

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DO GÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS
UTILIZANDO PILHAS A COMBUSTÍVEL
“O caso do município de Campinas - S.P. – Brasil”**

Autor: Pablo César Cadavid Pérez

Orientador: Wagner dos Santos Oliveira

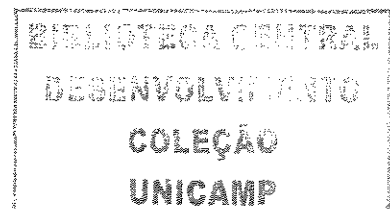
Co-Orientador: Ênnio Peres da Silva

Pós-Graduação em Engenharia Química

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Outubro de 2004



UNIDADE	PC
Nº CHAMADA	+1/UNICAMP
	C113a
V	EX
TOMBO BC	53602
PROC.	16-86-05
C	☐
D	☒
PREÇO	11,00
DATA	18/10/05
Nº CPD	

R1810-366226

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C113a

Cadavid Pérez, Pablo César

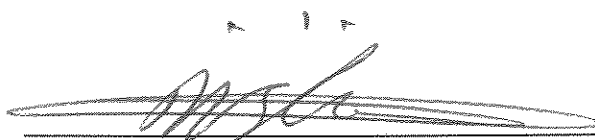
Análise técnico-econômico para aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários utilizando pilhas a combustível "O caso do município de Campinas – S.P. – Brasil" / Pablo César Cadavid Pérez. -- Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientadores: Wagner dos Santos Oliveira, Ênnio Peres da Silva

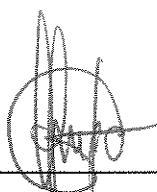
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Biogás. 2. Células a combustível. 3. Gases - Purificação. 4. Aterro sanitário. I. Oliveira, Wagner dos Santos. II. Silva, Ênnio Peres da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

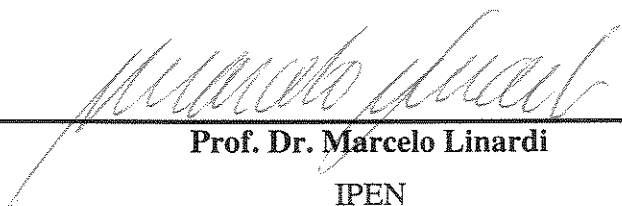
Dissertação de Mestrado defendida por Pablo César Cadavid Pérez e aprovada em 25 de outubro de 2004 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. - Orientador Wagner dos Santos Oliveira
DTP/FEQ/UNICAMP



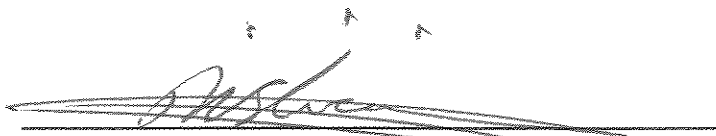
Prof. Dr. João Sinézio Carvalho Campos
DTP/FEQ/UNICAMP



Prof. Dr. Marcelo Linardi
IPEN

Campinas, 25 de outubro de 2004

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química.



Prof. Dr. - Orientador Wagner dos Santos Oliveira
DTP/FEQ/UNICAMP

Dedicatória

Dedico este trabalho a Lina quem esteve junto a mim com paciência e muito carinho durante os dois anos de estudo.

Aos meus pais, William e Consuelo, e meus irmãos, Paula e William, que apesar da distância dedicaram-me o amor e a força que precisava para ter sucesso nesta nova etapa de minha vida.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Wagner dos Santos Oliveira e ao meu co-orientador, Professor Doutor Ênnio Peres da Silva, pelos incentivos, pela dedicação e por acreditarem na importância técnica e científica deste trabalho.

À minha família, por todo o incentivo e força que me deram sem a qual eu não teria conseguido terminar esta nova etapa da minha vida.

À minha companheira, pela cumplicidade, paciência e dedicação.

Aos meus amigos da Colômbia, Victor, Juan e César, pelo apoio dado à distância.

