cilindros.

Foi realizada a medição de emissões do motor em diferentes regimes de operação com o uso de um equipamento de análise de gases modelo Alfateste 488A, apresentado na figura 5.5, cujas características se encontram no ANEXO II.



Figura 5.5 – Analisador de gases.

A medição de gases foi realizada em um dos ensaios com a monitoração da mistura através de um lambda *meter* Motec, apresentado na figura 5.6. Suas características técnicas estão descritas no ANEXO II.

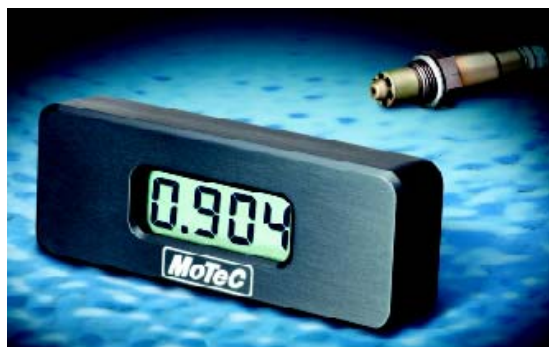


Figura 5.6 – *Professional Lambda Meter* Motec. Fonte: Motec (2006).

As medidas envolvendo a aquisição de dados foram feitas simultaneamente com a placa DAS08 utilizando o *software* comercial Labview<sup>®</sup>, e o medidor orçazonal de grandezas utilizou os *softwares* fornecidos pelo fabricante ELO 71<sup>®</sup> e ELO 50<sup>®</sup>. Depois de adquiridos os dados foram tratados com o uso da planilha Excel<sup>®</sup>. Houve redundância em alguns parâmetros medidos, principalmente os relativos à rede elétrica. A placa DAS08 também adquiria informações dos sensores de vazão e rotação do motor. O analisador de gases funcionou em conjunto com o lambda *meter*, cuja sonda lambda foi adaptada no sistema de escape do motor exclusivamente para essas medições. A energia elétrica foi descartada em uma cuba de 160 litros contendo água salgada. O computador tinha instalado em seu barramento pci a placa DAS08 e o *notebook* estava conectado ao medidor orçazonal de grandezas por um cabo serial/USB. Os computadores estavam conectados entre si através de um cabo de rede 10/100 *crossover*.

O esquema simplificado de ligação, em blocos, dos equipamentos de medição ao sistema de geração e descarte de energia elétrica, está representado na figura 5.7.

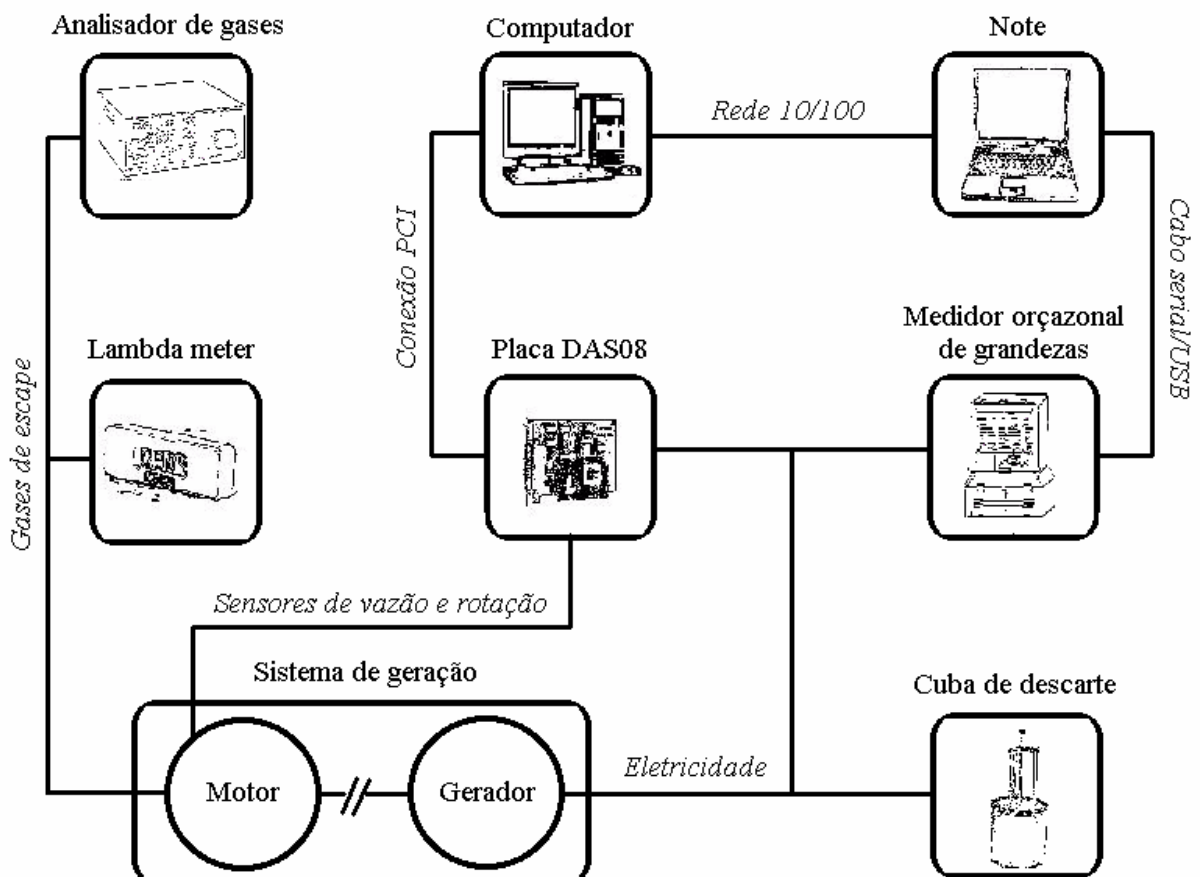


Figura 5.7 – Esquema de ligação dos equipamentos de medição.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos ensaios realizados foram medidos diversos parâmetros em situações de geração variadas, respeitando os limites seguros dos equipamentos de medida, do protótipo, do ambiente onde estava instalado e das pessoas que circulavam nas proximidades do experimento.

### 6.1 Apresentação dos resultados

Os resultados estão apresentados na forma de tabelas, gráficos e figuras, agrupados por área de interesse. Nas tabelas foram incluídos os erros de medição e nos gráficos foram incluídas linhas de tendência para uma melhor visualização, com respectivo valor  $R^2$  e período 60 para médias móveis.

#### 6.1.1 Disponibilidade de biogás no aterro sanitário da Extrema

Foi medida a vazão natural de biogás, que varia sazonalmente devido ao regime de águas infiltradas no aterro e temperaturas. Na tabela 6.1 é apresentada a vazão média em uma seqüência de períodos no ponto de captação utilizado. Convém salientar que no aterro existem aproximadamente 270 pontos de saída de biogás com vazões diferentes do ponto analisado.

Tabela 6.1 – Vazão natural média de biogás a partir do ponto de captação escolhido.

Período	Vazão em kg/h
Maio 2006	2,25 ± 20%
Junho 2006	3,8 ± 20%
Julho 2006	4,7 ± 20%
Agosto 2006	0,5 ± 20%
Setembro 2006	0,8 ± 10%
Outubro 2006	10 ± 10%
Novembro 2006	14 ± 10%
Dezembro 2006	13 ± 10%

Quando o sistema de medição é instalado e é permitido ao gás fluir livremente, ocorre um pico de vazão que se estabiliza em poucos minutos, como mostrado no gráfico de vazão mássica de biogás por tempo na figura 6.1, em um dia de vazão que permitia a operação do sistema.

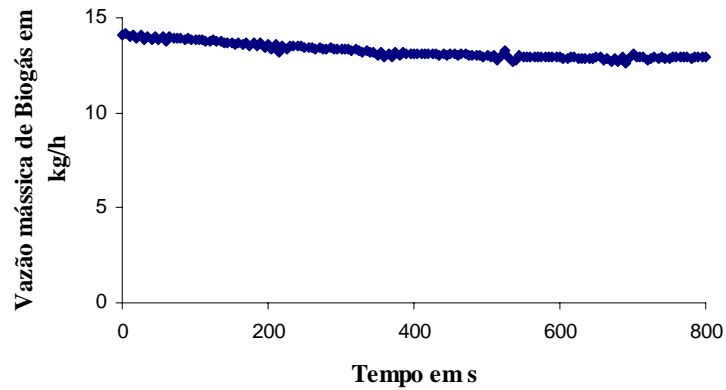


Figura 6.1 – Vazão mássica natural de biogás.

### 6.1.2 Relação entre consumos e potência gerados

A relação entre o consumo horário e a potência elétrica é apresentada na figura 6.2, onde o consumo é apresentado em kg/h e a potência em kW. Este gráfico mostra a relação entre o consumo de biogás, ao ser variada a carga, ao longo de todo o experimento, para as tensões dentro da faixa de variação aceitável. Para uma melhor visualização foi incluída uma linha de tendência, e associado a esta um valor de  $R^2$ , que corresponde ao quadrado do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson. O valor  $R^2$  pode ser interpretado como a proporção da variância no eixo y que pode ser atribuída à variância no eixo x, ou ainda à fidelidade da linha de tendência com a tendência dos pontos medidos, com o valor 1 sendo 100% de concordância.

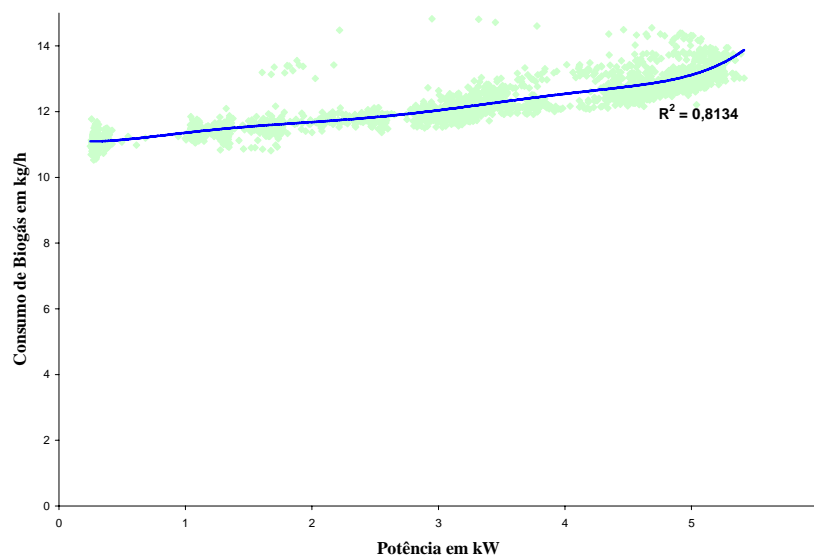


Figura 6.2 – Consumo horário de biogás por potência

Para uma melhor visualização da tendência apresentada, gerou-se o gráfico da figura 6.3, onde foram isoladas as medições de consumo e potência para a tensão de 220V. Com consumo em kg/h e potência em kW.

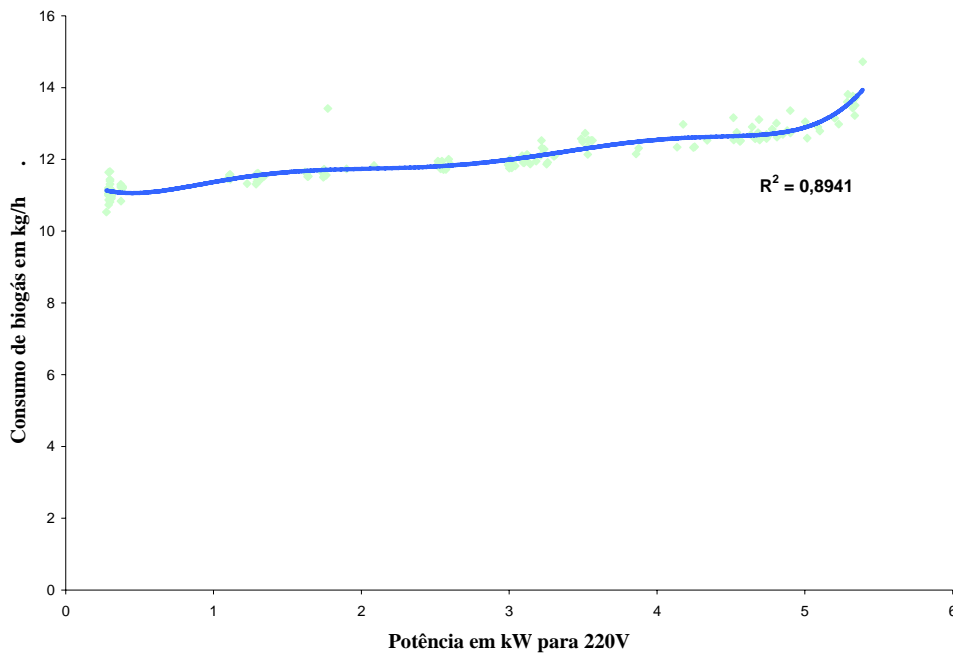


Figura 6.3 – Consumo horário de biogás por potência, para 220V.

A razão entre o consumo horário e a potência elétrica, resulta no consumo específico dado, em kg/kWh, cuja relação com a potência elétrica, em kW, é apresentada na figura 6.4, onde o maior consumo específico medido corresponde a 44,1kg/kWh para a potência elétrica de 0,25kW e o menor corresponde a 2,3 kg/kWh para a potência de 5,4 kW. Embora estes valores possam parecer muito altos, eles são compatíveis com a figura 3.17, uma vez que a potência média efetiva,  $p_{me}$ , se encontra abaixo da curva de maior consumo, consumindo mais que 883g/kWh de gasolina. Lembrando, ainda, que o biogás do aterro sanitário da Extrema possui a metade do poder calorífico da gasolina e o motor utilizado tem capacidade volumétrica maior que o indicado na figura 3.17.

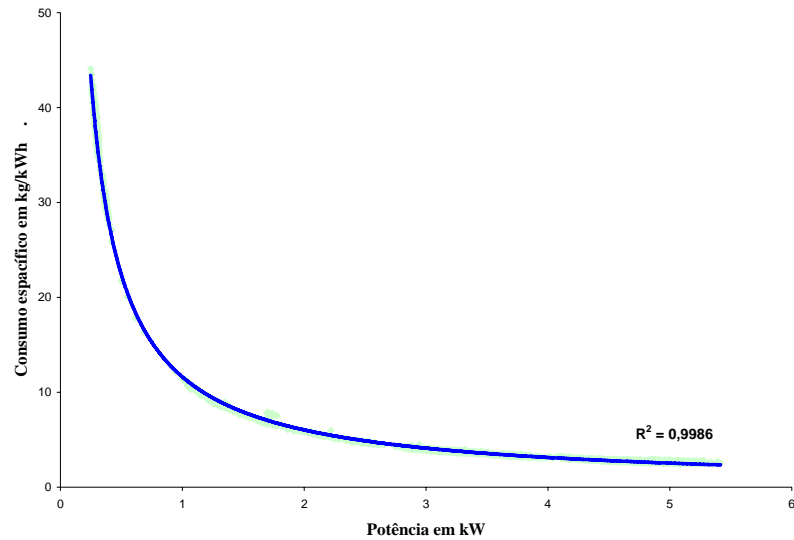


Figura 6.4 – Relação entre o consumo específico e a potência elétrica.

A relação mássica de ar biogás em função da potência elétrica é apresentada na figura 6.5, onde a relação mássica ar biogás é adimensional e a potência elétrica é medida em kW.

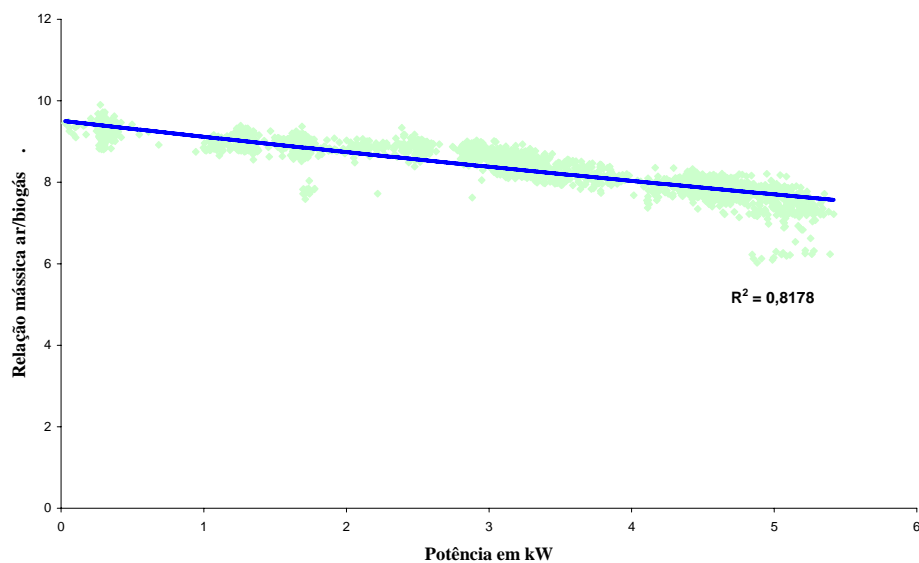


Figura 6.5 – Relação ar/biogás por potência elétrica.

A relação calculada a partir das medições de ar e biogás, uma vez calculada a relação mássica ideal teórica, levando em consideração a composição do biogás no aterro sanitário da Extrema, permite determinar o parâmetro lambda para cada etapa da operação. O gráfico da figura 6.6 mostra a relação entre a potência, expressa em kW, e o parâmetro lambda.

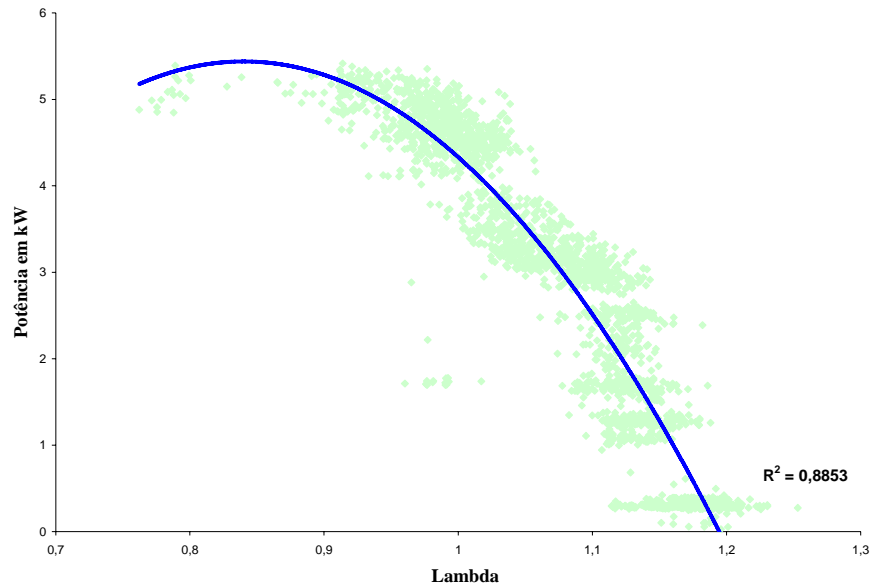


Figura 6.6 – Relação entre a potência elétrica dissipada e o parâmetro lambda.

O consumo específico em função do parâmetro lambda é apresentado na figura IV.1 no ANEXO IV, onde o consumo específico é expresso em kg/kWh e o parâmetro lambda é adimensional.

Foi determinado o consumo de gasolina, muito embora a maioria dos ensaios tenha sido feita utilizando-se biogás. Os valores encontrados são apresentados na tabela 6.2, com carga e sem carga.

Tabela 6.2 – Consumo médio de gasolina.

Combustível	Quantidades sem carga	Quantidades com carga
Gasolina (kg/h)	3,6 ± 10%	5,0 ± 10%

### 6.1.3 Parâmetros de geração elétrica

O gráfico da figura 6.7 apresenta a distribuição de medições, cerca de 2000, realizadas de cinco em cinco minutos na fase R, com o gerador operando com banco de capacitores de 50µF por fase, onde tensão é apresentada em volts e as medições em eventos. Para melhor visualização foi acrescentada uma linha de tendência que corresponde à média móvel com período de 60 eventos. A estabilidade da tensão foi proporcionada pelo sistema de controle eletrônico, através do ajuste de rotação do motor.



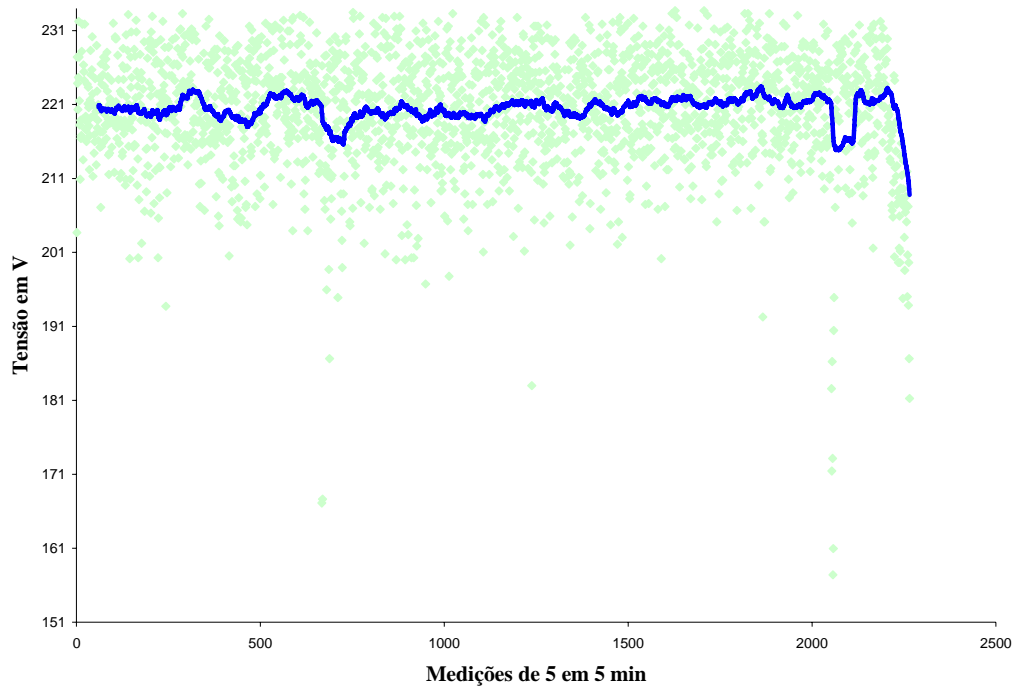


Figura 6.7 – Gráfico da tensão ao longo do tempo do experimento.