Aos meus amigos Roberto Capassi e Roberto Antunes e suas famílias, pela sua sincera amizade que me dedicaram.

Aos professores da pós-graduação, Lucia Mei, Leila Peres, Sinézio Campos, Sergio Ravagnani e em especial ao professor Julio Bartoli, pela sua dedicação e pela sua preocupação com a formação integral dos seus alunos. Ao professor Edison Bittencourt pelo ingresso no curso da pós-graduação da FEQ.

A todos os colegas de curso, Yony, “o Cubano”, Mauro, “o Chileno”, Viktor, “o Peruano”, Elvio, “o Boliviano”, Fabio A., Fabio N., Gisela, Gustavo, Clara, Rodolfo, Virginia, Fernanda, Fabiana, Fabrício, Aracelis, Danielle, Lucillene e Vanina.

Agradeço especialmente aos meus amigos e sócios Eduardo, Alexandre e William e a minha amiga e companheira de república Cassiane.

Agradeço especialmente aos meus grandes e sinceros amigos, Ângela, que sempre teve a infinita paciência para me ajudar, André pela sua alegria e pela sua ajuda, já que os considero como irmãos.

Agradeço à CAPES pelo financiamento da pesquisa e ao Centro de Tecnologia Ambiental do *Imperial College of Science, Technology and Medicine*, pelo estágio e pelas informações que me proporcionaram.

“Rompe el silencio de un grito que el mundo te escuche no temas actuar,
no seas el sueño vencido que temes vivencias, que temes soñar,
no seas la copia de un falso bufón, se uno, se tu y nada más,
llegó el momento de actuar con razón.
No vivas para ser por temor la presa de otros sueños,
se vive una vez, para ser, ETERNAMENTE LIBRE.”

Agrupación KRAKEN
Medellín-Colombia

RESUMO

Devido às constantes crises no mundo causadas pela dependência do petróleo tem-se buscado diversificar as fontes primárias energéticas, tais como, energia solar, eólica, hidráulica e biomassa. Além disso, é cada vez maior a preocupação com a contaminação atmosférica que constitui um dos problemas decorrentes do intenso uso do petróleo. Entre as alternativas que apresentam um interesse crescente está a exploração do gás gerado em aterros sanitários que tem uma composição média em massa de 50% de metano, 40% de gás carbônico e 10% de outros gases. No país, os aterros são ricos em resíduos orgânicos, o que contribui para formação de grandes quantidades de metano; porém, atualmente os gases são queimados sem qualquer tipo de aproveitamento energético. Do ponto de vista ambiental, as emissões gasosas de aterros sanitários contribuem para o aquecimento global do planeta com alguns gases apresentando alto grau de toxicidade, mau cheiro, perigo de explosão, além de outros riscos. Assim, o objetivo desta pesquisa é apresentar o Projeto Conceitual e Análise Técnico-Econômica preliminar para o aproveitamento do gás gerado em aterros sanitários, utilizando pilhas a combustível na produção de energia elétrica e térmica, levando também à diminuição da poluição atmosférica. O projeto inclui uma concepção de um Sistema Integrado inovador na área de aproveitamento de biogás, que consiste na exploração conjunta da Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR), Complexo Delta, do Município de Campinas/SP e da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), Piçarrão, do mesmo Município. Nessa integração, além da geração de energia elétrica e térmica, é possível a exploração do gás carbônico para neutralização de esgoto alcalino, por meio de um Reator de Neutralização de Esgoto Alcalino (RNEA) e a utilização dos lodos gerados nos biodigestores da ETE como material de cobertura na URTR. A determinação do potencial de gás aproveitável é obtida por meio de métodos de cálculo e dados, teóricos e experimentais, utilizando o valor total de resíduos domiciliares e comerciais, depositados na URTR e sua composição percentual. Utilizando a análise termodinâmica das reações de fermentação e combustão tem-se que o volume gerado de CH_4 por ano é $V_{\text{CH}_4} = 149,1 \text{ l/kg}$. Pela análise das reações de biodegradação, tem-se que o volume total de gases é $V_{\text{TOTAL}} = 287,7 \text{ l/kg}$. Comparando V_{TOTAL} com V_{CH_4} , pode ser confirmado que a composição de CH_4 está entre 50 e 65%, valores médios encontrados na literatura. Pela análise da cinética das reações foi calculado um fator de eficiência de biodegradação entre 46,6 e 55,4%, sendo que estes valores também correspondem com valores teóricos. O potencial total de gás aproveitável calculado teórica e experimentalmente para 190.000 ton/ano de resíduos foi de 16,7 milhões m^3/ano , assumindo 60% de extração de gases. O potencial energético total real do aterro utilizando PAFC's é de 2,32 MW. Concluiu-se que existe viabilidade técnica para implantação do sistema, o qual será economicamente atraente a médio-longo prazo em dependência do avanço da tecnologia de pilhas a combustível e das mudanças políticas e econômicas do setor energético do país.

Palavras-chave: Aterro sanitário, biogás, gases – purificação, células a combustível.

Abstract

Due to the constants crises in the world caused by the dependence of the petroleum many researches have been done in order to diversify the energy primary sources, such as, solar energy, wind energy, hydraulic energy and biomass energy. Besides, it is every time larger the concern with the atmospheric contamination. Among the alternatives that present a growing interest it is the exploration of the gas generated in landfill that has a medium composition of 50% of methane, 40% of carbon gas and 10% of other gases. In the country, the landfill is rich in organic residues, what contributes to formation of great amounts of methane; however, now the gases are burned without any type of energy use. Of the environmental point of view, the gaseous emissions of landfill contribute to the global heating of the planet with some gases presenting high toxicity degree, bad smell and explosion danger, besides other risks. Like this, the objective of this research is to present the Conceptual Project and preliminary Technician-economical Analysis for the use of the gas generated in landfill, using fuel cell in the electric and thermal energy production, also taking to the decrease of the atmospheric pollution. The project includes a conception of a SYSTEM INTEGRATED innovative in the area of biogas use that consists of the united exploration of the Landfill Complexo Delta (URTR), of the Municipal district of Campinas/SP/Brazil and of the Waste Water Treatment Station (ETE), Piçarrão, of the same Municipal district. In that integration, besides the electric power generation and thermal, it is possible the exploration of the carbon gas for neutralization of alkaline waste water, through a Neutralization Reactor (RNEA) and the use of the sludge generated in the biodigestors of ETE as covering material in URTR. In order to evaluate the energetic potential of this system, the amount of profitable gas was calculated, using different theoretical and experimental methodologies. Using the thermodynamic analysis of the fermentation reactions and combustion was calculated the generated volume of CH_4 a year ($V_{\text{CH}_4} = 149.1 \text{ l/kg}$). For the analysis of the biodegradation reactions was calculated the total volume of gases ($V_{\text{TOTAL}} = 287.7 \text{ l/kg}$). Comparing V_{TOTAL} with V_{CH_4} , it can be confirmed that the composition of CH_4 is in the strip between 50 and 65%, medium values found in the literature. For the analysis of the kinetics of the reactions a factor of biodegradation efficiency is calculated between 46.6 and 55.4%, that you/they are also values found in the literature. The total theoretical and experimental potential of profitable gas for 190,000 ton/year of residues and assuming 60% of extraction of gas is 16.7 million m^3/year . The total potential energy of the landfill using the PAFC is 2.32 MW. It was concluded that technical viability exists for implantation the fuel cell system, which will be economically attractive the medium-long period in dependence of the progress about fuel cell technology and political and economical changes of the energy section in the country.

Word-key: Landfill, landfill gas, biogas, fuel cell, landfill gas pretreatment.