A potência elétrica dissipada variou ao longo do tempo devido às variações de nível de água na cuba de descarte de energia. Enquanto a energia elétrica é convertida em calor, a água da mesma vai sendo vaporizada, sendo necessário acrescentar água na cuba, o que ocorria em períodos de 8 a 18 horas de operação contínua. A variação da potência elétrica dissipada é apresentada no gráfico da figura 6.8, onde a potência é apresentada em kW e as medições em eventos.

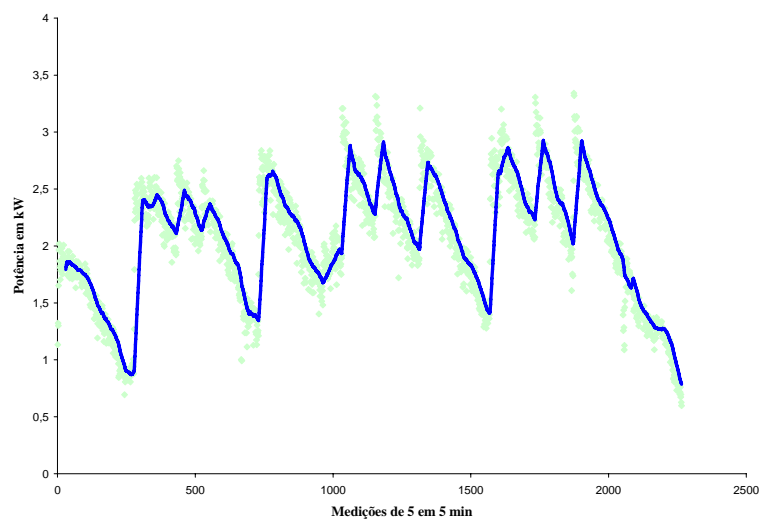


Figura 6.8 – Gráfico da potência ao longo do tempo.

A frequência da rede também sofreu variações ao longo do tempo, variações estas que acompanharam as variações da potência elétrica, isto porque o sistema de controle atuava

sobre a rotação do motor, que está intimamente ligada à frequência gerada, conforme apresentado na figura 6.9, onde a frequência é apresentada em Hz e as medições em eventos.

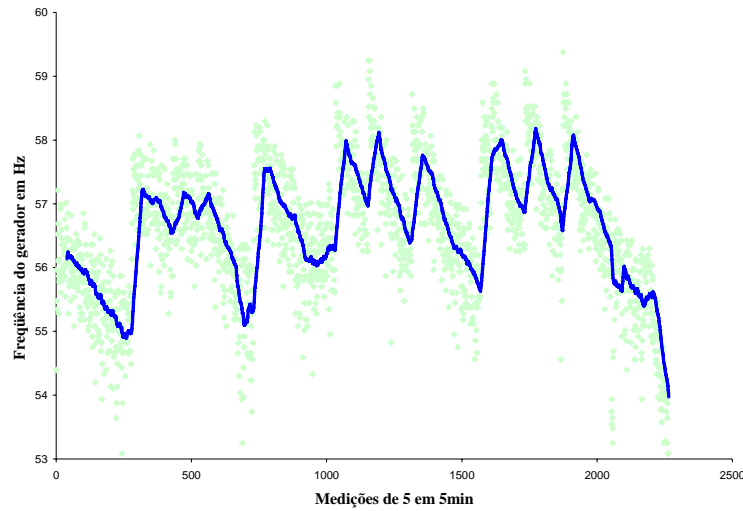


Figura 6.9 – Frequência da rede ao longo do tempo.

Sendo o ajuste de tensão feito pelo controle da rotação, que altera significativamente a frequência da tensão gerada, é possível determinar curvas que relacionam as variações de frequência com as variações potência do sistema. Na figura 6.10 é apresentado o gráfico que mostra a relação entre a frequência da rede e a potência elétrica consumida. A potência é apresentada em kW, e a frequência, em Hz.

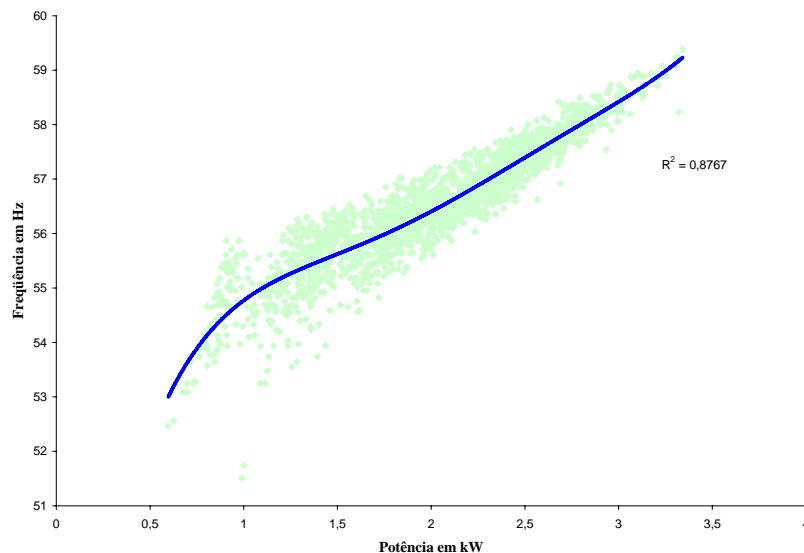


Figura 6.10 – Frequência em Hz por potência em kW.

Fixando-se a potência em um único valor, através da exclusão dos valores fora de faixa, é possível obter a curva que relaciona a tensão eficaz da fase R com a frequência da tensão alternada gerada. A relação entre a tensão da fase R e a frequência da rede é apresentada na

figura 6.11, onde a potência é constante no valor de 2 kW, a tensão é apresentada em V e a frequência, em Hz.

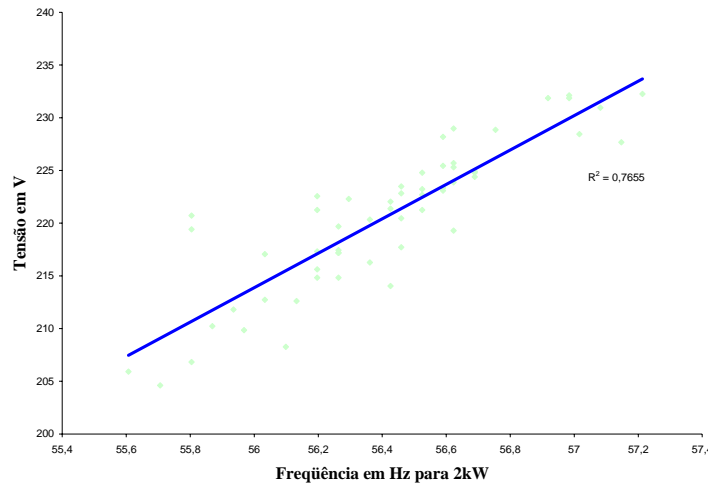


Figura 6.11 – Relação entre tensão e frequência para carga de 2 kW.

Da mesma forma é possível determinar a curva que relaciona a potência dissipada com a frequência da tensão gerada para um valor fixo de tensão, faixa estreita ( $\pm 0,5V$ ), diferentemente da figura 6.10, onde a tensão se encontrava em uma faixa larga de 161 a 231V. A potência em relação à frequência para uma tensão fixa de 220V é apresentada no gráfico da figura 6.12, onde a potência está representada em kW, e a frequência, em Hz.

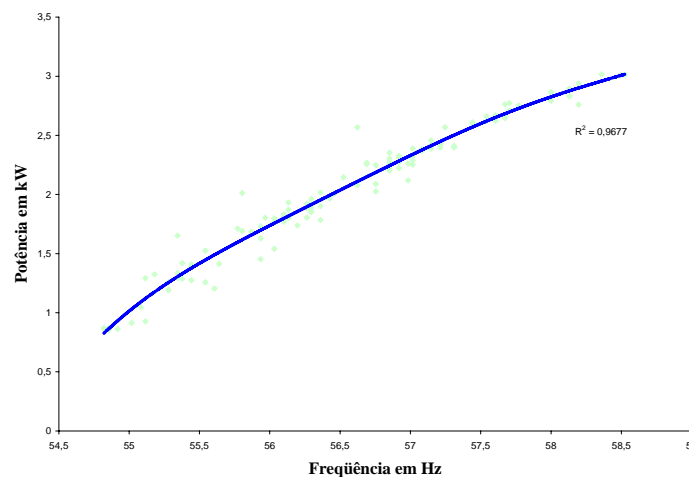


Figura 6.12 – Potência em relação à frequência em 220V.

A frequência da tensão elétrica gerada é dependente da potência e tensão geradas, mas também está relacionada com o banco de capacitores utilizado para excitar o estator do gerador assíncrono, conforme Bansal (2005). O gráfico da figura 6.13 representa a relação entre a frequência da rede e a potência elétrica dissipada para a tensão fixa de 220V na fase R, com bancos de capacitores de 40 e 50  $\mu F$ , onde a frequência é apresentada em Hz e a potência em kW.

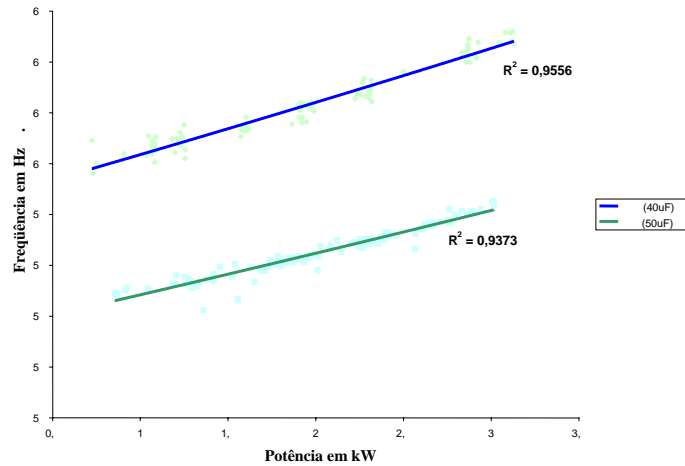


Figura 6.13 – Relação entre frequência da rede e a potência elétrica consumida para bancos de capacitores de 40 e 50  $\mu\text{F}$ .

Em qualquer sistema de geração elétrica trifásico é importante que haja um balanço de consumo entre as fases. No entanto, normalmente existirão desbalanceamentos entre fases, o que provoca diferenças de tensão entre as mesmas e em situações extremas pode provocar danos aos enrolamentos do estator do gerador. Para o uso em motores trifásicos, provocará perda de eficiência, de acordo com Campana (2000). Nos ensaios foram utilizadas variações pequenas, da ordem de 5% do valor máximo nominal de potência para o desbalanceamento, isto para garantir a integridade do sistema. O gráfico da figura 6.14 apresenta o desbalanceamento entre a tensão eficaz das três fases do gerador em relação ao desbalanceamento de potência entre as cargas quando a tensão da fase R era 220V. O desbalanceamento de potência é representado em kW, e o de tensão, em V.

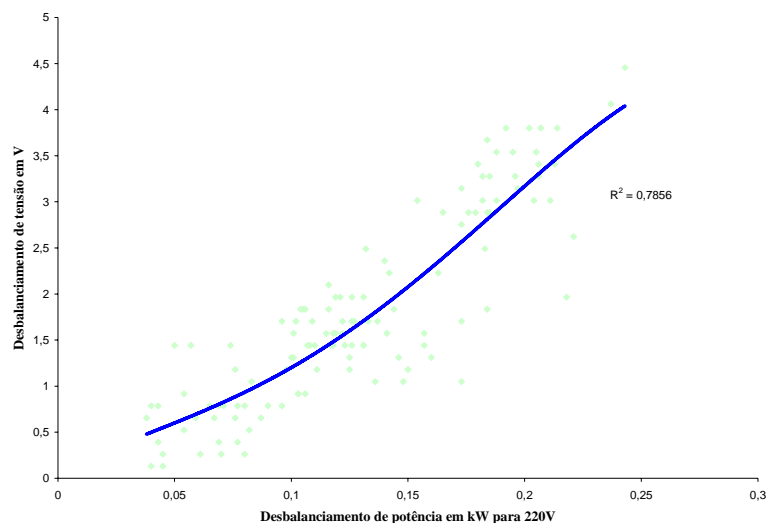


Figura 6.14 – Desbalanceamento entre tensões em relação ao desbalanceamento entre potências por fase para tensão fixa em 220V.

Na figura 6.15, é apresentado um gráfico com a relação entre a rotação do motor a combustão interna e a tensão eficaz de saída na da fase (R) com carga de  $55\Omega$  por fase e a vazio.

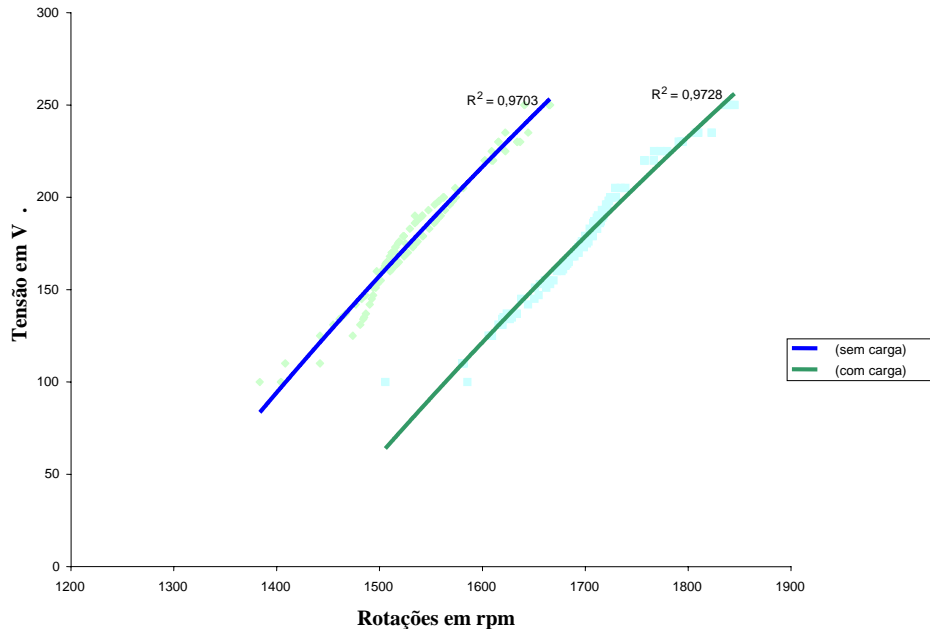


Figura 6.15 – Gráfico da relação entre rotação do motor e tensão na fase R com e sem carga.

O medidor orçazonal de grandezas permite uma grande quantidade de análises a respeito da qualidade da energia elétrica gerada, no ANEXO VI, é apresentado o diagrama vetorial de tensões e correntes, extraídos do *software* ELO 71<sup>®</sup>, aparecem para cada fase diversos parâmetros para uma série de níveis de potência consumidos.

Durante o experimento, uma quantidade de energia elétrica foi dissipada inicialmente em ebulidores, depois em uma cuba de água salgada. A maior parte da energia gerada foi mediada diretamente com o medidor orçazonal de grandezas; outra parte foi calculada a partir de medições de tensão e corrente. A energia elétrica total gerada no experimento é apresentada na tabela 6.3, em kWh.

Tabela 6.3 – Energia elétrica total gerada, em kWh.

Energia Elétrica Gerada	$520 \pm 10$
-------------------------	--------------

#### 6.1.4 Controle de emissões

Foram feitas medidas de emissões para diversos regimes de funcionamento do sistema, com variações no parâmetro lambda, na potência elétrica e rotação do motor. Na figura 6.16 é apresentado o gráfico, onde aparecem os níveis de emissões de CO (expresso em percentual volumétrico), HC, expresso em  $10^3$  ppm, e  $\text{NO}_x$ , expresso em  $10^2$  ppm, em função do

parâmetro lambda que é adimensional. Os valores foram obtidos da tabela 6.4. Foram escolhidos para a composição do gráfico esses gases, em especial para comparação com a figura 3.4.

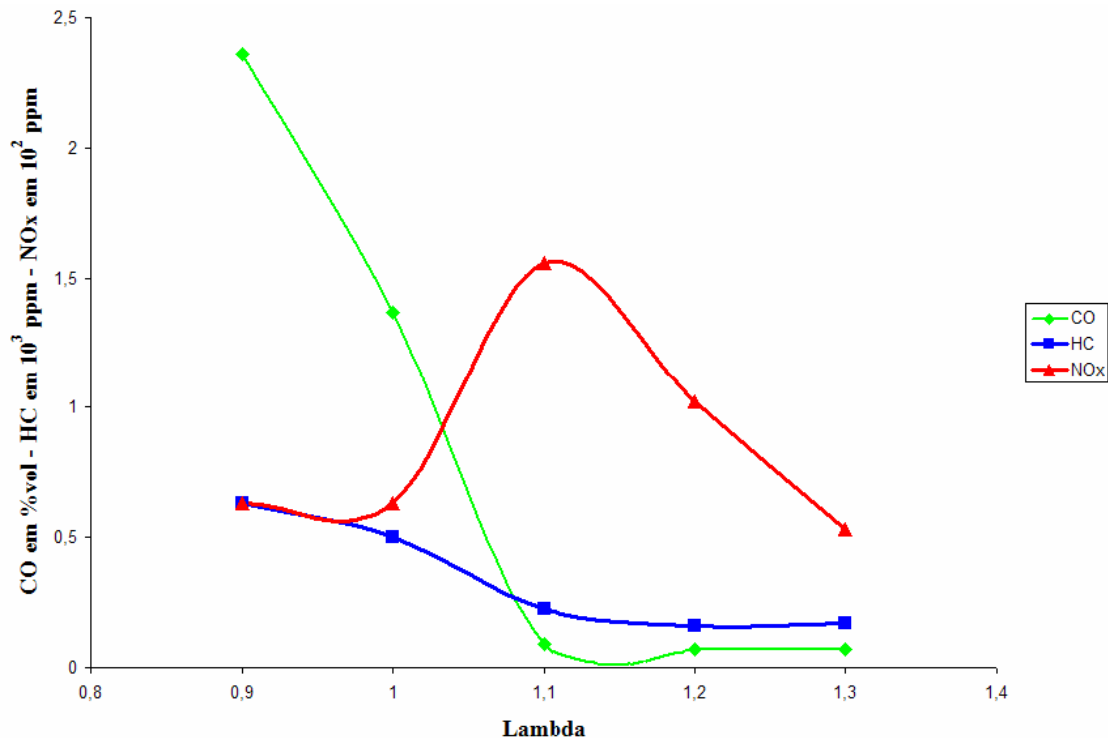


Figura 6.16 – Relação entre o parâmetro lambda e as emissões gasosas do motor, para biogás.

A tabela 6.4 apresenta os valores medidos de emissões para diversos valores de lambda para o sistema em operação, com biogás, gerando sem regulação de tensão mas com potência elétrica na faixa de 4,6 a 6 kW.

Tabela 6.4 – Emissões para motor com carga, com biogás.

Lambda	CO (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	O <sub>2</sub> (% vol)	HC (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	Pot (kW)	Rot (rpm)
1,3 ± 5%	0,07 ± 5%	12,6 ± 5%	6,2 ± 5%	170 ± 5%	53 ± 5%	5,5 ± 5%	2290 ± 5
1,2 ± 5%	0,07 ± 5%	14 ± 5%	4,7 ± 5%	160 ± 5%	102 ± 5%	5,5 ± 5%	2290 ± 5
1,1 ± 5%	0,09 ± 5%	15,3 ± 5%	3,52 ± 5%	227 ± 5%	156 ± 5%	5,2 ± 5%	2301 ± 5
1 ± 5%	1,37 ± 5%	14,6 ± 5%	3,4 ± 5%	500 ± 5%	63 ± 5%	4,6 ± 5%	2365 ± 5
0,9 ± 5%	2,36 ± 5%	13,6 ± 5%	4,3 ± 5%	633 ± 5%	63 ± 5%	6,0 ± 5%	2473 ± 5

Também foi feita a medição das emissões do motor em diversos regimes de lambda e rotação, tendo como combustível o biogás, sem carga. Os resultados são apresentados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Emissões do motor sem carga, com biogás.

Lambda	CO (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	O <sub>2</sub> (% vol)	HC (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	Rot (rpm)
0,92 ± 5%	2,67 ± 5%	9,1 ± 5%	12 ± 5%	1000 ± 5%	4 ± 5%	1140 ± 5
0,92 ± 5%	1,83 ± 5%	12,4 ± 5%	6,9 ± 5%	682 ± 5%	29 ± 5%	2530 ± 5
1 ± 5%	0,94 ± 5%	13,1 ± 5%	6,2 ± 5%	540 ± 5%	48 ± 5%	2440 ± 5
1 ± 5%	1,13 ± 5%	13,1 ± 5%	6 ± 5%	525 ± 5%	43 ± 5%	2490 ± 5
1 ± 5%	2,22 ± 5%	10,3 ± 5%	8,9 ± 5%	730 ± 5%	9 ± 5%	1690 ± 5
1,2 ± 5%	0,13 ± 5%	12,4 ± 5%	7,4 ± 5%	420 ± 5%	24 ± 5%	2700 ± 5
1,2 ± 5%	0,97 ± 5%	10,5 ± 5%	9,6 ± 5%	540 ± 5%	24 ± 5%	1640 ± 5

Para uma comparação com o desempenho com biogás, foram realizadas medições de emissões tendo como combustível gasolina, com a mistura estequiométrica e pobre, e com geração na faixa de 3,5 a 6 kW de potência elétrica, apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Emissões com o motor com carga, com gasolina.

Lambda	CO (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	HC (ppm)	O <sub>2</sub> (% vol)	NO <sub>x</sub> (ppm)	Pot (kW)	Rot (rpm)
1,2 ± 5%	0,2 ± 5%	12,2 ± 5%	246 ± 5%	4,1 ± 5%	1566 ± 5%	6,3 ± 5%	2550 ± 5
1,1 ± 5%	0,6 ± 5%	12 ± 5%	570 ± 5%	4 ± 5%	1210 ± 5%	4,6 ± 5%	2490 ± 5
1 ± 5%	1,31 ± 5%	11,3 ± 5%	630 ± 5%	4,9 ± 5%	1030 ± 5%	3,1 ± 5%	2430 ± 5

Para uma avaliação de quanto foi emitido durante os ensaios, foram feitas medidas de emissões com o motor funcionando, tanto com biogás como gasolina, em sua regulação padrão, a mesma que operou nas 295 horas de ensaio. Uma vez que o motor não dispõe de sonda lambda para verificação da proporção da mistura. Estes resultados são apresentados na tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Emissões durante a operação normal.