ÍNDICE

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Abreviações e Nomenclatura.....	xvi
Publicações e Apresentações.....	xvii
 Capítulo I – Introdução.....	 1
1.1. Justificativa do estudo.....	5
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Organização do trabalho.....	9
 Capítulo II – Revisão Bibliográfica.....	 10
2.1. Resíduos sólidos.....	10
2.1.1. Fontes de geração de resíduos sólidos.....	11
2.1.2. Fatores que influenciam a geração e a composição dos resíduos.....	12
2.1.3. Composição dos resíduos sólidos.....	13
2.2. Aterros sanitários.....	13
2.2.1. Classificação dos aterros.....	16
2.2.2. Métodos de operação de aterros sanitários.....	17
2.3. Gás de aterro sanitário.....	18
2.3.1. Fatores que afetam a geração de gás.....	22
2.3.2. Composição do gás de aterro sanitário.....	24
2.3.3. Drenagem e captação dos gases gerados.....	25
2.3.4. Alternativas para aproveitamento dos gases de aterro sanitário.....	28
2.3.5. Aspectos econômicos.....	34
2.3.6. Problemas ambientais.....	36

2.4. Sistemas de pré-tratamento de gases de aterro sanitário.....	39
2.5. Pilhas a combustível.....	41
2.5.1. Conceitos gerais.....	43
2.5.2. Tipos de pilhas a combustível e suas aplicações.....	45
2.5.3. Pilhas a combustível de ácido fosfórico.....	47
2.5.4.1. Empresas fabricantes.....	48
2.5.4.2. Aplicações.....	49
2.5.4.3. Principais componentes.....	50
2.6. Sistemas para neutralização de esgoto alcalino.....	60
 Capítulo III – Memorial de Cálculo.....	 62
3.1. Resíduos depositados na URTR.....	62
3.2. Produção de biogás.....	62
3.2.1. Análise termodinâmica.....	63
3.2.2. Análise química.....	64
3.2.3. Cinética de reação.....	65
3.2.4. Metodologias experimentais.....	66
3.3. Sistema de poços.....	68
3.4. Produção de energia elétrica e térmica.....	70
3.4.1. Utilização de um Moto-gerador.....	70
3.4.2. Utilização de uma Pilha a Combustível.....	70
3.5. Neutralização de esgoto alcalino.....	71
3.6. Modelos econômicos.....	72
3.6.1. Estimativa preliminar de custos.....	72
3.6.1.1. Metodologia ERC/DOE.....	73
3.6.1.2. Estimativa teórica.....	78
3.6.2. Avaliação econômica de projetos.....	81

Capítulo VI – Resultados e Discussão.....	83
4.1. Sistema Integrado.....	83
4.1.1. Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR).....	86
4.1.2. Unidade de Pré-tratamento de Gases (UPG).....	94
4.1.3. Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC PC25 TM C).....	98
4.1.4. Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).....	101
4.2. Cálculos.....	104
4.2.1. Cálculos técnicos.....	104
4.2.1.1. Resíduos depositados na URTR - Delta A.....	104
4.2.1.2. Cálculo da produção de biogás por métodos teóricos.....	105
4.2.1.3. Cálculo da produção de biogás sob métodos experimentais.....	109
4.2.1.4. Projeto da distribuição de poços.....	111
4.2.1.5. Cálculo da produção de energia elétrica e térmica.....	113
4.2.1.6. Capacidade de neutralização de esgoto alcalino.....	117
4.2.2. Cálculos econômicos.....	119
4.2.2.1. Estimativa de custo do projeto.....	119
4.2.2.2. Avaliação econômica.....	125
Capítulo V – Conclusões e Trabalhos Futuros.....	131
5.1. Conclusões do ponto de vista técnico.....	131
5.2. Conclusões do ponto de vista econômico.....	132
5.3. Sugestões de trabalhos futuros.....	133
Bibliografia.....	134
Anexos.....	147
Apêndices.....	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Sistema Integrado (URTR / ETE / PAFC).....	7
Figura 2.1.	Etapas de produção de gases em um aterro sanitário.....	20
Figura 2.2.	Geração de gás para componentes biodegradáveis.....	22
Figura 2.3.	Fatores que afetam a geração de gás.....	23
Figura 2.4.	Composição dos gases durante as cinco etapas de geração.....	25
Figura 2.5.	Sistemas de drenagem e captação do gás emitido.....	28
Figura 2.6.	Alternativas de utilização de gás de aterro.....	30
Figura 2.7.	Planta de geração de energia elétrica a partir de gás de aterro	31
Figura 2.8.	Queima de Gases versus Pilha a Combustível.....	36
Figura 2.9.	Migração dos gases em aterros sanitários	37
Figura 2.10.	Barreiras de controle da migração do gás	38
Figura 2.11.	Célula a combustível tipo PEMFC.....	43
Figura 2.12.	Princípio de funcionamento de uma PEMFC	45
Figura 2.13.	Alternativas para produção de compostos a partir de CH ₄	51
Figura 2.14.	Esquema da estrutura básica e de funcionamento de uma PAFC.....	55
Figura 3.1.	Evolução da temperatura durante a degradação anaeróbia.....	65
Figura 3.2.	Distribuição dos poços de captação de gases.....	68
Figura 3.3.	Diagrama de fluxo de investimentos.....	82
Figura 4.1.	Esquema geral do Sistema Integrado.....	84
Figura 4.2.	Sistema Integrado Completo.....	85
Figura 4.3.	Diagrama de fluxo da URTR - Delta A.....	86
Figura 4.4.	Localização do Complexo Delta.....	87
Figura 4.5.	Temperatura média mensal de Campinas em 1999.....	88
Figura 4.6.	Composição média dos resíduos sólidos.....	88
Figura 4.7.	Sistema ativo para captação de gases.....	92
Figura 4.8.	Esquema de um poço para captação de gases	93
Figura 4.9.	Distribuição das fileiras de poços de captação	93
Figura 4.10.	Diagrama da UPG	95

Figura 4.11.	Diagrama UPG, REFORMADOR e PAFC.....	98
Figura 4.12.	Pilha proposta: PAFC PC25 TM C – UTC.....	100
Figura 4.13.	Reator de neutralização.....	101
Figura 4.14.	Diagrama de fluxo da ETE - Piçarrão.....	103
Figura 4.15.	Curva de comportamento da geração de gás na URTR - Delta A.....	110
Figura 4.16.	Efeito da umidade dos resíduos na geração de gás do aterro.....	111
Figura 4.17.	Evolução da eficiência das pilhas a combustível.....	116
Figura 4.18.	Perspectivas de redução de custos das pilhas a combustível.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Produção de resíduos sólidos domiciliares.....	12
Tabela 2.2.	Equivalentes caloríficos do biogás (60% CH ₄).....	29
Tabela 2.3.	Plantas de aproveitamento do gás de aterro sanitário no mundo.....	29
Tabela 2.4.	Investimento médio para recuperação de gás de aterro sanitário (EUA). 34	
Tabela 2.5.	Sistemas para remoção de compostos orgânicos, de cloro e de enxofre..	40
Tabela 2.6.	Características operacionais das células de combustível.....	46
Tabela 2.7.	Aspectos técnicos das células de combustível.....	46
Tabela 2.8.	Materiais utilizados em uma PAFC.....	58
Tabela 3.1.	Taxa de geração de gás distribuída ao longo dos anos.....	67
Tabela 3.2.	Custos de capital de uma PAFC.....	77
Tabela 3.3.	Manutenção de uma PAFC.....	78
Tabela 3.4.	Fatores típicos para estimativa do custo de capital fixo.....	79
Tabela 3.5.	Sumário dos custos de operação.....	80
Tabela 4.1.	Temperatura média mensal de Campinas entre 1960 e 1990.....	87
Tabela 4.2.	Detalhamento qualitativo e estimativa em massa dos resíduos.....	89
Tabela 4.3.	Composição do gás emitido por aterros sanitários.....	89
Tabela 4.4.	Compostos orgânicos não metânicos (NMOC's) em aterros nos EUA....	91
Tabela 4.5.	Composição dos gases de saída da UPG.....	96
Tabela 4.6.	Limites de impurezas permitidos nas PAFC.....	97
Tabela 4.7.	Exaustão da PAFC.	99
Tabela 4.8.	Volume de gás gerado na URTR - Delta A.....	109
Tabela 4.9.	Custos dos catalisadores e absorvedores da UPG.....	121
Tabela 4.10.	Custos de operação do Sistema Integrado.....	124
Tabela 4.11.	Estimativa preliminar de investimento total.....	125
Tabela 4.12.	Estimativa preliminar de custos operacionais totais.....	126