Biogás					
Pot (kW)	CO (% vol)	CO <sub>2</sub> (% vol)	O <sub>2</sub> (% vol)	HC (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)
0 ± 0,1	0,16 ± 5%	7,1 ± 5%	13,8 ± 5%	702 ± 5%	4 ± 5%
2 ± 0,1	0,18 ± 5%	9,7 ± 5%	11,1 ± 5%	556 ± 5%	8 ± 5%
3 ± 0,1	0,15 ± 5%	10,4 ± 5%	9,4 ± 5%	404 ± 5%	14 ± 5%
3,5 ± 0,1	0,11 ± 5%	11,3 ± 5%	8,3 ± 5%	283 ± 5%	24 ± 5%
4 ± 0,1	0,12 ± 5%	11,6 ± 5%	8 ± 5%	255 ± 5%	29 ± 5%
5 ± 0,1	0,08 ± 5%	12,9 ± 5%	6,4 ± 5%	158 ± 5%	53 ± 5%
6 ± 0,1	0,08 ± 5%	14,7 ± 5%	4,1 ± 5%	158 ± 5%	161 ± 5%
Gasolina					
0 ± 0,1	0,2 ± 5%	9,9 ± 5%	7,3 ± 5%	1417 ± 5%	527 ± 5%
4 ± 0,1	0,19 ± 5%	12,7 ± 5%	4,1 ± 5%	573 ± 5%	1800 ± 5%

### 6.1.5 Avaliação do motor

Para a verificação do desgaste do motor antes e depois do ensaio foram feitas medições de conicidade e ovalização em cada cilindro, com objetivo de verificar algum desgaste excessivo a que o motor ficasse sujeito em função do uso de biogás pouco purificado. As medições de conicidade e ovalização são apresentadas na tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Medições de conicidade e ovalização.

Cilindros	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
Antes dos ensaios				
Conicidade $\mu\text{m}$	$0 \pm 2$	$10 \pm 2$	$30 \pm 2$	$30 \pm 2$
Ovalização $\mu\text{m}$	$0 \pm 2$	$0 \pm 2$	$0 \pm 2$	$20 \pm 2$
Depois dos ensaios				
Conicidade $\mu\text{m}$	$0 \pm 2$	$20 \pm 2$	$40 \pm 2$	$40 \pm 2$
Ovalização $\mu\text{m}$	$10 \pm 2$	$0 \pm 2$	$30 \pm 2$	$30 \pm 2$

Foi medida também a rugosidade dos cilindros, através do parâmetro de rugosidade Ra, que corresponde à divergência da média aritmética do perfil. Na tabela 6.9 é apresentada a média dessas medições, realizadas em diversas zonas de cada cilindro, e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 6.9 – Rugosidade dos cilindros.

Momento da medição	Rugosidade Média Ra ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão
Antes dos ensaios	$0,27 \pm 0,01$	0,05
Depois dos ensaios	$0,27 \pm 0,01$	0,06

O estado geral da parte superior do bloco do motor e da junta de vedação, foi registrado fotograficamente e inspecionado visualmente para a determinação de qualquer anomalia em função principalmente de desgaste excessivo ou oxidação. Pode ser observado na figura 6.17.





Figura 6.17 – Visão geral da parte superior do bloco do motor, a partir do cilindro número um.

No detalhe da figura 6.18 é possível visualizar a carbonização da face superior do êmbolo número um. Algum tipo de carbonização é esperado, uma vez que o motor funcionou em rotações baixas ou intermediárias, na faixa entre 1800 e 2500 rpm.



Figura 6.18 – Detalhe da carbonização da face superior do êmbolo número um.

Na figura 6.19 é possível observar o estado geral da tampa superior do motor e faces inferiores das válvulas de admissão e escape, também com alguns depósitos de material, que é resultado de combustão incompleta.



Figura 6. 19 – Visão geral da tampa superior do motor.

Na figura 6. 20 são mostrados detalhes da carbonização sobre as válvulas e nas suas vizinhanças. Apesar de estes depósitos ocorrem com frequência em motores que operam em baixas rotações.



Figura 6. 20 – Detalhes da carbonização junto às válvulas na tampa superior do motor.

Outra forma de diagnosticar o que ocorre no motor é avaliando o estado das velas de ignição, que podem permitir, segundo a fabricante Bosch (2006), uma análise da forma como é queimado o combustível. A figura 6.21 apresenta uma seqüência de fotos de uma das velas do motor a combustão interna, à esquerda, após 25, 165 e 295 horas de uso, e o comparativo com os modelos de desgaste apresentados pelo fabricante, à direita.



Figura 6.21 – Comparativo entre vela do protótipo (à esquerda) e o modelo do fabricante (à direita), para 25h, 165h e 295h. Fonte: Bosch (2006).

Na tabela 6.10, é apresentado o tempo contínuo de operação entre falhas, descrito o tipo de falha e o custo de reparo.

Tabela 6.10 – Tempo de operação entre falhas, tipo de falhas e custo de reparo.

Tempo de operação (h)	Falha	Custo (US\$)
96	Platinado derretido	6,1
128	Excesso de condensados no filtro de biogás	0

As temperaturas de um ponto do escapamento do motor, depois do funcionamento por quinze minutos e trinta minutos com carga de  $55\Omega$  por fase com gasolina e com gás, em graus Celsius, são apresentadas na tabela 6.11. O ponto de medição está indicado na figura 6.22, que corresponde a uma foto do sistema de escape de gases, com uma câmera sensível ao calor.



Figura 6.22 – Zona de medição de temperatura.

Tabela 6.11 – Temperatura de um mesmo ponto no sistema de escape com gasolina e biogás.

Tempo	Temperatura com gasolina	Temperatura com biogás
15min	188 ± 5%	202 ± 5%
30min	207 ± 5%	235 ± 5%

A variação de pressão estática média, em relação à pressão atmosférica, medida junto ao sistema de entrada de ar, para funcionamento do motor com carga com gasolina e com biogás, é mostrada na tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Variação de pressão estática relativa de admissão com biogás e com gasolina.

Combustível	Pressão estática relativa de admissão (Pa)
Biogás	4660 ± 10%
Gasolina	340 ± 10%

## 6.2 Análise de erros

As medições realizadas até o momento possuem um erro significativo. Embora tenha sido utilizada a aquisição de dados via computador, alguns sensores, como os de vazão de ar e biogás são limitados.

Nos gráficos apresentados para uma melhor visualização, foram incluídas linhas de tendência. Naqueles onde apesar de dispersão uma tendência clara é apresentada foi utilizada uma aproximação matemática com respectivo valor de  $R^2$ , de Pearson, que corresponde à relação linear entre a linha de tendência e os valores efetivamente medidos, cujo valor representa 1 para 100% e 0 para 0% dos valores concordando com a linha de tendência. Para gráficos que representam a variação de uma grandeza no tempo, onde não aparece o valor  $R^2$ , foi utilizada a

média móvel com período de 60 eventos. Valem para esses gráficos ainda os erros e incertezas de medição aqui descritas.

Nas medições diretas o erro é a imprecisão do equipamento e incerteza nas medidas;

Nas medições indiretas de uma grandeza  $X$ , dependente do erro da medição direta das grandezas  $a$ ,  $b$  e  $c$  é utilizada a expressão (6.1) para a determinação do erro  $\Delta X$ . E o percentual do erro é sempre arredondado para um percentual inteiro.

$$\Delta X = \left(\frac{\partial X}{\partial a}\right) \cdot \Delta a + \left(\frac{\partial X}{\partial b}\right) \cdot \Delta b + \left(\frac{\partial X}{\partial c}\right) \cdot \Delta c + \dots \quad (6.1)$$

Onde,  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  e  $\Delta c$  correspondem aos erros, de medição direta, respectivos das grandezas  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

Erro de medição de tensão e correntes:

- o medidor orçazonal de grandezas e a placa DAS08 utilizados têm imprecisão menor que 1%.

Erro de medição de rotação:

- o sensor utilizado é do tipo *hall*, que envia entrada digital da placa DAS08 um pulsos por volta, e a imprecisão é menor que 1%

Erro na medição de pressão:

- a medição de pressão foi feita com o uso de uma coluna de água em uma mangueira plástica transparente, com água fornecida pela companhia de abastecimento e à temperatura ambiente. A medição de altura foi feita com uma régua plástica. Podem existir variações de densidade e volume da água em função da temperatura e origem. O valor da aceleração da gravidade adotado é de  $9,8 \text{ m/s}^2$ , o que corresponde a uma aproximação. Levando em conta todas essas fontes de erro e os seus respectivos pesos no resultado final pode-se chegar, usando a expressão (6.1), a um valor de erro de  $\pm 10\%$ .

Erro na medição de vazão:

- a medição de vazão foi feita com uso de turbinas. Para entrada de ar foi utilizada uma turbina geradora, e para a medição de vazão de biogás foi utilizada uma turbina tacométrica óptica sendo ambas calibradas com um tubo de Pitot, na UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em seu LETA, Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos, com ar atmosférico. Para o ajuste para biogás foram levados em conta os dados da tabela 2.10 e as aproximações apresentadas por DeCarlo (1984). O biogás foi considerado de densidade homogênea e de valor determinado por Azevedo (2000), assumindo todas as fontes de erro.

Atribuindo-lhes o respectivo peso, pode-se chegar, a um erro aproximado da ordem de  $\pm 10\%$ , aplicando a expressão (6.1).

Erro de determinação da resistência equivalente da carga:

- a resistência equivalente da carga foi determinada a partir dos valores médios de corrente e tensão, ambos com erros na faixa de 1%. O erro então pode chegar, aplicando-se a expressão (6.1), a  $\pm 3\Omega$ .

Erro na determinação da massa de gasolina:

- inicialmente foi medido o volume de gasolina com o uso de uma régua plástica e assumindo que o reservatório possuía um volume homogêneo para a variação de altura na faixa medida. Desconsideraram-se as variações da temperatura ambiente sobre a régua, o tanque e o combustível. O valor volumétrico foi convertido para mássico utilizando o valor médio da densidade específica da gasolina brasileira,  $750 \text{ kg/m}^3$ . Levando-se em conta essas aproximações, pode-se determinar, a partir da expressão (6.1), que o erro de medição está na faixa de  $\pm 10\%$ .

Erro na medição de temperatura:

- a medição de temperatura foi realizada com um pirômetro óptico, cujo erro é da ordem de  $1^\circ\text{C}$  ou  $0,5\%$ . No entanto existe uma dificuldade para se mirar em um ponto específico da zona a ser medida. Por isso cabe a determinação empírica de pelo menos 5% de erro nessas medições.

Erro na medição de emissões:

- o equipamento de medição de emissões, Alfatest 488A, com imprecisão menor que 1%. Porém devido à instabilidade das misturas gasosa e incertezas de leitura o erro total é considerado menor que 5%.

Erro na medição de rugosidade:

- o erro do *Surface Roughness Tester* SJ-201P da marca Mitutoyo é da ordem, para a faixa medida, de  $0,01 \mu\text{m}$ .

Erro na medição de conicidade e ovalização:

- o erro do relógio comparador utilizado é da ordem de  $2 \mu\text{m}$ .

Erro na medição de lambda:

- o erro do equipamento de medição de lambda é de  $\pm 1,5 \%$ . Porém, devido à instabilidade das misturas gasosa e incertezas de leitura, o erro total é considerado menor que 5%.

## 6.3 Discussão dos resultados obtidos

Os resultados experimentais obtidos demonstram a viabilidade do sistema.

### 6.3.1 Consumo de combustíveis e transformação de energia

Analisando a tabela 6.1 é possível concluir que existe uma grande variação no fluxo de saída de biogás no ponto escolhido para captação ao longo do tempo. Quando o fluxo natural é superior a 2 kg/h, existe possibilidade de funcionamento do sistema, o que não ocorreu nos meses de agosto e setembro devido a excesso de líquido no interior do aterro, que obstrui a passagem do gás pelo dreno. Na figura 6.1, onde é apresentada a vazão mássica natural de biogás ao longo de cerca de treze minutos, nota-se que a vazão de biogás inicia-se com um pouco mais de intensidade, mas logo estabiliza-se em um valor ligeiramente menor que o inicial, o que pode ser explicado pela obstrução da tubulação de saída de biogás do aterro durante a instalação da mangueira de captação. Ao se estabelecer o fluxo para medição, o gás acumulado vaza com mais velocidade.

Ocorre um ligeiro aumento do consumo de biogás quando a potência é aumentada, o que pode ser observado na figura 6.2 e na figura 6.3. Os pontos fora da curva podem ser explicados por esta não ser a única variável envolvida na variação do consumo de combustível. Mas, ao mesmo tempo em que ocorre um aumento de consumo mássico, ocorre uma diminuição no consumo específico, que é a razão entre o consumo horário e a potência elétrica, cujo menor valor está na faixa de 2,5 kg/kWh, em 5,4 kW, apresentado na figura 6.4. Embora este valor possa parecer muito alto, ele é compatível com a figura 3.17, uma vez que a potência média efetiva, *p<sub>me</sub>*, se encontra abaixo da curva de maior consumo, consumindo mais que 883g/kWh de gasolina. Lembra-se ainda, que o biogás do aterro sanitário da extrema possui a metade do poder calorífico da gasolina, e o motor utilizado tem capacidade volumétrica maior que o indicado na figura 3.17.

Em termos de relação entre ar/biogás também ocorre uma diminuição em função do aumento da potência, Figura 6.5, isto é, quanto mais potência, mais biogás é adicionado proporcionalmente à mistura. Isso se deve principalmente ao ponto de controle de rotação adotado, que foi através da variação da entrada de ar para que o motor passasse a aspirar mais ou menos biogás do aterro.

Quando é analisada a potência em função do parâmetro lambda que corresponde à razão entre a proporção ar biogás real e a proporção ar biogás ideal, pode-se notar que o pico de

potência é atingido quando a relação está em torno de 0,9, ou seja, quando a mistura está ligeiramente rica, conforme apresentado na figura 6.6, o que é compatível com o modelo teórico apresentado na figura 3.3.

O consumo de gasolina, apresentado na tabela 6.2, corresponde ao consumo médio de gasolina para funcionamento a vazio e com uma carga de 5kW. Pode-se observar um crescimento do consumo com a conexão da carga.

A diferença entre as pressões de admissão pode ser visualizada na tabela 6.12, onde se nota que a pressão estática de admissão do biogás é bem menor que a ocorrida com a gasolina. Isso permite que o sistema possa ser usado onde exista biogás em quantidade suficiente, independentemente da pressão natural existente, pois o motor tem condições de aspirar o biogás necessário.

### **6.3.2 Características da energia elétrica gerada**

Quanto à estabilidade de geração foi realizada uma série de medições, sendo a mais importante e usada pela ANEEL (2003) - Agência Nacional de Energia Elétrica - para qualificar as distribuidoras de energia elétrica. A medição cíclica da tensão eficaz das fases, que deve ocorrer em intervalos mínimos de 10 minutos, foi realizada e é apresentado na figura 6.7, em intervalos de 5 minutos. Pode-se observar que a maior parte das medidas, 89%, encontra-se na faixa de 201 a 229V, que corresponde aos valores considerados nacionalmente adequados à distribuição da energia elétrica; 9.9 % encontram-se na faixa de 189 a 201V ou 229 a 233V, considerada precária, mas que até 2004 uma rede era considerada aceitável com até 7% de medições precárias; e os restantes 1,1% encontram-se na faixa abaixo de 189V ou acima de 233V, o que é considerada a faixa crítica, porém até 2004 foram aceitos 1,1 % das medidas nessa faixa. Segundo a CSPE (2005) (Comissão de Serviços Públicos de Energia), na Europa são aceitas variações entre 90 a 110% da tensão durante 5% do tempo de medição. O tipo de equipamento a ser ligado num sistema como esse não requer precisão na tensão e frequência da rede. Uma variação de 10 % é aceitável. Inclusive os equipamentos modernos, como os televisores, trabalham com valores de tensão (entre 100V e 240V) e frequência bastante flexíveis.

O valor utilizado correspondeu no máximo a pouco mais da metade da capacidade de geração do gerador, por medidas de segurança. A potência elétrica sofreu variações durante o ensaio, como pode ser observado na figura 6.8, principalmente devido à natureza da carga utilizada. Uma solução de água salgada, onde eram mergulhados eletrodos a profundidades



ajustáveis, assim ajustando os níveis de carga. No entanto, no funcionamento contínuo, parte da água da cuba evaporava, e os eletrodos ficavam parcialmente mergulhados, diminuindo a carga, o que fazia com que fosse necessário reabastecer a cuba de água. Cada vez que isso era feito, a potência subia abruptamente e o sistema de controle do motor entrava em ação.

O sistema de controle atuava variando a rotação do motor e conseqüentemente a frequência da tensão gerada, como pode ser observado na figura 6.9. A rotação do motor foi a maneira utilizada para ajustar a tensão do gerador, e isso gerou uma variação de frequência na rede, conforme demonstrado no trabalho de Homrich *et al.* (1994) “variações de rotação no gerador provocariam variações aproximadamente da mesma ordem percentual na frequência e tensão do gerados”, como pode ser observada na figura 6.15. Para uma mesma potência, a tensão pode ser ajustada variando-se a frequência, o que é apresentado no gráfico da figura 6.11.

Os valores de frequência para uma mesma potência e tensão podem variar conforme o banco de capacitores utilizado, apresentado na Figura 6.13. Quanto maior a capacidade, menor a frequência de geração para mesma potência. Foi escolhido o banco de  $50\mu\text{F}$  para a maioria dos ensaios porque as frequências ficavam na faixa entre 50 e 60 Hz, na qual operam a maioria dos equipamentos. Existe certa dificuldade para o ajuste entre frequência e tensão geradas com cargas variáveis, pois se tem uma série de indeterminações, e este é um dos maiores problemas do motor assíncrono como gerador, em Bansal (2005).

Como as relações foram feitas em sua maioria pela tensão da fase R, é interessante verificar o desbalanceamento máximo entre fases, que como pode ser observado na figura 6.14, cresce com o desbalanceamento entre potências por fases, mas tem um valor razoável, uma vez que a desbalanceamentos de potência da ordem de 10% da potência correspondem desbalanceamentos de tensão da ordem de 2%. Qualquer sistema trifásico de geração de energia elétrica prevê sempre consumo balanceado, o que nem sempre é possível. Variações maiores de potência não foram ensaiadas devido ao risco de comprometer o gerador.

Quanto à relação entre a rotação do motor e do gerador e a tensão da fase R, figura 6.15, pode-se perceber uma dependência entre rotação e tensão gerada se aproxima da linearidade. Também é possível perceber que com o acréscimo de cargas a rotação tem de ser aumentada para que se possa ter na saída a tensão eficaz de 220V. A rotação síncrona associada a esse gerador de dois pólos é de 3600 rpm, conforme a equação (3.3), e escorregamento, conforme valores nominais de placa, é da ordem de 3,3%, equações (3.4) e (3.5). Logo, a partir das mesmas equações, é possível avaliar que a frequência da tensão gerada varia conforme a carga, o que foi corroborado com o gráfico da figura 6.10.

Outros parâmetros, como ângulos de fase entre corrente e tensão, distorções, potências reativas, co-seno de  $\phi$  e fator de potência foram apresentados no ANEXO VI. Onde se pode observar que, para a potência de 3,2 kW, os ativos são predominantes e as distorções e reativos são insignificantes. Isto pode ser explicado pelo uso de cargas resistivas e os reativos existentes no circuito serem provenientes predominantemente dos bobinados do gerador e capacitores de excitação, somados a algum ruído induzido pelo funcionamento do motor a combustão interna. A melhor faixa de operação para o protótipo corresponde ao valor de potência de 3,2 kW. Analisando os mesmos diagramas para outras potências no ANEXO VI, pode-se observar o surgimento de reativos mais significativos, tanto para maiores quanto para menores potências. No entanto, para a maioria das aplicações, não representam problemas, exceto pequenos aumentos de consumo e de temperatura nas fiações.

### 6.3.3 Emissões gasosas

Com relação às emissões gasosas do motor, pode-se observar na tabela 6.4 que, entre os valores 1,1 e 1,2 para o parâmetro  $\lambda$ , ocorrem as menores emissões de CO e HC, enquanto que o  $\text{NO}_x$  atinge o seu pico. A figura 6.16 é compatível com a figura 3.4, que representa as emissões teóricas dos mesmos gases. Nota-se um comportamento semelhante no que tange às variações esperadas. Pode-se notar, na tabela 6.5, que na operação a vazio do motor, o aumento nas emissões de CO e HC não está somente vinculado às variações da mistura, mas também às baixas rotações. Quando as emissões a gasolina são comparadas com aquelas que ocorrem na operação a biogás, como comparando a tabela 6.4 com a tabela 6.6 e na tabela 6.7, onde se pode observar que as emissões de CO e  $\text{CO}_2$  são semelhantes até com vantagem em alguns casos para a gasolina. Lembrando que, para o biogás, parte das emissões de  $\text{CO}_2$  é proveniente do próprio biogás que é rico nesse gás, com no mínimo 30% em volume. No entanto, as emissões de  $\text{NO}_x$  a gasolina são no mínimo o dobro daquelas que ocorrem com biogás.

As emissões de  $\text{NO}_x$  são relativamente baixas, o que pode ser explicado pelo trabalho de Huang e Crooke (1998), onde foram realizados ensaios de emissão, utilizando simulações de biogás com diversas rotações do motor e com compressão variável, sendo determinado que baixas compressões e rotações na faixa de 8,5:1 e 2500 rpm, respectivamente, correspondiam a baixas emissões de  $\text{NO}_x$ . (óxido nítrico e dióxido de nitrogênio).

### 6.3.4 Aquecimento do motor

Comparando as temperaturas do escapamento do motor, em um mesmo ponto, na tabela 6.11, pode-se observar que as temperaturas atingidas com biogás são um pouco maiores do que com gasolina. Isso ocorre porque o motor se encontra ligeiramente atrasado para o funcionamento com biogás. Foi feito um ajuste do ponto do motor, que foi adiantado em relação aos ensaios preliminares para funcionar com biogás; porém, como o início de sua operação é feito com gasolina, por questões de preservação do motor, não é feito o avanço ideal do ponto. O sistema de ignição é eletromecânico, ajustado tanto para um combustível quanto para outro. A principal implicação disto é que, para cargas maiores, talvez seja necessária uma refrigeração adicional com o uso de ventiladores sobre o sistema de escapamento de gases ou o uso de um sistema de ignição eletrônico.

A zona de medição de temperatura foi escolhida inicialmente por ser mais fria, o que pode ser visualizado na figura 6.22, onde os pontos mais quentes estão mais claros. Na seqüência do trabalho manteve-se o mesmo ponto de medição. O problema de superaquecimento que ocorria no início do trabalho foi melhorado com o ajuste do ponto para 2º adiantado em marcha lenta.