LISTA DE ABREVIÇÕES E NOMENCLATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEMPRE	Centro Empresarial de Compromisso à Reciclagem
CETESB	Companhia Estadual de Tecnologia em Saneamento Ambiental
CHP	<i>Combined Heat and Power Plant</i>
DOE	<i>U.S. Department of Energy</i>
DoE	<i>Environmental Department of England</i>
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano
ERC	<i>Energy Reserch Corporation</i>
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>
NBR	Normalização Brasileira
NMOC	<i>Non Methane Organic Composites</i>
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
RNEA	Reator de Neutralização de Esgoto Alcalino
SMA/SP	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UPG	Unidade de Pré-tratamento de Gases
URTR	Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos

PUBLICAÇÕES E APRESENTAÇÕES

Congressos:

CADAVID, P.; OLIVEIRA, W. **Sistema integrado para aproveitamento de biogás de aterro sanitário utilizando pilhas a combustível**. Anais do I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. p.10. Outubro de 2004.

CADAVID, P.; OLIVEIRA, W. **Uso de pilhas a combustível para aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários**. Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ. p.8. Setembro de 2004.

Artigo indicado e submetido ao comitê revisor da Revista de Engenharia Térmica e ao comitê revisor da Brazilian Journal of Chemical Engineering.

Resumos:

CADAVID, P.; OLIVEIRA, W. **Aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários utilizando pilhas a combustível “O caso do Município de Campinas -S.P. – Brasil”**. III Encontro de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química/UNICAMP. 2003.

Apresentações:

XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ. Apresentação oral: **Uso de pilhas a combustível para aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários**. Universidade Federal de Paraná, UFPR. Curitiba /PR, setembro de 2004.

I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Apresentação oral: **Sistema integrado para aproveitamento de biogás de aterro sanitário utilizando pilhas a combustível**. Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, ICTR. Florianópolis /SC, outubro de 2004.

III Encontro de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química. 2003. Palestra: **Aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários utilizando pilhas a combustível “O caso do Município de Campinas - S.P. – Brasil”**. Pós-graduação FEQ/UNICAMP. Campinas / SP, novembro de 2003.

III Seminário Nacional de Aproveitamento de Resíduos: Tecnologias, Oportunidades e Desafios. Palestra: **Aproveitamento Energético do Gás Gerado em Aterros Sanitários**. Fundação Getulio Vargas. São Paulo / SP, outubro de 2003.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, devido às constantes crises no mundo pela dependência do petróleo, sendo este uma das principais fontes de energia e, também por ser um recurso não renovável, tem-se buscado reduzir esta dependência por meio da diversificação dos recursos energéticos primários. Esta necessidade foi confirmada recentemente, conforme SPIEGEL e PRESTON (2003), no encontro dos líderes mundiais em Johannesburgo, África do Sul, que concordaram em intensificar a utilização de energias renováveis, tais como energia solar, eólica, hidráulica, biomassa, entre outras. Concluíram também que as novas alternativas energéticas a serem desenvolvidas devem ter como prioridade a proteção do meio ambiente.

Hoje, existem várias alternativas para fornecer suprimento de energia e compensar o impacto ambiental que está ocorrendo, principalmente no que diz respeito à mudança do clima, causada pelo efeito estufa. Porém, atualmente todas as alternativas se encontram em desenvolvimento e, ainda não são competitivas do ponto de vista econômico quando comparadas com as tecnologias tradicionais para geração de energia. Por outro lado, a indústria de energia renovável deve superar muitos obstáculos, por exemplo, a falta de interesse do público e do meio político, a pressão de alguns interesses econômicos, a inexistência de uma legislação adequada, a falta de credibilidade e de apoio econômico, além de insuficientes análises técnico-econômicas.