### 6.3.5 Desgaste do motor

Para observar o possível desgaste sofrido ao longo dos ensaios pelo motor, foram realizadas algumas medidas antes e depois dos mesmos. Pode-se observar na tabela 6.8 que tanto a conicidade como a ovalização dos cilindros sofreram variações durante os ensaios, mas não de forma a comprometer o funcionamento do sistema ou mesmo indicar um desgaste acelerado. As variações foram da ordem de um centésimo de milímetro, enquanto é aceitável até cinco centésimos. A rugosidade média dos cilindros também foi medida, na tabela 6.9, onde se nota que a rugosidade média se manteve e houve um ligeiro aumento no desvio padrão, indicando uma heterogeneidade maior entre as amostras de medição, ou seja, superfícies com desgaste maior. Pode-se, a partir disso, concluir que não houve aumento significativo da rugosidade das paredes do cilindro, que poderiam teoricamente ocorrer em função do ataque de contaminantes do biogás ou pela diminuição de lubrificação causada por combustíveis na fase gasosa.

Apesar da deposição de carbono sobre a superfície dos êmbolos e na tampa superior como observado nas figuras 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20, o estado geral do motor é muito bom, e as deposições podem ser explicadas mais pelas baixas rotações de operação, onde ocorre a

combustão incompleta do biogás devido à baixa turbulência, do que pelos contaminantes do biogás.

Comparando o estado das velas de ignição com o modelo compatível fornecido pelo fabricante, na figura 6.21, percebe-se, pela coloração da base do isolador que a temperatura da vela e o ponto do motor estão corretos, não existe deformidade nos eletrodos, o que indica uma condição normal de uso, na vela com 25 horas de uso. A vela com 165 horas apresentou uma camada de fuligem preta azulada seca, que é compatível com o funcionamento do motor em baixas rotações e o com combustível fora de especificações. Já a vela com 295 h apresentou camada de cinzas, de estrutura fofa com escórias na base do isolador, o que pode representar o uso de combustíveis que deixam resíduos incombustíveis na câmara de combustão e na própria vela. No entanto, a vela em questão está em muito melhor estado do que aquela apresentada como modelo pelo fabricante.

### **6.3.6 Eficiência energética do motor**

No aspecto de eficiência energética, tem-se um sistema com rendimento baixo, analisando o consumo de combustíveis e a energia elétrica líquida gerada.

Utilizando o poder calorífico da gasolina apresentado na tabela 2.3 e o consumo de gasolina apresentado na tabela 6.2, chega-se a um valor aproximado no caso da gasolina de 230 MJ de energia consumida para 9,5 MJ de energia elétrica gerada por hora para uma potência média gerada de 2,6 kW. Utilizando a expressão (3.15), obtém-se aproximadamente um rendimento em torno de 4,2%.

Para o caso do biogás, foi determinado o rendimento em três situações distintas: no menor consumo, no maior consumo e produzindo a mesma potência que o sistema produziu a gasolina. Utilizando o poder calorífico apresentado na tabela 2.2 e o consumo específico de biogás por kW de energia elétrica gerado, apresentado na figura 6.4 com a aplicação da expressão (3.15). Para o primeiro caso são aproximadamente 65 MJ consumidos para cada 3,6 MJ gerados em energia elétrica útil. Um rendimento em torno de 5,5 %. Para o segundo caso foram consumidos 1000 MJ para cada 3,6 MJ gerados em energia elétrica. Um rendimento de aproximadamente 0,36%. Para comparação com o rendimento a gasolina tem-se aproximadamente 108 MJ consumidos para cada 3,6 MJ de energia elétrica. Um rendimento em torno de 3,3%. Para uma melhor visualização dos resultados, os valores obtidos são apresentados na tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Rendimento do protótipo de sistema de geração variando potência e combustível.

Combustível	Rendimento em %	Potência média gerada em kW
Biogás	5,5	5,4
Biogás	0,36	0,25
Biogás	3,3	2,6
Gasolina	4,2	2,6

### 6.3.7 Aspecto Econômico

No plano econômico obteve-se um gerador com baixo custo de implantação e operação, bem como de rápida instalação. Este sistema inclusive pode ser usado sempre que existir a geração espontânea de biogás, por exemplo, em indústrias que processem material orgânico ou sistemas de tratamento de esgotos.

Para se estimar os custos operacionais devem-se observar os parâmetros definidos nas equações (3.18) e (3.19). Estes podem ser divididos em troca de óleo e manutenções eventuais. Considerando que cada troca de óleo tenha de ser feita a cada 250 horas, envolva 4 litros de óleo ao custo de US\$ 2,5 por litro. E o custo de manutenções eventuais ficou em US\$ 6,10. Encontra-se então um valor de US\$ 0,07 como custo operacional por hora.

O protótipo, considerando uma vida útil de 2000 horas, tem potência de 5 kW a um custo aproximado de operação de US\$ 0,07 por hora, considerando-se ainda o seu custo de implantação zero. O valor do kWh estaria em torno de US\$ 0,014. Se o protótipo fosse operado com gasolina, o kWh custaria US\$ 1,58, pois o custo de operação passaria a US\$ 7,91 por hora, considerando o custo da gasolina em US\$ 1,17. A grande diferença de custos encontrada se deve à gratuidade do biogás.

O biogás é considerado gratuito porque a retirada do biogás formado do interior do aterro não é uma opção, mas uma necessidade. Uma vez que pode provocar refluxo de lixívia por aumento da pressão interna do aterro, e ainda se não for convenientemente captado acabará escapando para a atmosfera sem a possibilidade de queima ou com o potencial de provocar incêndios no próprio aterro. Além disso, o aumento dos custos em função da concentração da captação para uso energético representa um acréscimo muito pequeno em relação ao custo total do sistema de retirada de biogás.

O custo aproximado de implantação de um equipamento semelhante ao usado em Porto Alegre e com potência de até 40 kW é menor que US\$ 3.000,00, e teria o mesmo custo de operação do protótipo. Esta estimativa aponta para um custo de instalação, conforme a equação (3.20), de surpreendentes US\$ 75.000,00 por MW instalado, sem considerar possível economia de escala, ante os US\$ 600.000,00 a US\$ 800.000,00 preconizados pelo Banco Mundial em Terraza *et al.* (2003) ou de aproximadamente US\$ 340.000,00 com o uso de grupos geradores comerciais, como no trabalho de Pecora (2006). Um sistema como esse poderia gerar mais de 80MWh em sua vida útil. Com um custo total de, aplicando as equações (3.18) e (3.19), aproximadamente US\$ 0,04 por kWh ou, conforme a equação (3.21), US\$ 39,25 por MWh. Não se propõe aqui a geração de energia em um único parque, por esse meio, na ordem de grandeza de megawatts; no entanto, vários empreendimentos poderiam chegar a esse montante. A determinação do valor para o MWh é importante para a comparação com a mesma quantidade de energia ofertada em larga escala no Brasil, ANEXO III, tabela III.1. Nota-se que os custos de produção são semelhantes aos preços ofertados, principalmente nos mercados sul e sudeste, justamente onde a produção de biogás tem maior potencial devido às atividades industriais, sociais e econômicas serem mais intensas.

O potencial econômico dos créditos de carbono que poderiam ser comprados por países desenvolvidos é significativo, levando-se em conta que o metano tem um potencial vinte e uma vezes maior que o dióxido de carbono para o incremento do efeito estufa. Então, ao se queimar uma tonelada de metano, se estará deixando de emitir aproximadamente dezoito toneladas de dióxido de carbono. Portanto, para um empreendimento do porte do aterro da Extrema poder-se-ia vender estes créditos de carbono, conforme a expressão (3.22), amealhando um valor próximo a US\$ 5.260.000,00 em vinte anos. Isto sem contar o potencial de geração elétrica que poderia ser utilizado se fosse instalado em um aterro semelhante ao da Extrema. Um sistema gerador de baixo custo, que aproveitasse todo o seu potencial, poderia levantar ao longo dos vinte anos de operação do aterro vendendo energia elétrica no varejo, já descontado o ICMS e o investimento de instalação US\$ 11.330.000,00.

A tabela 6.10 apresenta o tempo contínuo de operação do sistema entre falhas, o tipo de falha e o custo de reparo. Com esse dados é possível determinar o TMEF (tempo médio entre falhas) ou MTBF (do inglês: *Medium Time Between Failures*) que fica em torno de 112 horas. O custo considerado é o de compra de peças; a mão-de-obra não é considerada. O custo de manutenção médio ficou em torno de US\$ 0,03 por hora.

### 6.3.8 Aspectos sociais

Embora os aterros sanitários sejam preferencialmente instalados em áreas distantes das áreas urbanas, e normalmente já degradadas, não é raro encontrar comunidades que ficam relativamente próximas desses equipamentos, e por isso enfrentam uma série de novos problemas. Uma forma de compensar esses transtornos seria o oferecimento de energia a baixo ou nenhum custo para a comunidade. Também é possível a ampliação da iluminação pública, entre outras possibilidades.

Ambientalmente, o sistema representa um ganho por se tratar de um combustível renovável, que de qualquer forma seria produzido e, na melhor das hipóteses queimado. O sistema pode permitir a sustentabilidade do aterro sanitário, uma vez que a energia gerada pode ser usada no manejo do mesmo, inclusive no bombeamento e estabilização de efluentes líquidos.

### 6.3.9 Análise exergética

Em uma estação de esgoto, por exemplo, existe um fluxo contínuo de entrada e saída de exergia. Em um aterro sanitário alguns fluxos ocorrem de forma discreta em intervalos de tempo diferentes da duração total do empreendimento. Qualquer análise, portanto, deve levar em conta toda a vida útil do aterro, considerando os fluxos exergéticos médios, fazendo-se uma análise estática, mesmo que alguns fluxos se concentrem no início das atividades e outros no final.

A principal entrada exergética corresponde à exergia total dos resíduos sólidos depositados, cuja composição é apresentada na tabela 2.7, a energia elétrica consumida nos processos de manuseio e conservação do aterro.

A principal saída exergética corresponde à saída de biogás do aterro, que atualmente é apenas queimado e convertido quase que totalmente em dióxido de carbono e vapor d'água. As outras saídas correspondem aos efluentes líquidos com pré-tratamento em lago de estabilização, o tratamento realizado fora, em estação de tratamento de esgoto, o que implica em exergia consumida em transporte de efluentes, será desconsiderado a exergia consumida no transporte dos resíduos sólidos de seus pontos de origem até o aterro.

Estes fluxos de exergia estão representados na figura 6.23, segundo proposta de Makarytchev 1997.

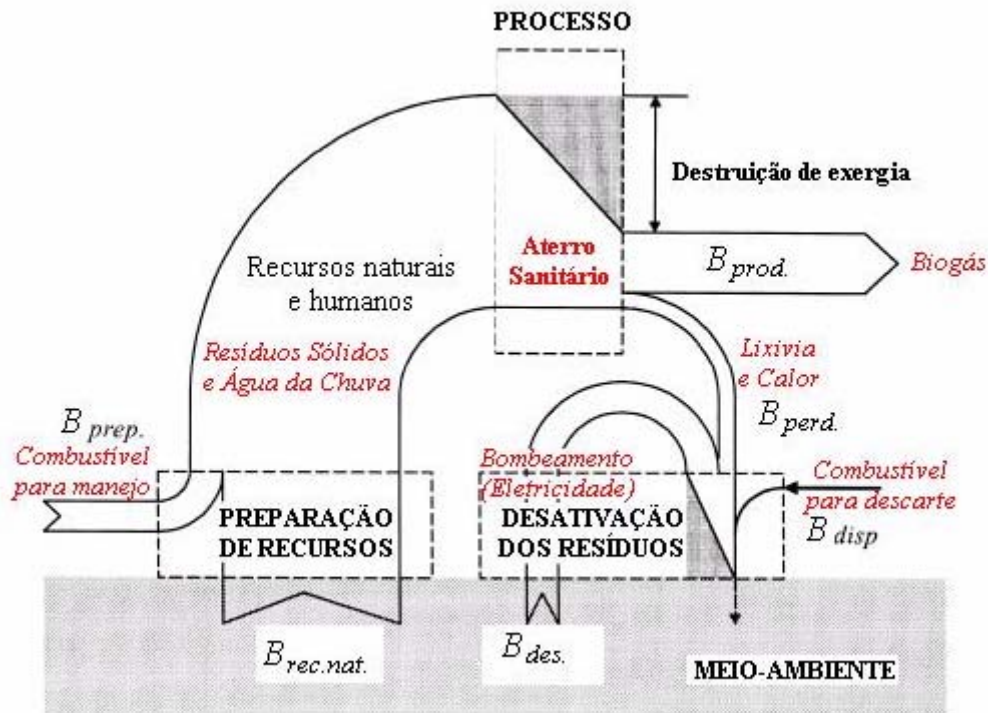


Figura 6.23 – Fluxos de exergia em um aterro sanitário.

Considerando as tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, a partir dos valores de exergia tabelados em Szargut (1988), é adequado admitir que a exergia dos resíduos sólidos urbanos seja aproximadamente igual ao poder calorífico destes resíduos cujo valor é de cerca de 5430 kJ/kg, conforme apresentado em Camilo *et al.* (2003) e CENBIO/INFOENER (2007). Com a massa depositada no aterro pode-se avaliar a exergia de entrada de resíduos sólidos urbanos (o valor médio considerado constante ao longo de 20 anos). A partir dos dados fornecidos pelo DMLU pode-se determinar a entrada de energia elétrica. A entrada de água da chuva pode ser determinada a partir dos fluidos retirados que percolam no aterro e são removidos diariamente. O consumo no transporte desta lixívia corresponde ao consumo médio de combustíveis para transporte. A exergia de preparação foi estimada a partir do número de horas e do tipo de máquina utilizada no manejo dos resíduos no aterro. Estas estimativas estão apresentadas na tabela 6.14.



Tabela 6.14 – O fluxo médio das diversas variáveis para avaliação exergetica.

Variável	Natureza	Exergia em kW	Fluxo médio de massa em kg/s
Recursos naturais e humanos $B_{rec.nat.}$	Resíduos Sólidos Urbanos	7113	1,31
	Água da Chuva	26,46	0,53
	Total	7139,46	1,84
Preparação $B_{prep}$	Combustível manejo (diesel)	990	0,0221
Desativação $B_{des}$	Energia elétrica bombeamento e outros	2,1	-
Perdas $B_{perd}$	Lixívia	27	0,54
	Calor do dióxido de carbono	0,088	-
	Calor do metano	0,187	-
	Calor da lixívia	2,08	-
	Dióxido de carbono	51,07	0,113
	Total	80,425	0,741
Disposição $B_{disp}$	Combustível descarte (diesel)	18,8	0,00042
Produto útil $B_{prod}$	Metano	4777	0,0919

Para a exergia de saída foram admitidas quatro situações: situação ideal, onde o metano gerado entregue como *commodity* e toda sua exergia é utilizada em sucessivos processos de co-geração; geração + 20%, com um sistema geração de baixo custo semelhante ao utilizado, mas com o melhor rendimento térmico possível associado à utilização de pelo menos 20 % do calor rejeitado para, por exemplo, aquecimento de água, aquecimento de estufas para produção de hortaliças ou cogumelos, ou ainda para a calefação de prédios próximos; gerador de baixo custo, com um sistema de geração semelhante ao estudado, mas com melhor rendimento térmico possível, sem outros aproveitamentos do calor rejeitado; queima simples, isto é, com o sistema atual de queima do metano em *flares*.

Aplicando-se então as equações (3.11) e (3.12), é possível determinar os indicadores ambientais eficiência exergetica ambiental,  $\eta_{ex,amb.}$ , e a razão de poluição total,  $R_{pol}$ , para as situações propostas, o que é apresentado na tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Indicadores exergeticos ambientais para as situações propostas para o aterro sanitário.

Indicadores	Situação ideal	Geração + 20%	Gerador de baixo custo	Queima simples
Eficiência exergetica ambiental, $\eta_{ex,amb}$	0,59	0,22	0,12	0,015
Razão de poluição total $R_{pol}$	0,017	1,8	3,8	39

Portanto, não existindo aproveitamento do biogás, a eficiência exergética ambiental é praticamente zero, enquanto a razão de poluição total é cerca de dez vezes maior do que no caso do uso do gerador de baixo custo.

Uma análise de forma dinâmica dos indicadores ambientais também é possível, porém os resultados tendem a ser semelhantes à análise estática, após o fechamento do aterro. Para isso consideram-se os fluxos de exergia dos recursos naturais e humanos, de produto útil e as perdas de exergia, com exceção da lixívia (considerada constante), variáveis conforme as variações do fluxo de biogás do aterro estimados pelo *software* LandGem, apresentado na figura 2.13. Além disto, considera-se a exergia de manejo como uma média somente para os anos em que os resíduos foram depositados. Com isso obtém-se curvas dos indicadores ambientais eficiência exergética ambiental,  $\eta_{ex,amb}$ , e a razão de poluição total,  $R_{pol}$ , para os vinte anos de vida útil do aterro sanitário da Extrema, apresentados na figura 6.24 e figura 6.25, respectivamente.

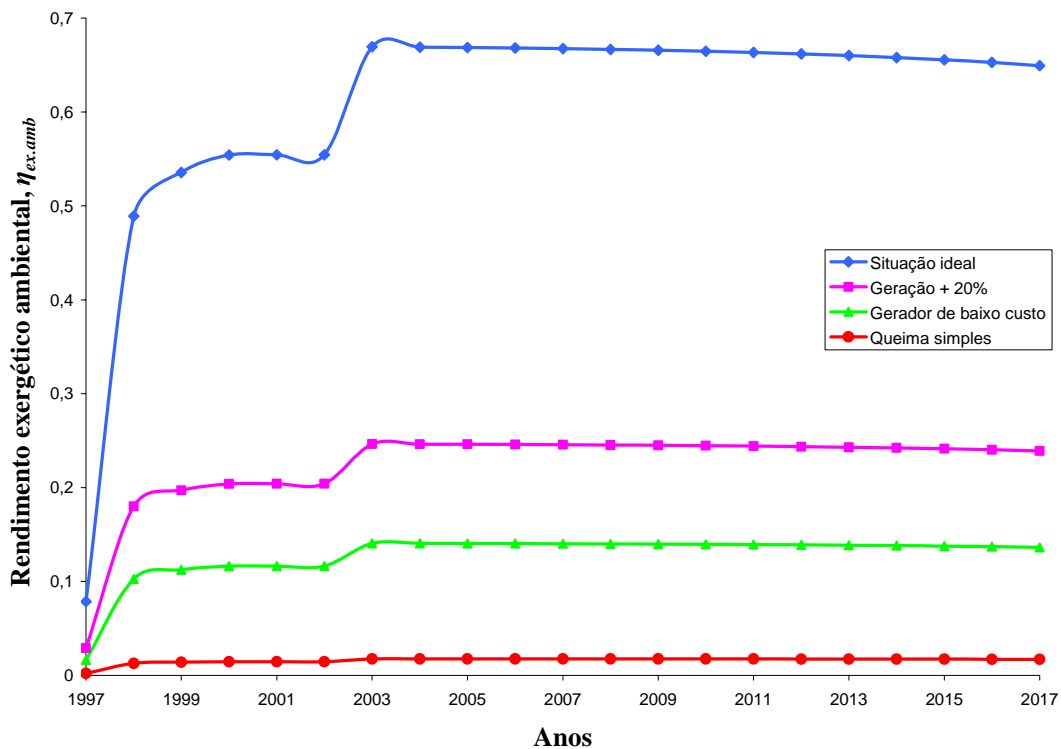


Figura 6.24 – Variação do indicador eficiência exergética ambiental ao longo dos anos.

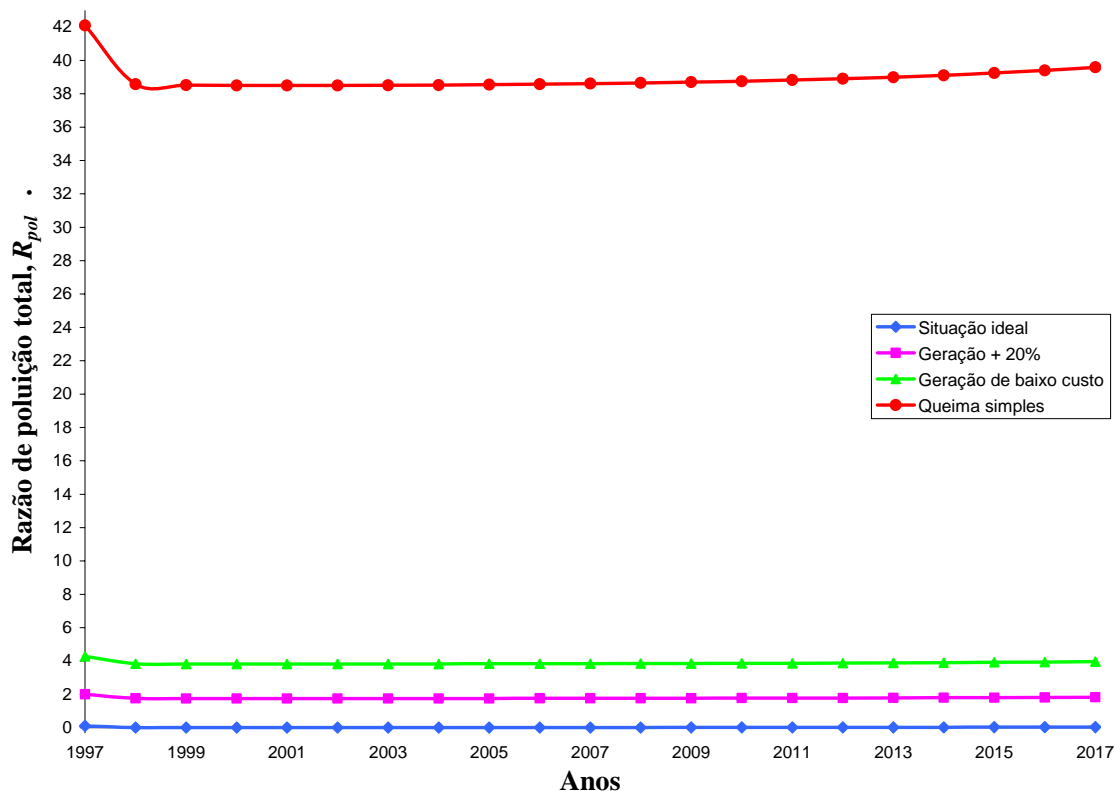


Figura 6.25 – Variação do indicador razão de poluição total ao longo dos anos.

Observando as curvas das figuras 6.24 e 6.25, pode-se observar que, no caso do indicador eficiência exergética ambiental houve variações significativas apenas até o ano seguinte ao fechamento do aterro, estabilizando-se no período subsequente em valores um pouco acima dos médios apresentados na tabela 6.15. Isto devido à exergia de manejo ter se reduzido a zero depois do fechamento do aterro. Para o indicador razão de poluição total, a aproximação com os valores médios foi ainda mais sensível; praticamente só houve variações significativas para a queima simples de biogás no primeiro ano de operação.

No caso do aterro da Extrema houve uma recuperação topográfica, que de qualquer forma deveria ser feita. Em uma recuperação topográfica feita com aterro inerte, existe apenas exergia de entrada, não existindo de saída. Portanto é extremamente desfavorável em termos exergéticos. Quando a recuperação topográfica é feita com o uso de resíduos sólidos urbanos podem-se obter resultados ambientais mais interessantes no que tange à sustentabilidade dos processos - naturalmente que seguidas uma série de premissas de utilização racional dos recursos energéticos dali provenientes.

Para o sistema gerador tem-se que a entrada corresponde ao ar atmosférico somado ao biogás e à saída corresponde a energia elétrica gerada como exergia útil produzida, além dos gases de escapamento, o óleo lubrificante degradado e o calor trocado com o ambiente, que

representam as perdas exergéticas. Embora parte dos gases de escape represente uma melhoria ambiental por prover da conversão de metano em dióxido de carbono. O fluxo de exergia no sistema de geração é representado esquematicamente na figura 6.26, segundo a proposta de Makarytchev (1997).

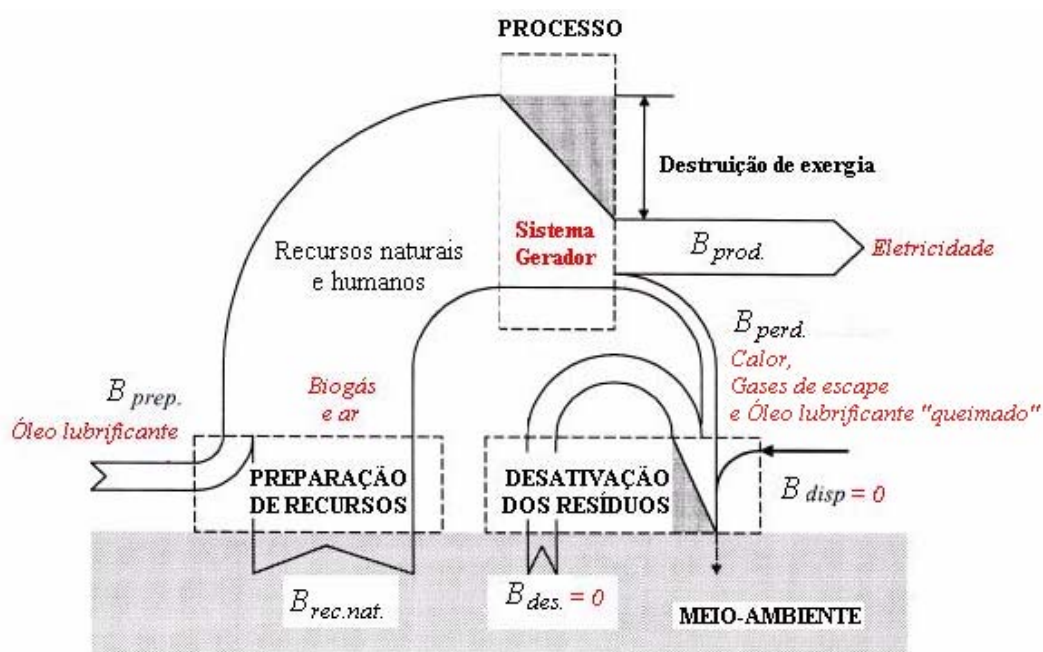


Figura 6.26 – Fluxo de exergia no sistema de geração.

Para facilitar a análise exergética foi tomada como base a curva apresentada na figura 6.4, que representa o consumo específico por potência gerada, de onde se podem determinar os fluxos de matéria envolvidos na transformação de energia térmica no sistema e o valor da potência elétrica, respectivamente. Foram adotados os resultados para o menor consumo específico medido. A partir dos valores de exergia tabelados em Szargut (1988) para as diversas substâncias, é possível determinar a exergia do ar atmosférico e biogás. Considerando-se o regime de operação estequiométrico, que é o mais favorável para motores com combustível gasoso, e os dados sobre emissão gasosa levantados, foi estimado o volume, composição média dos gases de escape e a respectiva exergia química. A exergia do óleo lubrificante foi determinada a partir do poder calorífico do óleo lubrificante usado, de aproximadamente 41800kJ/kg, apresentado em CEMPRE (2007).

Tabela 6.16 – O fluxo médio das diversas variáveis para avaliação exergetica do sistema de geração.

Variável	Natureza	Exergia em kW	Fluxo médio de massa em kg/s
Recursos naturais e humanos $B_{rec.nat.}$	Biogás	16,6	0,000672
	Ar atmosférico	0,257	0,00531
	Total	16,9	0,00598
Preparação $B_{prep}$	Óleo lubrificante	0,186	0,00000444
Perdas $B_{perd}$	Calor	15,6	-
	Gases de escape	1,45	0,00598
	Óleo lubrificante (queimado)	0,186	0,00000444
	Total	17,2	0,00598
Produto útil $B_{prod}$	Energia elétrica	1	-

Para a exergia de saída do motor foram admitidas três situações: protótipo, onde os indicadores ambientais são determinados a partir dos dados medidos constantes na tabela 6.16; geração + 20%, a partir de uma estimativa com um sistema geração de baixo custo semelhante ao utilizado, mas com o melhor rendimento térmico possível associado à utilização de pelo menos 20 % do calor rejeitado para, por exemplo, aquecimento de água, aquecimento de estufas para produção de hortaliças ou cogumelos, ou ainda para a calefação de prédios próximos; gerador estimado, uma estimativa de operação com um sistema de geração semelhante ao estudado, mas com melhor rendimento térmico possível, sem outros aproveitamentos do calor rejeitado; queima simples, isto é, com o sistema atual de queima do metano em *flares*.

O consumo específico de combustíveis de um motor está associado à sua potência de saída, o que pode ser observado na figura 3.17. Onde aparece um plano cotado da relação entre *p.m.e.*, rotação, potência de saída e consumo específico. O protótipo trabalhou abaixo da menor curva do plano cotado, portanto é possível admitir que para um ajuste de rotação e potências próximas a plena carga, o sistema possa gerar até 3,5 vezes mais energia elétrica com os mesmos fluxos de exergia.

Aplicando-se então as equações (3.11) e (3.12), é possível determinar os indicadores ambientais eficiência exergetica ambiental,  $\eta_{ex.amb.}$ , e a razão de poluição total,  $R_{pol}$ , para as situações propostas, o que é apresentado na tabela 6.17.

Tabela 6.17– Indicadores exergeticos ambientais para as situações propostas para o sistema gerador.

Indicadores	Protótipo	Geração + 20%	Gerador estimado
Eficiência exergetica ambiental, $\eta_{ex,amb}$	0,058	0,39	0,20
Razão de poluição total $R_{pol}$	17	2,1	4,9

### 6.3.10 Estimativas para outros empreendimentos

Com relação à utilização desse sistema em empreendimentos menores, um equipamento semelhante que opere gerando 40kW de potência, segundo as curvas da figura 3.17, onde aparece um plano cotado da relação entre *p.m.e.*, rotação, potência de saída e consumo específico, apresentaria um consumo específico de biogás menor do que 0,691 kg/kW. Analisando, também, a distribuição de emissões de metano na figura 2.13, associado às quantidades e composições apresentadas nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, e realizando simulações com o *software* LandGEN. É possível afirmar que as quantidades de resíduos da mesma espécie para operação deste sistema hipotético, a pleno já a partir do segundo ano de operação do aterro, seriam da ordem de 16 toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos. No quarto ano poderia ser instalado um segundo gerador. No sexto um terceiro, supondo a deposição de resíduos constante e que um alto percentual do biogás seja captado - pelo menos 80%. Convém lembrar que, quando a produção se exaure em um determinado empreendimento, o sistema pode ser transportado com facilidade para outro.

## 7 CONCLUSÕES

No aspecto técnico o sistema é simples de ser executado. Operou por 295 horas descontinuamente, sendo o maior intervalo de utilização de 128 horas. O motor alternativo sujeito à ação do biogás não apresentou desgaste significativo, indicando que sua utilização tem viabilidade técnica. É apropriado para geração de energia elétrica em pequena e média escala, principalmente para o manejo do aterro e imediações. A energia gerada tem boa qualidade e pode ser empregada na grande maioria das utilizações. É possível implantá-lo em indústrias geradoras de biogás. O TMEF (tempo médio entre falhas) calculado está na faixa de 112 horas. Pode ser aplicado seguramente em aterros com deposição a partir de 16 toneladas por dia, com funcionamento a pleno no segundo ano de operação.

No plano econômico é mais barato que qualquer outro energético, uma vez que a energia elétrica que é produzida em pequena escala pode competir com a energia produzida em grandes empreendimentos, como hidroelétricas e termoelétricas, reproduzindo a varejo preços de atacado, conforme ANEXO III, tabela AIII.1. Junto com a venda de créditos de carbono, pode tornar um aterro sanitário lucrativo.

Em termos ambientais é renovável e sustentável, e reabilita um energético que antes era um problema. As emissões gasosas do motor não representam dano ambiental, uma vez que transformam metano em dióxido de carbono. A análise exergética ambiental em termos dos índices: eficiência exergética ambiental,  $\eta_{ex,amb}$ , e razão de poluição total,  $R_{pol}$ , apontou para a grande vantagem da utilização deste sistema em relação à queima simples do biogás, em uma proporção mínima de 8 e 10 vezes, respectivamente.

Socialmente pode ser empregado para eletrificar pequenas localidades próximas aos pontos de geração de biogás, em contrapartida aos transtornos criados a partir da instalação de um aterro.

Concluiu-se que o sistema pode ser implementado rapidamente, e tem viabilidade técnica, econômica, ambiental e social.

## 7.1 Dificuldades encontradas e sugestões para futuros projetos

A maior dificuldade encontrada foi a não preparação do aterro para o aproveitamento energético do biogás, apenas para sua queima em diversos pontos do aterro. Além de problemas de impermeabilização do mesmo, que permitiram a infiltração de grande quantidade de água, inviabilizando a captação do biogás por grandes períodos enquanto era executada a drenagem dos lixiviados.

Como sugestão para projetos de pesquisa ou de aproveitamento efetivo da energia proveniente do biogás de aterros sanitários, propõe-se que:

1º - exista uma única saída de biogás do aterro através da reformatação do sistema de captação de biogás.

2º - a impermeabilização do aterro seja feita conforme a proposta de Popov (2005).

3º - exista junto ao aterro um galpão ou sala onde possam ser instalados os equipamentos.

4º - seja utilizado um motor assíncrono de maior potência para que possam ser feitos testes em plena carga do motor de combustão interna operando com biogás.

5º - seja considerada a possibilidade de controle junto à entrada de ar, borboleta e banco de capacitores para que o motor possa operar sempre com mesma faixa de parâmetro lambda e com tensão e frequência reguladas.

6º - seja instalado um acoplamento entre motor e gerador, cujo conjunto de polias possa ser trocado com facilidade para teste do comportamento do motor com rotações variadas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, F. A. T, *et al.*, 2004. “Occurrence and Abatement of Volatile Sulfur Compounds during Biogas Production”. **Journal of the Air & Waste Management Association** 54 n°7 855-61 jl.

ANEEL ,2003.“Resolução n° 676”. Agência Nacional de Energia Elétrica.

ANJOS, I., REICHERT, G. A., 1997. “Aterro Sanitário da Extrema – Porto Alegre: Concepção de Projeto”. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu.

AQUACON ENGENHARIA<sup>®</sup>, 2006 -

[http://www.aquacon.com.br/Site\\_portugues/Acervo/aq080.htm](http://www.aquacon.com.br/Site_portugues/Acervo/aq080.htm).

ASHWORTH, J. *et al.*, 1996. **Mining the Urban Waste Stream for Energy: Options, Technological Limitations, and Lessons from the Field**. Office of Energy, Environment, and Technology – Center for Environment – Bureau for Global Programs, Field Support, and Research – United States Agency for International Development.

AZEVEDO, M. H., 2000. **Características, Produção e Utilização do Biogás Produzido a Partir de Resíduos Orgânicos**. Dissertação de Mestrado, Promec, Porto Alegre.

BANSAL, R. C., 2005. “Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview”. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol 20, n°2, june. issn 0885-8969.

BHATTACHARYA T. H., *et al.*, 1988. “A Compression Ignition Engine on Biogas-Diesel Fuel”. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, vol. 19 n° 3.

BISHOP, J., 2004. “Digester Gas Unpopular as Power Fuel”. **Water Environment & Technology** 16 n°7 24-6 jl.

BOSCH, 2006. <http://www.bosch.com.br/br/autopecas/produtos/velas/ciencia.htm>.

BOYLE, W. C. 1977. “Energy Recovery from Sanitary Landfills – A Review.” Apud **Microbial Energy Conversion**, Schlengel, H. G. and Barnea, J. Pergamon Press, New York, p. 119-138.

BRAZ, J. A., SILVA, C. L., 2001. “Avaliação do Potencial Energético do Biogás de Aterro Sanitário Gerado pelos Resíduos Sólidos Domésticos do Município de Rio Claro”. **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. João Pessoa.

BROOKSHIRE, R., 1999. “Don’t Forget the Fundamentals”. **Waste Age** 30 nº9 82+ Sep.

CAEEB, 1981. **O Biogás e Sua Tecnologia**. Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro.

CAMILO, Y. M. V. *et al.*, 2003. “Incineração”. **III Fórum de Estudos Contábeis**. Faculdades Integradas Claretianas: Rio Claro, SP.

CAMPANA, S. *et al.*, 2000. “Comparação entre métodos indiretos para determinação de parâmetros elétricos para adequação de força motriz”. In **Proceedings of the 3º Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas (SP, Brazil).

CANALENERGIA, 2006.

<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Negocios.asp?id=51620>

CAO, M., *et al.*, 1998: “Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change”. **Atmos. Env.**, **32**, 3293-3299.

CENBIO/INFOENER, 2007. Centro Nacional de Referência em Biomassa/ Sistemas de Informações Energéticas. [http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br\\_residuos.asp](http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_residuos.asp).

CEMPRE, 2007, Compromisso Empresarial para Reciclagem, [http://www.cempre.org.br/fichas\\_tecnicas.php?lnk=ft\\_oleo\\_usado.php](http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas.php?lnk=ft_oleo_usado.php)

CENTROPROJEKT, 2006

[http://www.comunicacaoambiental.com.br/site2004/images/centroprojekt\\_tratamento.jpg](http://www.comunicacaoambiental.com.br/site2004/images/centroprojekt_tratamento.jpg).

CHEREMISINOFF, P. N. AND MORRESI, A. C. 1976. **Energy from Solid Wastes**. Marcel Dekker, Inc., New York.

COHEN, S., 1999. “Small Landfills, Big Benefits”. **Waste Age** 30 nº5 228-31 My 1999.

COSTELLO, S., 2005. “Direct link between electric customers and dairy farms”. **BioCycle** 46 nº3 Mr.

- CSPE, 2005, “Comissão de Serviços Públicos de Energia”,  
<http://www.cspe.sp.gov.br>.
- DECARLO, J. P., 1984. **Fundamentals of Flow Measurement**. Instrument Society of America, North Carolina.
- DLUGOKENCKY, E.J., *et al.*, 1996: “Changes in CH<sub>4</sub> and CO growth rates after the eruption of Mt. Pinatubo and their link with changes in tropical tropospheric UV flux”. **Geophys. Res. Lett.**, **23**, 2761-2764.
- DLUGOKENCKY, E.J., *et al.*, 1998: “Continuing decline in the growth rate of the atmospheric methane burden”. **Nature**, **393**, 447-450.
- DMLU, 2004, Departamento Municipal de Limpeza Urbana. Edital de Licitação Concorrência n° 013-5.2948.04.4.000. Porto Alegre.
- EMCOM Associates, 1980. **State of the Art of Methane Gas Enhancement in Landfills**, San Jose, California.
- EPA, 2006, *United States Environmental Protection Agency*  
<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#cccinfo>
- ESCOBEDO, J. J. B., *et al.*, 2005. “Use of biogas on small power generators”. **Proceedings of COBEM 2005** -- ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 6-11, Paper 0969.
- ETHERIDGE, D.M., *et al.*, 1998: “Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability”. **J. Geophys. Res.**, **103**, 15979-15993.
- FALCONE, A.G., 1995. **Motores de Indução: Manutenção e Instalação**. São Paulo, IBC.
- FICKES, M., 2006. “Landfill Helps Build BMWs”. **Waste Age** 34 n°8 Ag. WN: 0321300158004
- FUNG, I., J. *et al.*, 1991. “Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle”. **J. Geophys. Res.** 96, 13033-13065.
- GIACOSA, D., 1988. **Motores Endotérmicos**. Barcelona: Ed. Omega.
- GOLDSTEIN, J., 2002. “Electric utilities hook up to biogas”. **BioCycle** 43 n°3 Mr.

GOLDSTEIN, J., 2003. "Power Base Builds For Biogas, Biodiesel and Hydrogen". **BioCycle** 44 n°12 dec. WN: 0333504232007

GOLDSTEIN, J., 2004. "Making a Reality of Biogas Potential". **BioCycle** 45 n°12 dec WN: 0434604232007

GONG, M., 1999, "On Exergy as an Ecological Indicator". Master of Science Thesis, Department of Physical Resource Theory, **Chalmers University of Technology and Göteborg University**, Göteborg, Suécia.

HAN R. K., *et al.* 1979. **Recovery, Processing, and Utilization of Gas from Sanitary Landfills**. EPA-600/2-79-001.

HAN, R. K. 1979. "Predicting Gas Generation from Landfills", **Waste Age**, 10(11): 50-58.

HAUG, T., *et al.*, 2000. "Using Wastewater digesters to recycle food residuals into energy". **BioCycle** 41 n°9 sep.WN: 0024504232022

HEIN, R., P.J. *et al.*, 1997: "An inverse modeling approach to investigate the global atmospheric methane cycle". **Global Biogeochem. Cycles**, **11**, 43-76.

HELLSTRÖM, D., 1997, "An Exergy Analysis for a Wastewater Treatment Plant : an estimation of the consumption of physical resources", **Water Environment Research**, Vol. 69, pp. 44-51.

HERNANDEZ, G., *et al.*, 2002. "Los Angeles Digesters Produce Energy from airport Food Residuals". **BioCycle** 43 n°1 ja.

HOMRICH, R.P., *et al.*, 1994, "Three-phase Asynchronous Generation Using Three-phase Induction Motor". **Proceedings of the 4th Electric Section Materials Seminar**, Curitiba, Brazil, pp. 581-590.

HOUWELING, S., *et al.*, 1999: "Inverse modeling of methane sources and sinks using the ad joint of a global transport model". **J. Geophys. Res.**, 104, 26137-26160.

HUANG, J. , CROOKES, R. J., 1998. "Spark-ignition engine performance with simulated biogas – a comparison with gasoline and natural gas". **Journal of the Institute of Energy** 71 n° 489 197-303 dec.

IPCC, 2001. **Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis**.  
[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm) (2007)

KAJIMA, 2006. <http://www.kajima.co.jp>

KEPPLER, F. J. T. G. *et al.*, 2006. “Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions”. **Nature**, January 12.

KUMAR, S., *et al.*, 2004. “Estimation method for national methane emission from solid waste landfill”. **Atmospheric Environment** 38 . 3481-3487.

LATA, K., *et al.*, 2002. “Assessment of biomethanation potential of selected industrial organic effluents in India”. **Resources, Conesevation and Recycling** V35 i3 May, p147-161.

LEITE, L.E.C., MONTEIRO, J. H. P., 2005. “Aterros Sanitários e Créditos de Carbono: oportunidades para ajudar a resolver o problema ambiental”. **IBAM – Municípios – Revista de Administração Municipal**, jan., Rio de Janeiro.

LELIEVELD, J., *et al.*, 1998: “Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane”. **Tellus**, **50B**, 128-150.

LEVY, E., LIAO, Y. W., 2000. “An experimental investigation of self-excitation in capacitor excited induction generators”. **Electric Power Syst. Res.**, vol 3, pp. 59-65.

LIMA, L. Q. M. 1991, **Tratamento de Lixo**, Hemus, São Paulo.

MAKARYTCHEV, S. V., 1997, “Environmental Impact Analysis of ACFB-Based Gas and Power Cogeneration”, **Energy**, Vol. 23, No. 9, pp. 711–717.

MICHEREFF, S. J., 1979, **Projeto Biogás**. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Jaboticabal

MORA, B. C. H., AND OLIVEIRA, Jr. S., 2004, “Exergy Efficiency as a Measure of the Environmental Impact of Energy Conversion Processes”, in: 17th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization and Environmental Impact of Energy Systems- **ECOS 2004**, Guanajuato, Mexico, pp. 423-431. ISBN-968-489-027-3

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N., 2002. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro. Ed LTC, 4<sup>a</sup> ed.

MOSIER, A.R., *et al.*, 1998: “Mitigating agricultural emissions of methane”. **Clim. Change**, **40**, 39-80.

MOTEC, 2006. <http://www.motec.com.au>

MURPHY, J. D., *et al.*, 2004. “Technical/economic/environmental analysis of biogas utilization”. **Applied Energy** **77**, 407-427.

NETRESIDUOS, 2006. <http://www.netresiduos.com/cir/rsurb/aterros.htm>

NICHOLS, S., 2001. “There’s gas in them thar hills”. **Waste Age** **32** nº10 oct. WN:0127400158002

NOGUEIRA, L. A. H., 1992, **Biodigestão a Alternativa Energética**. Nobel, São Paulo.

OLIVIER, J.G.J., *et al.*, 1999: “Sectoral emission inventories of greenhouse gases for 1990 on a per country basis as well as on 1×1”. **Envir. Sci. Policy**, **2**, 241-263.

PARK, D., *et al.*, 2005. “Comparison of different bioreactor systems for indirect H<sub>2</sub>S removal using iron-oxidizing bacteria”. **Process Biochemistry** **40**, 1461-1467.

PECORA, V., 2006. **Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento de Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso**. 152pp Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE.

POPOV, V., 2005. “A new landfill system for cheaper landfill gas purification”. **Renewable Energy** **30**, 1021-1029.

QUICKBIRD®, imagem de satélite, apud DMLU – Edital de Licitação Concorrência nº 013-5.2948.04.4.000. Porto Alegre, 2004.

RANT, Z.,” Exergy, A New Word for ‘Technical Available Work’(in German)”, **Forsch. Ing.Wes.**, Vol. **22**, nº1, pp. 36-37,1956.