O Brasil tem se destacado no cenário mundial, apresentando importantes avanços científicos e tecnológicos, por exemplo, na produção de álcool combustível para veículos à combustão, além de estudos importantes sobre outras fontes de energia renovável. Apesar destes esforços, o país apresenta ainda uma razoável dependência do petróleo.

O desafio atualmente consiste em encontrar alternativas energéticas, devendo-se aumentar os esforços para superar os obstáculos mencionados, apresentando como um fator fundamental de convencimento a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento de novas fontes energéticas.

No Brasil, por exemplo, pode-se recorrer à outras fontes energéticas, tais como, o biogás, onde há um grande potencial de produção a partir da indústria de cana-de-açúcar, dos biodigestores das plantas de tratamento de esgoto e dos aterros sanitários. Porém, é

prática comum a construção de biodigestores e de aterros sanitários, nos quais os gases são queimados sem qualquer tipo de aproveitamento energético. Vale salientar que o lixo disponível no Brasil é classificado como lixo rico, pela alta percentagem de resíduos orgânicos presentes, o que contribui para formação de grandes quantidades do gás metano aproveitável.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta-se como uma abordagem no sentido do aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários, visando sua aplicação no setor de saneamento ambiental, mais especificamente na utilização da energia elétrica gerada para abastecimento de uma estação de tratamento de esgoto.

Conforme divulgado pelo “guia técnico” do IBAM & ELETROBRÁS (1998), o setor de saneamento corresponde a 2,1% (5,804 GWh/ano) do consumo de energia elétrica do país. A maior parcela do consumo de energia atualmente deriva dos sistemas de abastecimento de água, especificamente da captação, adução e tratamento, que fazem parte essencial do sistema operacional das companhias de saneamento.

Outra parcela importante refere-se aos sistemas de tratamento de esgotos, especificamente os processos envolvendo a coleta, interceptação e tratamento, que têm merecido atenção especial devido às pressões da sociedade civil, através de mecanismos de controle, como as agências ambientais e as promotorias públicas.

Para tentar diminuir os custos operacionais, o setor de saneamento ambiental demanda um melhor posicionamento interativo com outros setores da infra-estrutura urbana, por exemplo, interações com o setor de energia elétrica, sobretudo com enfoque no aproveitamento de resíduos, como insumo energético, notadamente na geração de energia elétrica, a partir do gás de aterros sanitários, para abastecimento de Estações de Tratamento de Água (ETA's) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's).

Do ponto de vista ambiental e, não menos importante que o aspecto econômico referido anteriormente, as emissões gasosas provenientes de aterros sanitários contribuem de uma maneira significativa para a contaminação atmosférica e, para o aquecimento global do planeta. O CH_4 e o CO_2 que não fazem parte do ciclo natural e, outros compostos emanados pelos aterros, contribuem para esses efeitos. Alguns desses gases apresentam alto grau de toxicidade, mau cheiro, perigo de explosão, além de outros riscos.

Segundo KARSOTIS (1981), para tentar diminuir o impacto dessas emissões no ambiente e outros efeitos de risco, na década de setenta foi testada uma primeira alternativa de coleta de gases de aterros e sua posterior queima direta. O grande problema dessa técnica é que são gerados, gás carbônico, adicional ao ciclo natural e, monóxido de carbono, gás altamente tóxico. Além disso, esses gases são responsáveis pelo efeito estufa e pela destruição da camada de ozônio, respectivamente.