RAVEN, R.P.J.M., Gregersen, K. H., 2005. “Biogás Plants in Denmark: successes and setbacks”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **xx**, 1-18.

REAGIN, M., 2002. “Turned on by Trash”. **American City & County** **117** nº1 Ja. WN: 0200104687010

REIS, M. F. P. *et al.*, 2003. “Caracterização dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de Porto Alegre/RS Ano 2002”. **Anais do I Congresso de Agroecologia**, Porto Alegre.

RHYNE, C. W. AND JAMES, S. C., 1978. “Methane Production, Recovery, and Utilization from Landfills”, **Energy from Biomass and Wastes**, Institute of Gas Technology, Chicago, p. 317-324.

RIEKERT, L., 1974. “The Efficiency of Energy Utilization in Chemical Processes”. **Chem. Eng. Sci.**, vol. 29, pp. 1613-1620.

ROSEN, M. A., AND DINCER, I., 1997, “On Exergy and Environmental Impact”, **International Journal of Energy Research**, Vol. 21, No. 7, pp. 643-654.

ROSS, C.C., DRAKE, T. J., 1996. **The handbook of biogas utilization**. U. S. :Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program Tennessee Valley Authorith, Muscle Shoals, Alabama, Second Edition.

RYNK, R., GOLDSTEIN, J., 2002. “Biogas, Biodiesel and Bioproducts Rev up for Action”. **BioCycle** 43 n°12 dec. WN: 0233504232007

SABESP, 2006. <http://www.esabesp.com.br>

SAMPAT, P., 1995. “India’s Low-Tech Energy Success”. **World Watch** v8 p21-3 N/D. WBN: 9530500055006

SCHMIDT, F., 1999. “Valoración del biogas en un relleno sanitario”. **Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos, SIGLO XXI**, Medellín, noviembre.

SCHUMACHER, M. M., 1983. **Landfill Methane Recovery**. Energy Technology Review- 84, Park Ridge, New Jersey, USA.

STEFAN, H., 2003. “Decentralized infrastructure saves system costs, produces biogas energy: decentralized water supply and wastewater treatment systems can reduce investment costs and help municipalities adapt with flexibility to local needs. (Water & Power)”. **Water and Waste Water International** 0891-5385 May, v18 i3, p28(2)

SZARGUT, J., *et al.*, 1988, **Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes**, New York: Hemisphere.

TERRAZA, H. *et al.*, 2003. “**Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe**”, World Bank, Whashington, DC.

TSAI, W. T., 2005. “Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** xx, 1-15.

VAN HERLE, J., *et al.*, 2004. “Biogas as a fuel source for SOFC co-generators”. **Journal of Power Sources** 127, 300-312.

VILLANUEVA, L. Z. D., 2002. **Uso de Gás Natural em Veículos Leves e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Contexto Brasileiro**. Tese (Doutorado) do Programa Interunidades de Pós Graduação da Universidade de São Paulo, p. 166.

WALL, G., 2006. **Exergy and Sustainable Development**. International Exergy Institute, Mölndal, Sweden, <http://www.exergy.se>

WALL, G., GONG, M., 2001, “On Exergy and Sustainable Development-part 1: Conditions and Concepts”, **Exergy**, Vol. 1, pp. 128-145.

WALTER, G. R., 2003. “Fatal Flaws in Measuring Landfill Gas Generation Rates by Empirical Testing”. **Journal of the Air & Waste Management Association** 53 p 461-468 april, issn 1047-3289.

WILTSEE, G., EMERSON, H., 2004. “Clean Power from Microturbines Using Biogas”. **BioCycle** 45 n°2 53-5 fev.



**ANEXO I**  
**DIAGRAMAS, PROGRAMA E DESCRIÇÕES SUCINTAS DAS ETAPAS DE**  
**FUNCIONAMENTO DO SERVOMECANISMO DE CONTROLE DE ROTAÇÃO EM**  
**FUNÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO EFICAZ DE UMA DAS FASES E DO CIRCUITO DE**  
**PROTEÇÃO.**

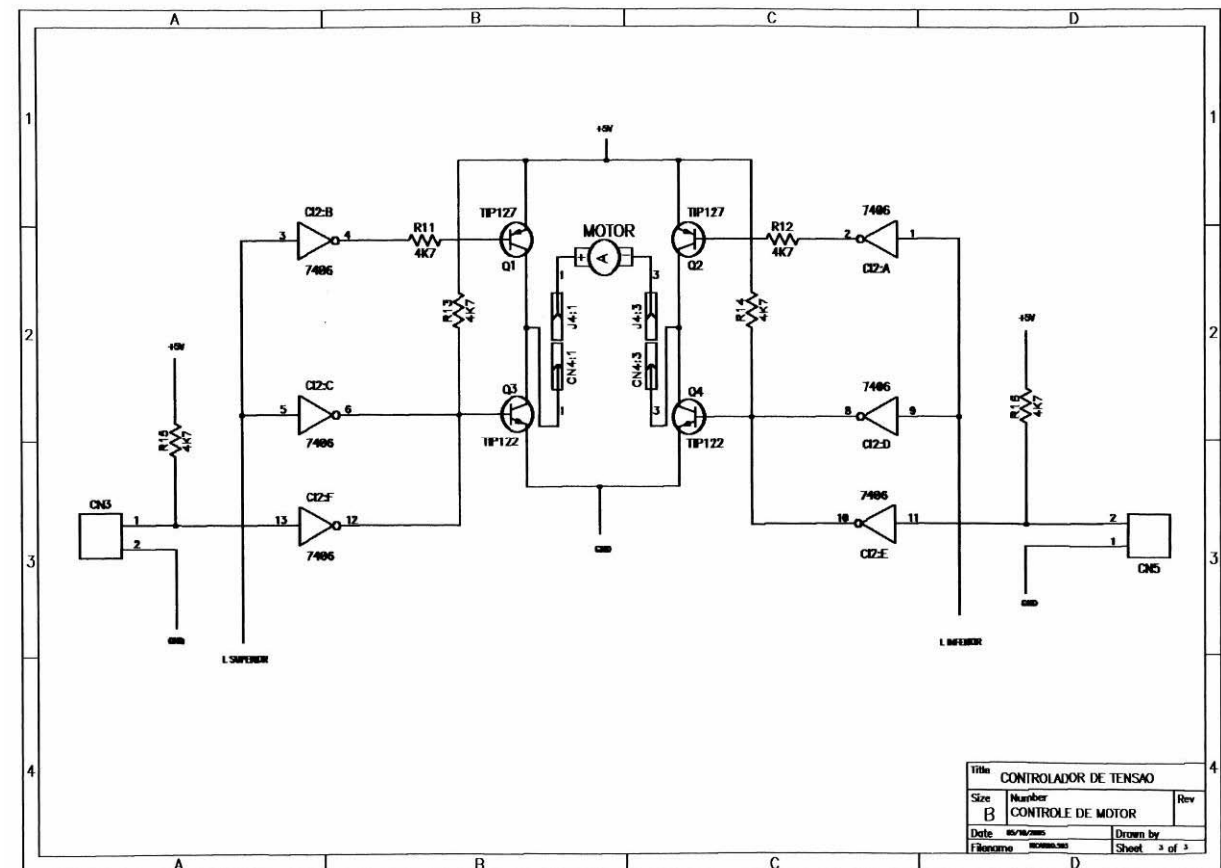


Figura I.1 – Controlador de tensão: etapa de controle de motor do atuador.

A etapa de controle de motor consiste de portas inversoras que normalmente estão recebendo sinal 1 e ao receberem um sinal zero da etapa processadora, através das conexões limite superior ou inferior, acionam os triac's para acionamento do motor, que são posicionados de tal forma que a polaridade do motor pode ser invertida conforme a informação recebida da etapa de processamento. Além destas possibilidades de controle existe o bloqueio manual ou através de sensores mecânicos em CN5 e CN3.

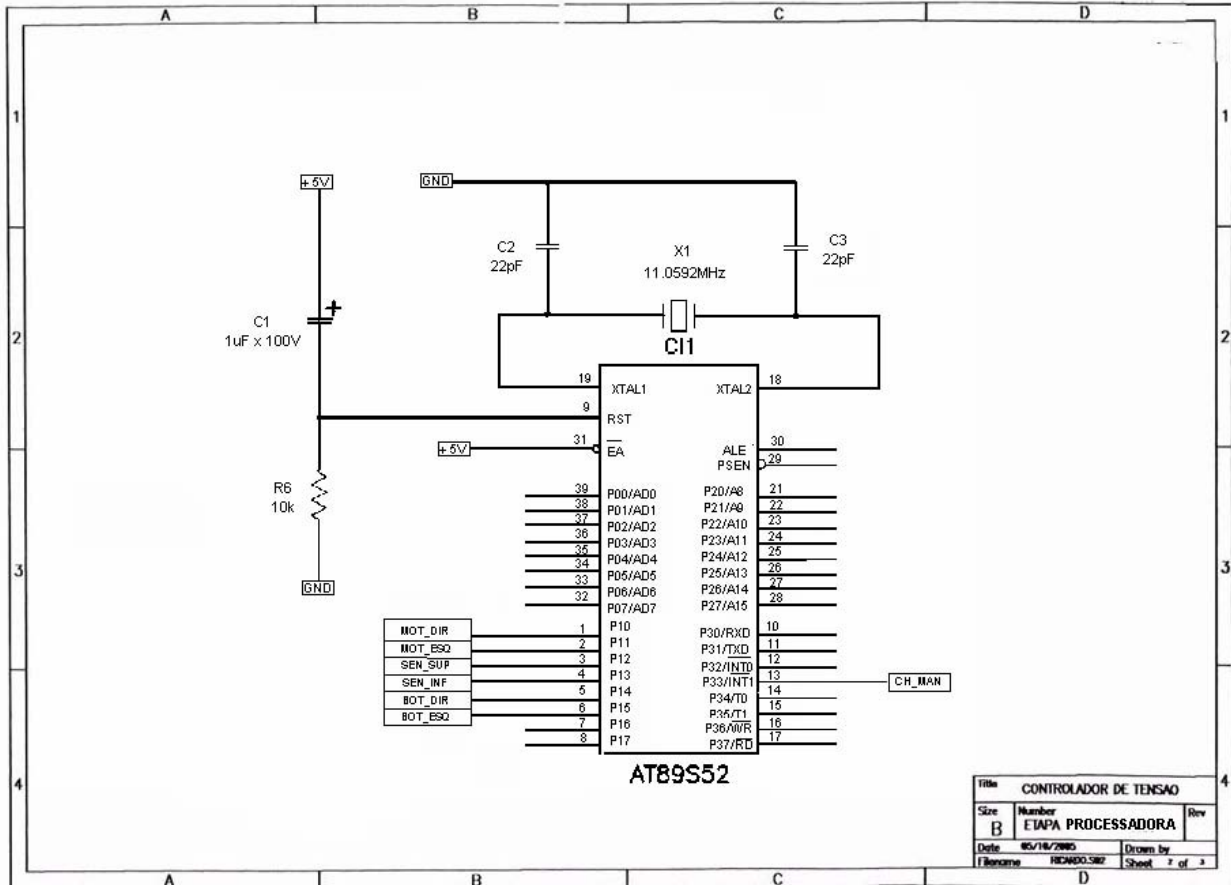


Figura I.2 – Controlador de tensão: etapa processadora.

A etapa processadora foi incluída no sistema para que o ajuste dos tempos de resposta do servomecanismo possa ser controlado por *software*, facilitando todo o processo. O programa gravado no CIP1 está apresentado neste mesmo anexo.

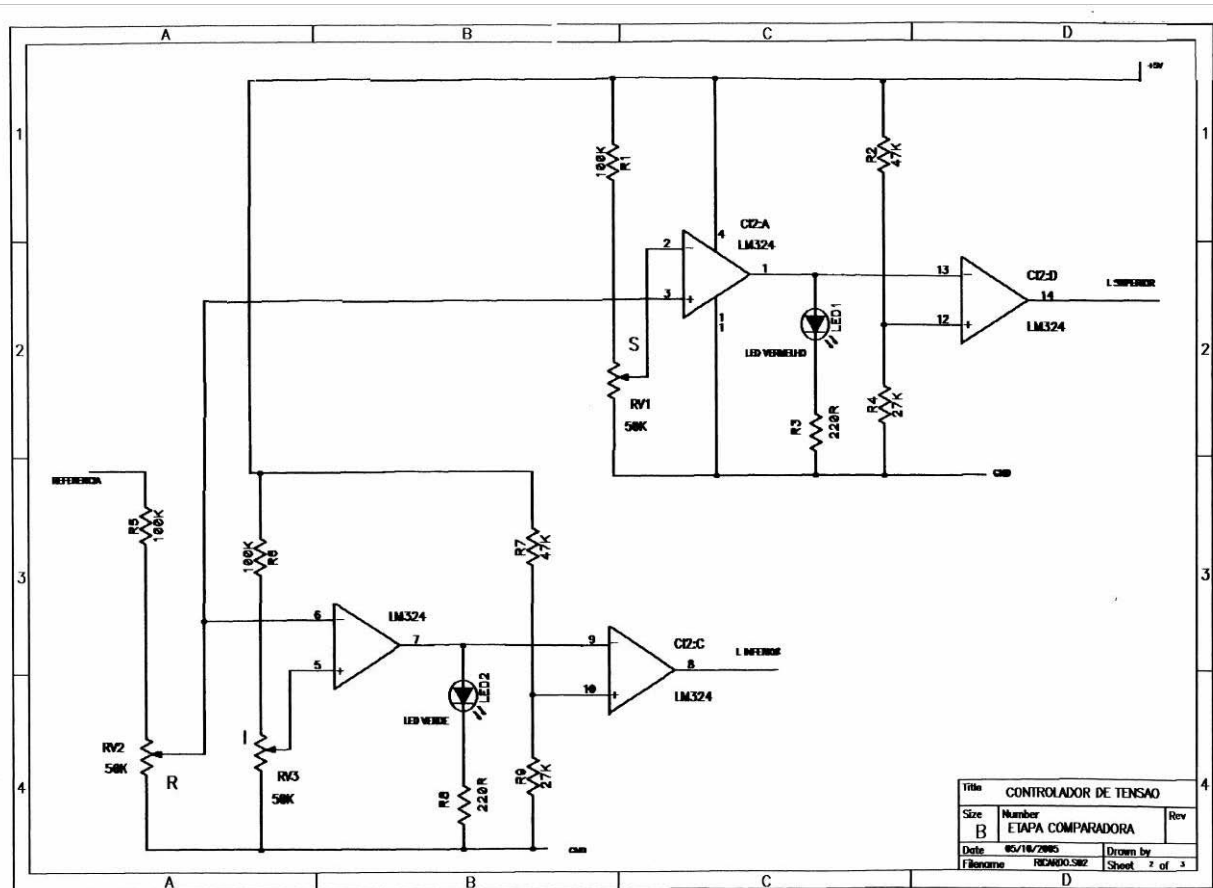


Figura I.3 – Controlador de tensão: etapa comparadora.

A etapa comparadora consiste do amplificador operacional LM524 para determinar os limites inferior e superior de tensão, em duas etapas, uma configurada para entrar em corte sempre que a tensão em seus pinos de entrada superar a tensão de referência ajustada no trimpot RV2, enviando um sinal para L Superior. A outra etapa ligada à saída L Inferior, trabalha de maneira análoga, porém atua quando a tensão for inferior à referência ajustada, de forma que existe uma janela de operação onde nenhum controle atua.

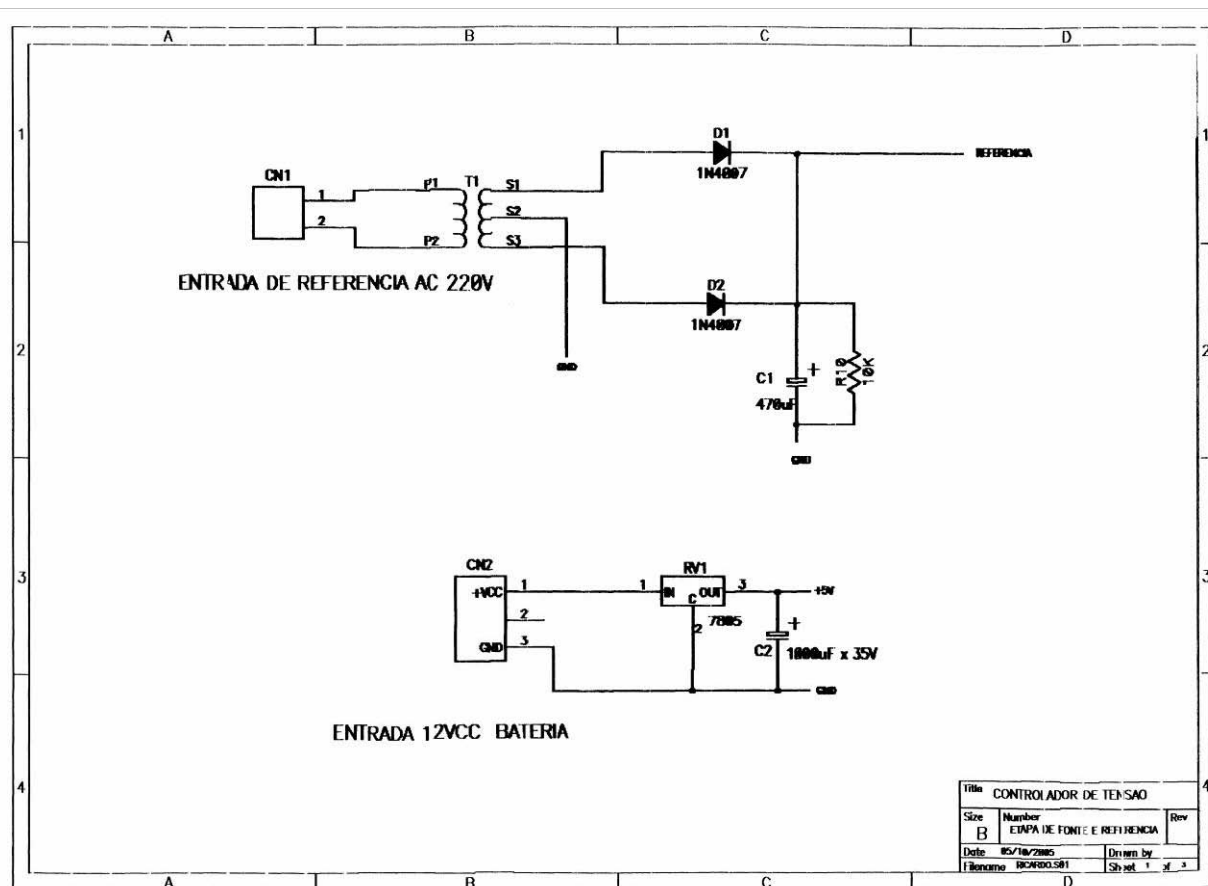


Figura I.4 – Controlador de tensão e circuito de proteção: etapa de fonte e referência.

A etapa de Fonte e Referência é comum ao controlador de tensão e ao circuito de proteção. É dividida em dois circuitos distintos: um corresponde à entrada de 12V que vem da bateria e é ajustada para 5V; o outro no qual a tensão alternada da fase R é transformada para um nível de baixa tensão de menos de 5V contínuo cuja variação representará com exatidão a variação do valor eficaz da tensão de saída. Este nível de tensão é enviado às etapas comparadoras do controlador de tensão e circuito de proteção.

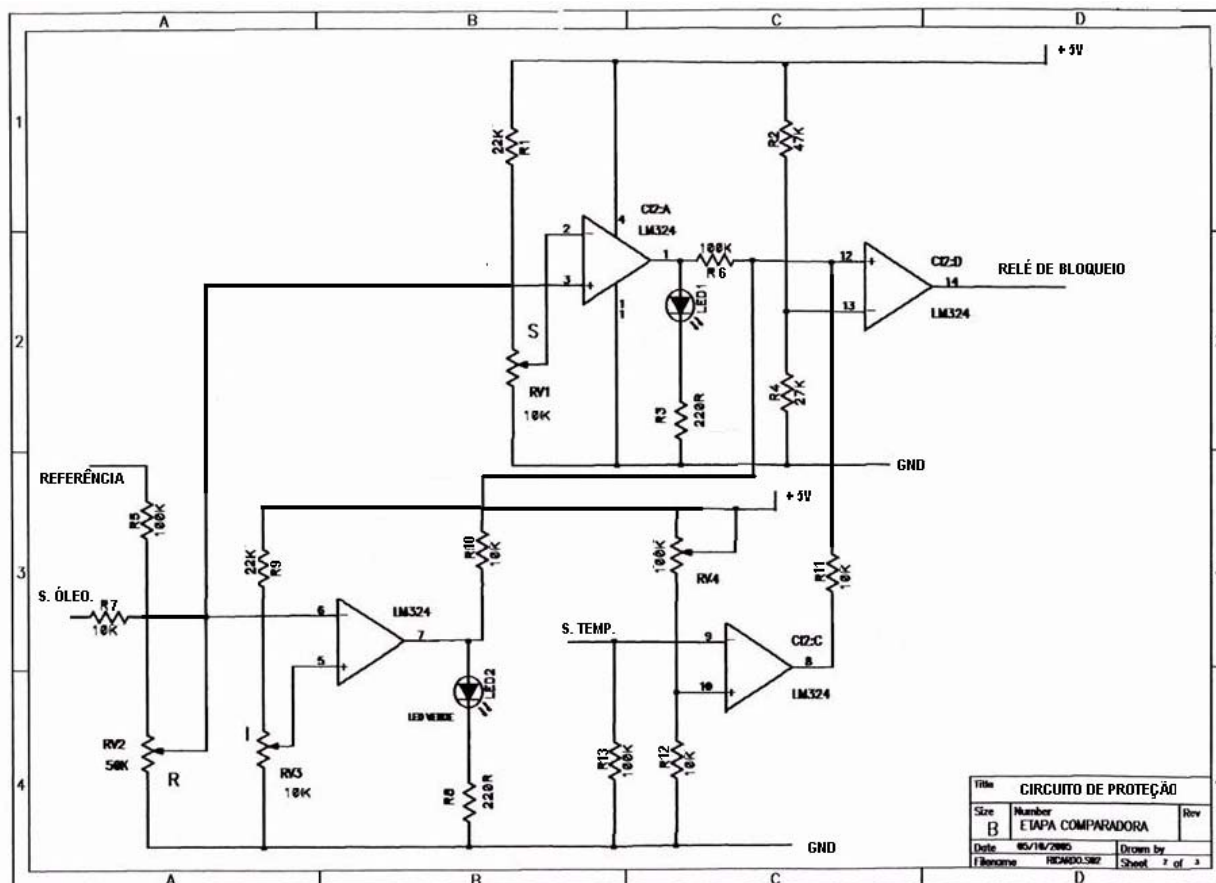


Figura I.5 – Circuito de proteção: etapa comparadora.

Esta etapa do circuito de proteção corresponde aquela em que os diversos sinais provenientes do sistema gerador são constantemente monitorados. Havendo variações fora do esperado, o circuito envia um sinal ao relé de bloqueio desligando o motor à combustão interna impedindo danos maiores ao sistema. São monitorados a tensão gerada, que deve estar entre 70V a 230V, a temperatura de arrefecimento, que não deve superar 110°C, e a pressão do óleo do motor que é a garantia do funcionamento da bomba de óleo do motor a combustão interna.

Este sistema é fundamental para que o sistema funcione de forma autônoma, com segurança.

```

;*****
;* TITULO: FIRMWARE PARA SERVO MECANISMO DE CONROLE DE
ACELERAÇÃO
;* VERSAO: RIC03.ASM *
;* DATA: INICIO: 21/06/2006 *
;* DATA: ATUAL : 27/09/2006 *
;* AUTOR: PAULO EDUARDO P. PIEROBOM *
;* MICROPROCESSADOR: AT89S52 ATMEL *
;*****

```

```

CSEG          ;DEFINE AREA DE CODIGO (PROGRAMA)
ORG          0          ;INICIA ENDERECO ZERO (INICIO - RESET)
LJMP        INICIO_PROG ;INICIO DO PROGRAMA

```

```

;*****
***** CONFIGURACAO DE TIMER E INTERUPCAO *****
;*****

```

```

INICIO_PROG:

```

```

MOT_DIR      EQU      P1.0
MOT_ESQ      EQU      P1.1
SEN_SUP      EQU      P1.2
SEN_INF      EQU      P1.3
BOT_ESQ      EQU      P1.4
BOT_DIR      EQU      P1.5
CH_MAN       EQU      P3.3

```

```

;*****
;*          INICIO DO PROGRAMA *
;*****

```

```

LOOP:

```

```

;*****
;*          CONTROLE PELO MODO MANUAL *
;*****

```

```

JB    CH_MAN,CHAVE_DESLIGADA ;SE A CHAVE O ESTIVER EM 1 SETA
                                PARA CHAVE_DESLIGADA
JB    BOT_ESQ,BOTAO_ESQ_DESL ;SE O BOTAÕ ESQUERDO ESTIVER EM 1
                                SALTA PARA BOTAO_ESQ_DESL

CLR  MOT_ESQ          ;BLOQUEIA MOVIMENTO DE ACELERAÇÃO
SETB MOT_DIR         ;LIGA MOVIMENTO PARA DESACELERAÇÃO
JMP  LOOP

```

```

BOTAO_ESQ_DESL:

```

```

JB    BOT_DIR,BOTAO_DIR_DESL ;SE O BOTAÕ DIREITO ESTIVER EM 1
                                SALTA PARA BOTAO_DIR_DESL

CLR  MOT_DIR         ;LIGA MOTOR PARA DESACELERAR
SETB MOT_ESQ        ;BLOQUEIA ACELERAÇÃO
JMP  LOOP

```

```

BOTAO_DIR_DESL:

```

```

CLR  MOT_DIR         ;BLOQUEIA MOVIMENTO DE DESACELERAÇÃO
CLR  MOT_ESQ        ;LIGA MOVIMENTO PARA ACELERAÇÃO

```

```

JMP LOOP
;*****
;*          CONTROLE PELO MODO AUTOMATICO          *
;*****
CHAVE_DESLIGADA:
    JB  SEN_SUP,SENSOR_SUP_DESL ;DESACELERAÇÃO
    CLR MOT_ESQ                ;PARA MOVIMENTO PARA ESQUERA
    SETB MOT_DIR                ;LIGA MOVIMENTO PARA DIREITA

;***** tempo de motor ligado 300 ms *****
    MOV R0,#12D
FALTA_1:
    CALL DEMORA20MSEG          ;DEMORA 20mS
    DJNZ R0,FALTA_1
;**** tempo de motor desligado 2,0 segundo *****
    CLR MOT_DIR                ;LIGA MOTOR PARA DESACELERAR
    CALL DEMORA1SEG           ;DEMORA TOTAL 2 segundos
    CALL DEMORA1SEG
    JMP LOOP

SENSOR_SUP_DESL:
    JB  SEN_INF,SENSOR_INF_DESL ;ACELERAÇÃO
    CLR MOT_DIR                ;PARA MOVIMENTO PARA DIREITO
    SETB MOT_ESQ              ;LIGA MOVIMENTO PARA ESQUEDO

;***** tempo de motor ligado 300 ms *****
    MOV R0,#12D                ;NUMERO DE REPETIÇÕES
FALTA_2:
    CALL DEMORA20MSEG          ;DEMORA 20mS
    DJNZ R0,FALTA_2

;**** tempo de motor desligado 2,5 segundo *****
    CLR MOT_ESQ
    CALL DEMORA1SEG           ;DEMORA DE 1 SEGUNDO
    CALL DEMORA1SEG           ;DEMORA DE 1 SEGUNDO
    CALL DEMORA                ;DEMORA DE 1/2 SEGUNDO
    JMP LOOP
SENSOR_INF_DESL:
    JMP LOOP
;*****
;*          ROTINA DEMORAS          *
;*****
;**** DEMORA REFRESCAR DADOS
DEMORA: ;DEMORA DE 1/2 SEGUNDO
    MOV R7,#1
LACO31:
    MOV R6,#100
LACO21:
    MOV R5,#200
LACO11:
    NOP

```

```

NOP
NOP
DJNZ    R5,LACO11
DJNZ    R6,LACO21
DJNZ    R7,LACO31
RET

;*-----*
DEMORA1SEG:  ;DEMORA DE 1 SEGUNDO
    MOV    R7,#10
LACO1SEG3:
    MOV    R6,#100
LACO1SEG2:
    MOV    R5,#200
LACO1SEG:
    NOP
    NOP
    NOP
    DJNZ   R5,LACO1SEG
    DJNZ   R6,LACO1SEG2
    DJNZ   R7,LACO1SEG3
    RET

;*-----*
DEMORA20MSEG:
    MOV    R6,#08H
LACO20MSEG1:
    MOV    R7,#0FFH
LACO20MSEG2:
    DJNZ   R7,LACO20MSEG2
    DJNZ   R6,LACO20MSEG1
    RET

;*-----*
DEMORA40USEG:
    MOV    R7,#014H
LACO40USEG:
    DJNZ   R7,LACO40USEG
    RET

;*-----*
DEMORA1640USEG:
    MOV    R7,#0FFH
LACO1640USEG:
    NOP
    NOP
    NOP
    NOP
    NOP
    DJNZ   R7,LACO1640USEG
    RET

;***** FIM DO PROGRAMA *****
END

```



## ANEXO II

### ESPECIFICAÇÕES DETALHADAS DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

As especificações se encontram nos idiomas de origem dos manuais.

#### **Noncontact Thermometer – Raynger® ST™ (Pirômetro)**

##### **Model ST30 Pro™ Enhanced**

Range	-32°C to 545°C
D:S	12:1
Display Resolution	0.2°C
Accuracy	Above 23°C: $\pm 1\%$ of reading or $\pm 1^\circ\text{C}$ , whichever is greater. -32°C to 23°C: $\pm 3.5\%$
Repeatability	$\pm 1^\circ\text{C}$ or 0.5% of reading, whichever is greater.
Response Time	500 ms
Spectral Response	8-14 $\mu\text{m}$
Emissivity	pre-set 0.95
Ambient Operating Range	0 to 50 °C
Laser Max	laser turn off above 40 °C ambient temperature
Relative Humidity	10-95% RH noncondensing, at < 30 °C ambient
Storage Temperature	-20 to 60 °C without battery
Weight/Dimensions	320g; 200 x 160 x 55 mm
Power	9 V Alkaline or NiCd battery

**Multitester Profield®****Model YX-360TR<sub>N-B</sub>**

## DC Voltage

Ranges 0.1 – 0.5 – 2.5 – 10 – 50 – 250 – 1000 V

Accuracy 3% at FSD

Sensitivity 20 k $\Omega$ /V

## AC Voltage

Ranges 10 – 50 – 250 – 1000 V

Accuracy 4% at FSD

Sensitivity 9 k $\Omega$ /V

Decibelmeter - 10 to + 50 dB

0 dB = 1 mW/600

## DC Current

Ranges 50  $\mu$ A – 2.5 mA – 25 mA – 0.25 A

Accuracy 3%

Volt Drop 250 mV

## Resistance

Ranges x1 – 0.2 $\Omega$  up to 2k $\Omega$ , midscale at 20 $\Omega$

x10 – 2 $\Omega$  up to 20k $\Omega$ , midscale at 200 $\Omega$

x1k – 200 $\Omega$  up to 2M $\Omega$ , midscale at 20k $\Omega$

x10k – 2k $\Omega$  up to 2M $\Omega$ , midscale at 200k $\Omega$

Size 150 x 100 x 36 mm

Weight 200g

## Multímetro Automotivo Minipa Modelo MA-108

### Especificações Gerais

Display	3½ dígitos (contagem 2000) tipo LCD (display de cristal líquido)
Ambiente de Operação	0 °C a 50 °C, RH < 80 %
Ambiente de Armazenamento	- 20 °C a 60 °C, RH < 80 %
Alimentação	Bateria Simples

### Especificações Elétricas

#### RPM

Faixa	0 – 10000
Resolução	10 rpm
Precisão	± (1,5% Leitura + 5 rpm)

#### Tensão DC

Faixas	2V, 20V e 200V
Resolução	1mV a 100mV
Precisão	± (1,0% Leitura + 1 Dígitos)
Impedância de entrada	10MΩ

#### Tensão AC

Faixa	750V
Resolução	1V
Precisão	± (1,5% Leitura + 4 Dígitos)
Impedância de entrada	>1MΩ

#### Corrente DC

Faixa	10A
Resolução	10mA
Precisão	± (2,0% Leitura + 2 Dígitos)

#### Resistência

Faixas	200Ω, 20kΩ e 200kΩ
Resolução	1mΩ a 100Ω
Precisão	± (1,0% Leitura + 4 Dígitos)
Faixa	20MΩ
Resolução	10kΩ
Precisão	± (5,0% Leitura + 4 Dígitos)

**Medidor Orçazonal de Grandezas**

Modelo:	Medidor Eletrônico ELO.2113	
Frequência nominal:	60Hz	
Corrente de partida (ou mínima):	0,4% In	
Consumo máximo:	120 V <sub>CA</sub> : 2,3W, 3,6 VA	
	240 V <sub>CA</sub> : 2,8W, 4,5 VA	
Capacidade Térmica:	20 Imáx por 5s	
Ensaio de rigidez elétrica:	tensões de isolamento:	2 kV <sub>CA</sub> 60 Hz, 1min
	tensões de impulso	1,2/50: 6kV
Faixa de Alimentação:	90 a 280 V <sub>CA</sub>	
Corrente nominal (In):	2,5 A	
Corrente máxima contínua (Imáx):	20 A	
Tensão nominal:	qualquer valor entre 105 e 254 V <sub>CA</sub>	
Classe de exatidão:	energia ativa:	1,0%
	energia reativa:	1,0%
	Conforme Projeto de Norma Brasileira Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (estáticos)	
	Especificação: 3:013.01 025	
Exatidão do relógio:	± 30 ppm a 25 °C	
Mostrador:	display de cristal líquido	
Conector para comunicação:	tipo magnético	

**PCI-DAS08****Analog input and Digital I/O**

## Analog input specifications

Parameter	Specification
<i>A/D converter type</i>	<i>AD1674J</i>
Resolution	12 bits
Ranges	$\pm 5$ V
A/D pacing	Software polled
<i>A/D triggering modes</i>	<i>Digital: Software polling of digital input (DIN1) followed by pacer loading and configuration.</i>
Data transfer	Software polled
Polarity	Bipolar
Number of channels	8 single-ended
<i>A/D conversion time</i>	<i>10 <math>\mu</math>s</i>
Throughput	40 kHz typical, PC dependent
Relative accuracy	$\pm 1$ LSB
Differential linearity error	No missing codes guaranteed
Integral linearity error	$\pm 1$ LSB
<i>Gain drift (A/D specs)</i>	<i><math>\pm 180</math> ppm/<math>^{\circ}</math>C</i>
<i>Zero drift (A/D specs)</i>	<i><math>\pm 60</math> ppm/<math>^{\circ}</math>C</i>
<i>Input leakage current</i>	<i><math>\pm 60</math> nA max over temperature</i>
<i>Input impedance</i>	<i>10 MegOhm min</i>
<i>Absolute maximum input voltage</i>	<i><math>\pm 35</math> V</i>
Noise distribution	(Rate = 1-50 kHz, Average % $\pm 2$ bins, Average % $\pm 1$ bin, Average # bins) Bipolar (5 V): 100% / 100% / 3 bins

## PCI-DAS08

## Analog input and Digital I/O

## Digital input / output

Parameter	Specification
Digital type (main connector):	
<i>Output</i>	74ACT273
<i>Input</i>	74LS244
<i>Configuration</i>	3 fixed input, 4 fixed output
<i>Number of channels</i>	7
<i>Output high</i>	3.94 volts min @ -24 mA ( $V_{cc} = 4.5\text{ V}$ )
<i>Output low</i>	0.36 volts max @ 24 mA ( $V_{cc} = 4.5\text{ V}$ )
<i>Input high</i>	2.0 volts min, 7 volts absolute max
<i>Input low</i>	0.8 volts max, -0.5 volts absolute min
Interrupts	INTA# - mapped to IRQn via PCI BIOS at boot-time
Interrupt enable	Programmable through PCI controller: 0 = disabled, 1 = enabled (default)
Interrupt sources	External source (EXT INT) Polarity programmable through PCI controller: 1 = active high, 0 = active low (default)

## PCI-DAS08

## Analog input and Digital I/O

## Counter section

Parameter	Specification
<i>Counter type</i>	<i>82C54 device</i>
<i>Configuration</i>	<i>3 down counters, 16-bits each</i>
Counter 0 - User counter 1	Source: Available at user connector (CTR1CLK) Gate: Available at user connector (CTR1GATE) Output: Available at user connector (CTR1OUT)
Counter 1 - User counter 2	Source: Available at user connector (CTR2CLK) Gate: Available at user connector (CTR2GATE) Output: Available at user connector (CTR2OUT)
Counter 2 - User counter 3 or Interrupt Pacer	Source: Buffered PCI clock (33 MHz) divided by 8. Gate: Available at user connector (CTR3GATE) Output: Available at user connector (CTR3OUT) and may be software configured as Interrupt Pacer.
<i>Clock input frequency</i>	<i>10 MHz max</i>
<i>High pulse width (clock input)</i>	<i>30 ns min</i>
<i>Low pulse width (clock input)</i>	<i>50 ns min</i>
<i>Gate width high</i>	<i>50 ns min</i>
<i>Gate width low</i>	<i>50 ns min</i>
<i>Input low voltage</i>	<i>0.8 V max</i>
<i>Input high voltage</i>	<i>2.0 V min</i>
<i>Output low voltage</i>	<i>0.4 V max</i>
<i>Output high voltage</i>	<i>3.0 V min</i>

## PCI-DAS08

## Analog input and Digital I/O

## Power consumption

Parameter	Specification
+5 V operating (A/D converting to FIFO)	251 mA typical, 436 mA max
+12 V	13 mA typical, 19 mA max
-12 V	17 mA typical, 23 mA max

## Environmental

Parameter	Specification
Operating temperature range	0 to 50 °C
Storage temperature range	-20 to 70 °C
Humidity	0 to 90% non-condensing



**Analizador de Gases Alfateste Modelo 488A**

Detecção:	CO, CO <sub>2</sub> , HC e O <sub>2</sub> :	Infrared.
	NO <sub>x</sub> :	Chemical kit.
Volt:	110 ±15%	
Hertz:	60 ± 3%	
Watt:	100	
Temperature:	+5 / +40	
Pressure:	± 5 kPa	
Manufact year;	1997	
Nominal Flow:	8 l/min	
Minimum Flow:	6 l/min	
Warming:	15 min	
Span:	Daily	
Check:	Annual	
Range:	CO:	0 - 9,9 % mol
	CO <sub>2</sub> :	0 - 19,9 %mol
	HC:	0 – 9999 ppm
	O <sub>2</sub> :	0 – 25 %mol
	NO <sub>x</sub> :	0 – 517 ppm
Homologation:	n. 3664/4103/8-L	
OIML CLASS ONE		

**Professional Lambda Meter Motec****POWER SUPPLY**

Input Voltage Range	7 to 16Volts
Input current	60mA Typical with backlight off 110mA Typical with backlight on Plus sensor heater current
Protection	Reverse polarity protected
Load Dump Clamp	Max 40V at 100 Amp 100msec

**SENSORS**

Sensors 1	
Compatible Types	Bosch LSU / NTK UEGO
Calibration Methods	Automatic using sensor's built in calibration resistor Manual Table Entry Known Oxygen Environment Calibration Constant
Type Detection	Manual or Automatic (using sensor's built in calibration resistor)

**MEASUREMENTS**

Lambda	0.7 to 32.0 02 0 to 22%
A/F Ratio	Fuel dependant (see lambda range)
Accuracy	+/-1.5% (sensor specific)

**SENSOR HEATER**

Outputs 1	
Current Max	8 Amp
Control	Bosch - Digital PID

**OUTPUTS**

Analogue 1 x	0 to 5V DC, User Programmable
Output Type	Differential
Differential Range	4.8 to 5.0 Volts

**INPUTS**

Digital 2 x	User Programmable as RPM or PLM Enable (Operate)
-------------	--

**DISPLAY**

Type	LCD 3.5 Digit
Digit Height	12.7mm
Lighting	Green LED Back Light

**PROCESSOR**

CPU	Motorola 68HC908AZ60
Speed	8MHz
Code Memory	60K Flash
Configuration Memory	1K EEPROM - Field updateable
Connectors	2 x 9 Pin Dsub
Temperature Range	10 to 70 Deg C
Dimensions(WxHxD)	105x41x25 mm (Excluding Connector)
Weight	135grams

## Surface Roughness Tester SJ-201P – Mitutoyo Corporation

<b>Order No.</b>	<b>178-923A</b>
<b>Type</b>	<b>inch (mm)</b>
<b>Drive Unit</b>	
<i>Drive speed</i>	Measuring: .01"/s (0.25mm/s), .02"/s ( 0.5mm/s), Returning: .03"/s (0.8mm/s)
<i>Evaluation length *1</i>	.49" (12.5mm)
<i>Mass</i>	.42 lbs. (190g)
<b>Detector provided</b>	<b>178-390</b>
<i>Detecting method</i>	Differential inductance
<i>Measuring range</i>	13780µin (350µm) (-7880µin/-200µm to +5900µin/+150µm)
<i>Material of stylus</i>	Diamond
<i>Radius of skid curvature</i>	1.57" (40mm)
<i>Mass</i>	.04 lbs. (18g)
<i>Stylus tip radius</i>	200µin (5µm)
<i>Measuring force</i>	4mN
<b>Display Unit</b>	
<i>Assessed profile</i>	Primary profile (P), Roughness profile (R), DIN4776 profile
<i>Roughness parameter</i>	Ra, Ry, Rz, Rq, S, Sm, Pc, R3z, mr, Rt, Rp, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo (can be customized)
<i>Roughness standard</i>	JIS, DIN, ISO, ANSI
<i>Sampling length (L)</i>	.01", .03", .1" (0.25mm, 0.8mm, 2.5mm)
<i>Number of sampling spans</i>	x1, x3, x5, xL*1
<i>Digital filter</i>	2CR-75% (without phase compensation), PC-75%, PC50% (Gaussian)
<i>Cut-off lc</i>	.01", .03", .1" (0.25mm, 0.8mm, 2.5mm)
<i>Length ls</i>	100µin, 320µin (2.5µm, 8µm)
<i>Resolution/range</i>	Auto/depending on the measurement range 16.4µin/14000µin (0.4µm/350µm) 4.1µin/4000µin (0.1µm/100µm) 2.0µin/2000µin (0.05µm/50µm) .5µin/400µin (0.01µm/10µm)
<i>Displaying range</i>	
<i>Ra, Rq</i>	.4µin - 4000µin (0.01µm - 100µm)
<i>Rz, Ry, Rp, Rt,</i>	.8µin - 13780µin
<i>R3z,Rk, Rpk, Rvk</i>	(0.02µm - 350µm)
<i>Pc</i>	6.35 - 12700/inch (2.5 - 5000/cm)
<i>mr</i>	1 - 100%
<i>Sm, S</i>	80µin - .16" (2 - 4000µm)
<i>Mr1, Mr2</i>	0 - 100%
<i>A1, A2</i>	0 - 15000
<i>Vo</i>	0.000 - 10.00(mm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
<i>GO/NO-GO judgment</i>	Upper and lower limit values can be specified.
<i>Power supply</i>	Via AC adapter/built-in rechargeable battery
<i>Rechargeable battery</i>	Charging time: 12 hours (for 500 measurements)
<i>Auto-sleep (turning off)</i>	After 30 seconds without operation
<i>Data output</i>	Via RS-232C interface unit, SPC output, PC output, Printer output
<i>Mass</i>	.64 lbs. (290g)

\*1 Evaluation length can be specified arbitrarily in the range from .01" (0.3mm) to .49" (12.5mm).

**ANEXO III**  
**CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Na tabela III.1 pode ser observado o custo do MWh em leilões de energia no Brasil em 2006. Esta energia é proveniente, principalmente, de hidroelétricas.

Tabela III.1 – Custo do MWh no Brasil. Fonte: CanalEnergia (2006).

Submercado	Valor do MWh
Sudeste, Centro-Oeste e Sul	> US\$ 37,70
Norte e Nordeste	> US\$ 20,33

**ANEXO IV**  
**CONSUMO ESPECÍFICO EM RELAÇÃO AO PARÂMETRO LAMBDA**

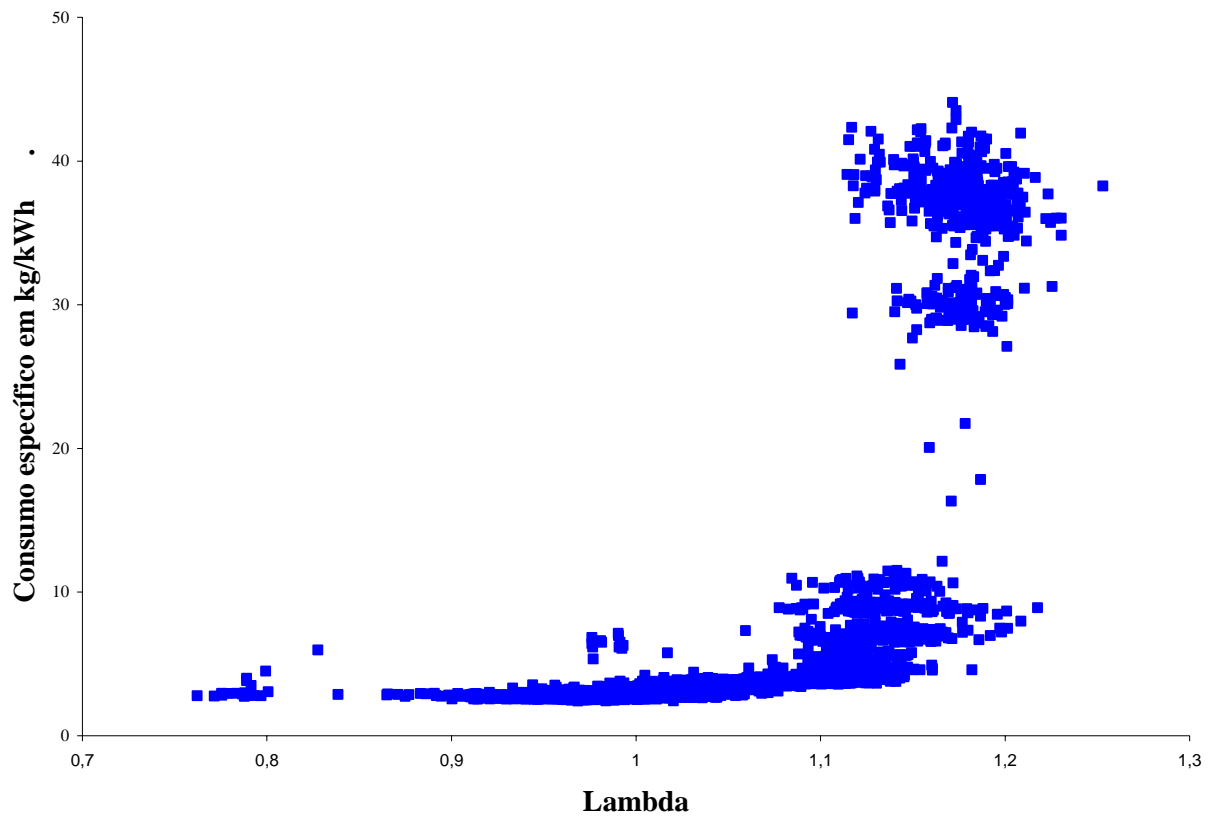


Figura IV.1 – Consumo específico em função do parâmetro lambda.

**ANEXO V**  
**TEMPERATURA DO CHORUME BRUTO NO ATERRO DA EXTREMA**

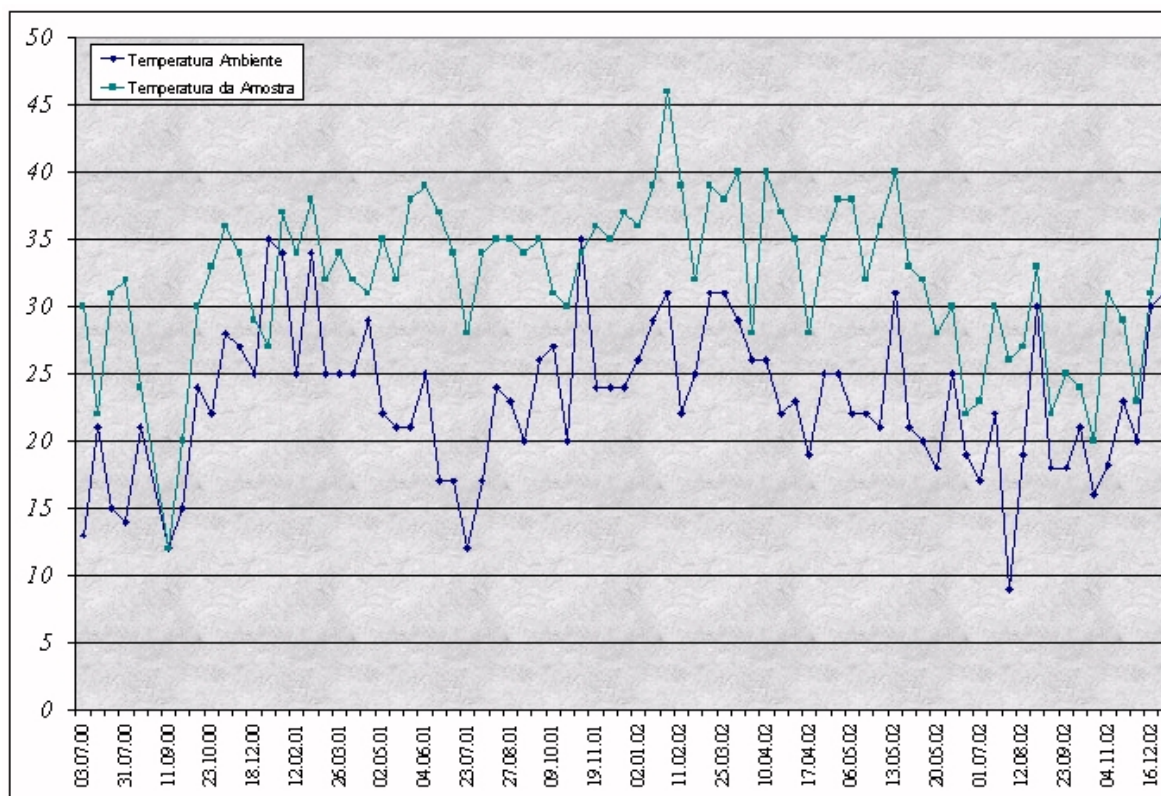
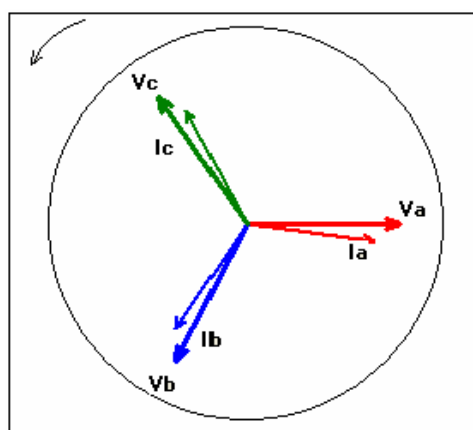


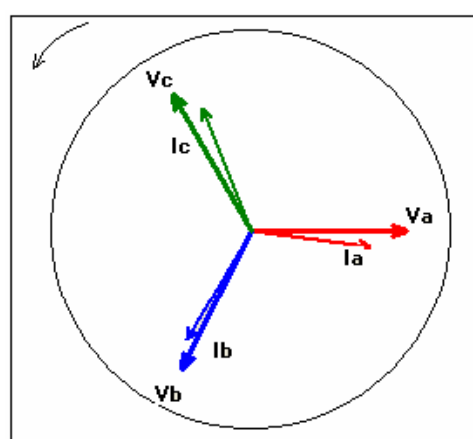
Figura V.1 – Chorume bruto do aterro sanitário da Extrema - parâmetro: temperatura da amostra (°C). Fonte DMLU 2006.

**ANEXO VI**  
**DIAGRAMA VETORIAL DE TENSÕES E CORRENTES E PARÂMETROS**  
**ELÉTRICOS EM DIVERSOS MODOS DE OPERAÇÃO.**



	FASE A	FASE B	FASE C	TRIFÁSICO
Potência Ativa	0.162 kW	0.160 kW	0.160 kW	0.482 kW
Potência Reativa	0.023 kvar	0.019 kvar	0.019 kvar	0.061 kvar
Potência AparQuad	0.162 kVA	0.160 kVA	0.161 kVA	0.483 kVA
Potência AparVet	0.163 kVA	0.161 kVA	0.162 kVA	0.486 kVA
Potência Distorsiva	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd
Fator de Potência	1.00	1.00	1.00	1.00
Cosseno Fi	0.99 Ind	0.99 Ind	0.99 Ind	0.99 Ind
Tensão	227.0 V	227.9 V	226.7 V	
Tensão de Linha	(ab) 387.3 V	(bc) 391.0 V	(ca) 401.8 V	
Corrente	0.71 A	0.70 A	0.71 A	
Defasagem VI	-8.1°	-6.7°	-6.7°	
Ângulo V	0.0°	-116.7°	124.6°	
Ângulo entre Tensões	(ab) -116.7°	(bc) -118.6°	(ca) -124.6°	
DHT	0.0%	0.0%	0.0%	
Frequência de Rede	55.01 Hz			

Figura VI.1 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 0,5 kW.



	FASE A	FASE B	FASE C	TRIFÁSICO
Potência Ativa	0.361 kW	0.381 kW	0.387 kW	1.128 kW
Potência Reativa	0.048 kvar	0.026 kvar	0.055 kvar	0.129 kvar
Potência AparQuad	0.361 kVA	0.382 kVA	0.387 kVA	1.129 kVA
Potência AparVet	0.364 kVA	0.382 kVA	0.390 kVA	1.136 kVA
Potência Distorsiva	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd
Fator de Potência	1.00	1.00	1.00	1.00
Cosseno Fi	0.99 Ind	1.00	0.99 Ind	0.99 Ind
Tensão	222.5 V	222.8 V	221.2 V	
Tensão de Linha	(ab) 378.3 V	(bc) 391.6 V	(ca) 384.2 V	
Corrente	1.62 A	1.71 A	1.75 A	
Defasagem VI	-7.6°	-3.9°	-8.2°	
Ângulo V	0.0°	-116.3°	120.0°	
Ângulo entre Tensões	(ab) -116.3°	(bc) -123.7°	(ca) -120.0°	
DHT	0.0%	0.0%	0.0%	
Frequência de Rede	55.28 Hz			

Figura VI.2 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 1,1 kW.

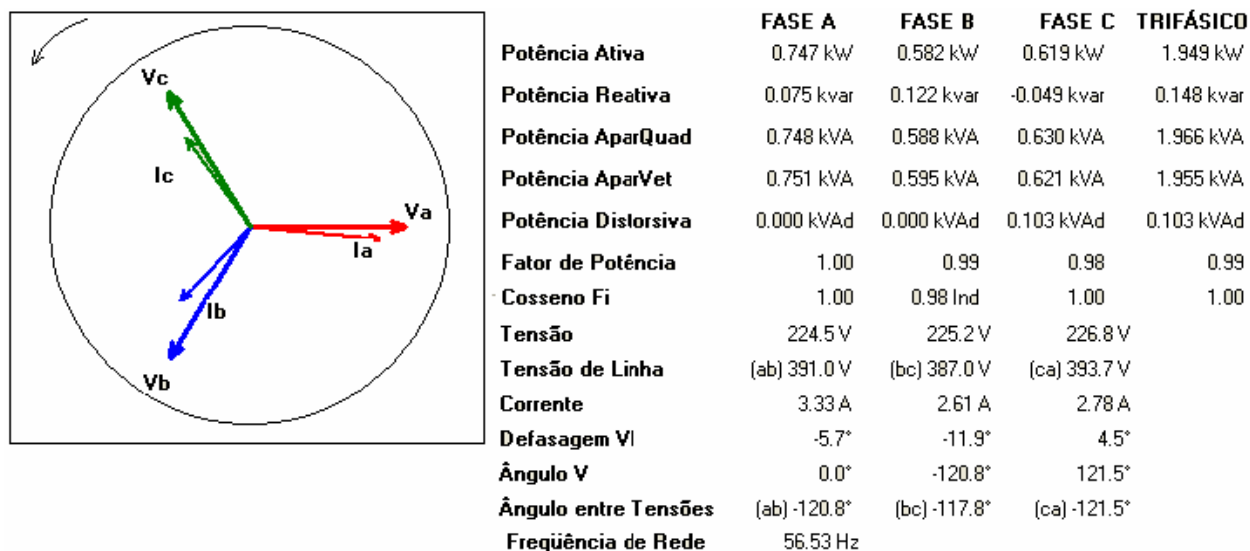


Figura VI.3 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 1,9 kW.

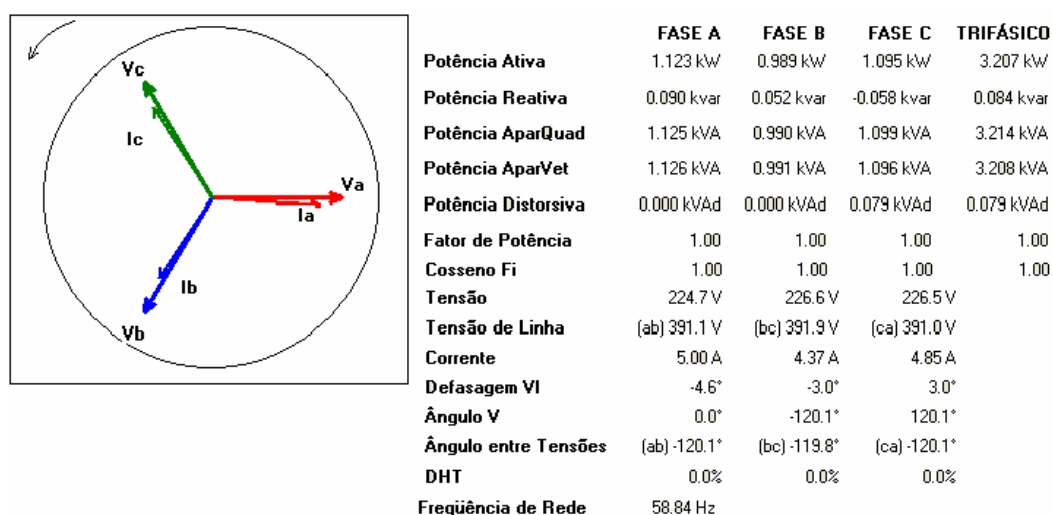


Figura VI.4 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 3,2 kW.



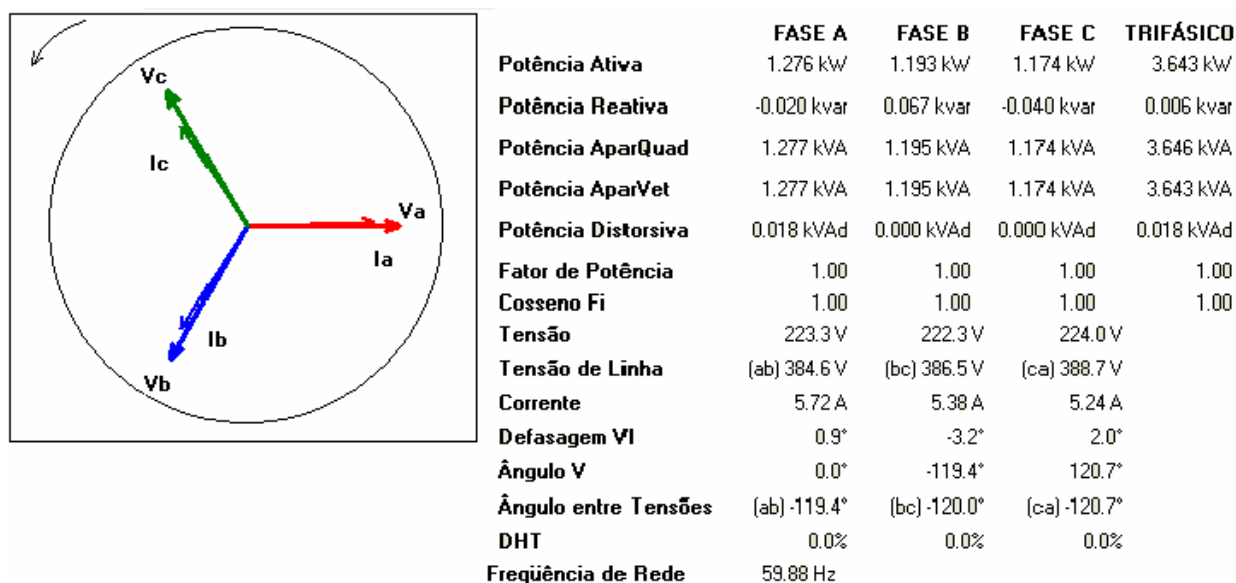


Figura VI.5 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 3,6 kW.

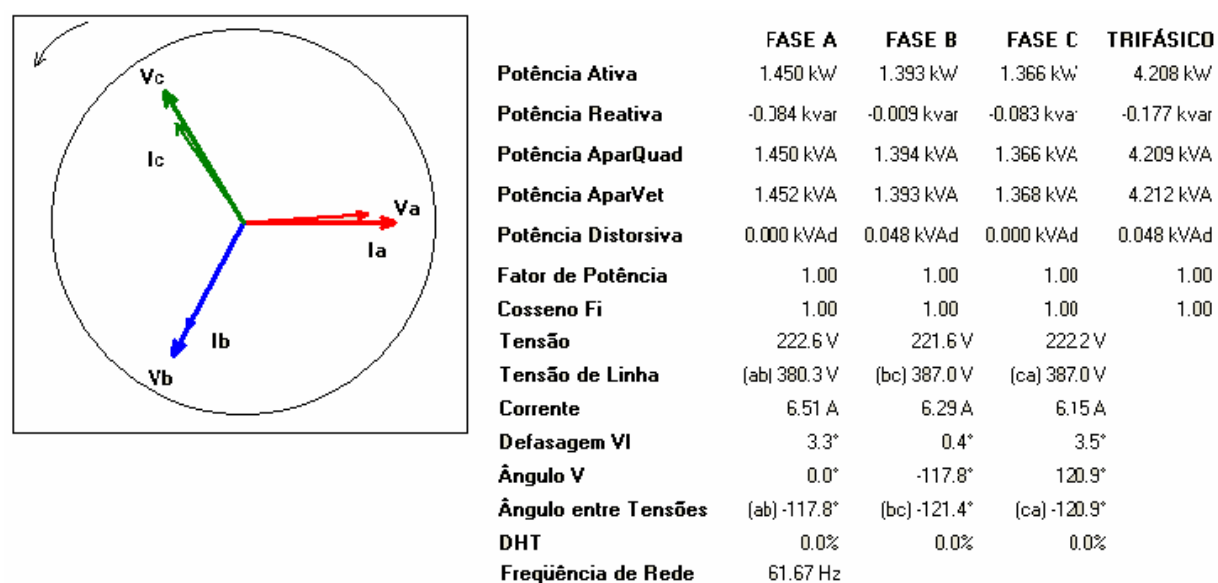
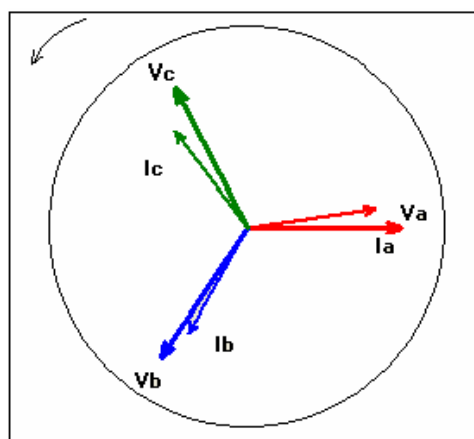
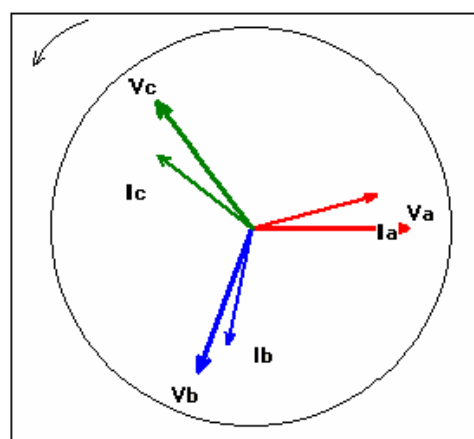


Figura VI.6 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 4,2 kW.



	FASE A	FASE B	FASE C	TRIFÁSICO
<b>Potência Ativa</b>	1.765 kW	1.627 kW	1.631 kW	5.024 kW
<b>Potência Reativa</b>	-0.256 kvar	-0.122 kvar	-0.283 kvar	-0.661 kvar
<b>Potência AparQuad</b>	1.765 kVA	1.630 kVA	1.631 kVA	5.026 kVA
<b>Potência AparVet</b>	1.784 kVA	1.632 kVA	1.655 kVA	5.067 kVA
<b>Potência Distorsiva</b>	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd
<b>Fator de Potência</b>	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Cosseno Fi</b>	0.99 Cap	1.00	0.99 Cap	0.99 Cap
<b>Tensão</b>	224.0 V	223.2 V	225.5 V	
<b>Tensão de Linha</b>	(ab) 393.9 V	(bc) 386.5 V	(ca) 384.5 V	
<b>Corrente</b>	7.88 A	7.31 A	7.23 A	
<b>Defasagem VI</b>	8.2°	4.3°	9.8°	
<b>Ângulo V</b>	0.0°	-123.5°	117.6°	
<b>Ângulo entre Tensões</b>	(ab) -123.5°	(bc) -118.9°	(ca) -117.6°	
<b>DHT</b>	0.0%	0.0%	0.0%	
<b>Frequência de Rede</b>	64.72 Hz			

Figura VI.7 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 5,0 kW.



	FASE A	FASE B	FASE C	TRIFÁSICO
<b>Potência Ativa</b>	2.007 kW	1.822 kW	1.834 kW	5.664 kW
<b>Potência Reativa</b>	-0.497 kvar	-0.293 kvar	-0.506 kvar	-1.296 kvar
<b>Potência AparQuad</b>	2.006 kVA	1.829 kVA	1.834 kVA	5.668 kVA
<b>Potência AparVet</b>	2.068 kVA	1.846 kVA	1.903 kVA	5.810 kVA
<b>Potência Distorsiva</b>	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd	0.000 kVAd
<b>Fator de Potência</b>	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Cosseno Fi</b>	0.97 Cap	0.99 Cap	0.96 Cap	0.97 Cap
<b>Tensão</b>	221.2 V	220.1 V	223.4 V	
<b>Tensão de Linha</b>	(ab) 362.2 V	(bc) 389.4 V	(ca) 397.7 V	
<b>Corrente</b>	9.07 A	8.31 A	8.21 A	
<b>Defasagem VI</b>	13.9°	9.1°	15.4°	
<b>Ângulo V</b>	0.0°	-110.3°	126.9°	
<b>Ângulo entre Tensões</b>	(ab) -110.3°	(bc) -122.8°	(ca) -126.9°	
<b>DHT</b>	0.0%	0.0%	0.0%	
<b>Frequência de Rede</b>	69.65 Hz			

Figura VI.8 – Diagrama vetorial de tensões e correntes, e outros parâmetros para 5,7 kW.