Durante as décadas seguintes desenvolveram-se outras técnicas, que tinham como objetivo não só agir sobre essas emissões gasosas, atenuando os efeitos contaminantes, mas também aproveitar a energia que potencialmente fornecem. Dentre as possíveis alternativas, pode-se destacar o uso das termoeletricas e dos motores a combustão, acoplados a geradores de eletricidade. De acordo com ALVES (2000), embora essas tecnologias aproveitem o metano para a geração de energia elétrica, as mesmas apresentam baixa eficiência média de transformação de energia, no máximo 25%, e também não conseguem a diminuição desejada da poluição atmosférica.

No presente cenário aparece a possibilidade do uso de dispositivos eletroquímicos, mais especificamente as Pilhas a Combustível, também citadas na literatura especializada como Células a Combustível ou Células de Energia, que além de viabilizarem a geração de energia elétrica, por apresentarem uma eficiência média superior a 40%, também produzem energia térmica e, reduzem de modo significativo as emissões de CO, NOx e outros gases, quando comparadas com as tecnologias a combustão.

Denomina-se pilha a combustível o conjunto de várias células a combustível, que operam “empilhadas”, da maneira mais íntima possível, e que conjuntamente geram energia elétrica e térmica. Uma célula a combustível é um sistema eletroquímico unitário, cujos principais componentes são ânodo, cátodo e eletrólito, todos em contato apropriado e alojados em uma carcaça externa. Esse dispositivo faz com que a energia das ligações químicas do hidrogênio ao reagir com o oxigênio seja convertida diretamente em energia elétrica, energia térmica e água, por meio de processos físicos, químicos e eletroquímicos.

O hidrogênio, que é o combustível da pilha, obtém-se, por exemplo, pela reforma de compostos orgânicos. Em muitos trabalhos da atualidade, o hidrogênio tem sido apontado como um dos mais prováveis e promissores combustíveis para o futuro, devendo ocupar

lugar de destaque na matriz energética de muitos países, para um futuro determinista de médio-longo prazo, sendo utilizado como combustível automotivo, combustível térmico, para geração de energia elétrica.

Surgem como combustíveis viáveis para obtenção do hidrogênio, o metano (gás natural ou gás do pântano), etano, butano, metanol, etanol, entre outros. O gás de aterro sanitário, rico em gás metano, pode, em princípio, ser utilizado como combustível para as pilhas a combustível, definindo-se assim processos que conduzam ao mesmo tempo ao aproveitamento energético e, à diminuição do impacto ambiental.

Ressalte-se ainda que, nos processos em que se utilizam as pilhas a combustível, além da atenuação do metano, que seria liberado para a atmosfera, por exemplo, a partir dos aterros sanitários, são reduzidas intensamente as emissões de outros poluentes tóxicos, quando comparadas com as provenientes dos processos de combustão.

Salienta-se que, existe uma série de medidas que podem ser adotadas para recuperação de resíduos, por exemplo, a reciclagem de materiais. De acordo com o IPT/CEMPRE (2000) existem três tipos de reciclagem de resíduos:

- i. reciclagem primária, onde se emprega resíduo de um produto para a sua própria produção, por exemplo, uma embalagem de alumínio transforma-se em nova embalagem. Nesse processo são necessários 15 MWh de energia para produção primária do alumínio, enquanto na reciclagem o consumo é de 0,75 MWh;
- ii. reciclagem secundária, que se baseia na utilização do resíduo de um produto para a confecção de outro, por exemplo, embalagens de polietileno tereftalato (PET), são transformadas em fibra de tecido, tapetes, cortinas e/ou matérias-primas para novos produtos. São necessários 5 MWh na produção primária do PET enquanto na reciclagem o consumo é de 1,5 MWh;
- iii. reciclagem terciária, que recupera produtos químicos ou energia, a partir de resíduos, por exemplo, a recuperação de energia a partir da incineração, da compostagem, do aproveitamento do biogás ou sistemas integrados associados.

A proposta deste estudo de pesquisa científico-tecnológica insere-se no caso da reciclagem terciária, especificamente no aproveitamento energético do gás produzido pelos resíduos sólidos domiciliares e comerciais.

1.1. Justificativa do estudo

“A relutância apresentada por potenciais investidores para considerar projetos de gás de aterros é indubitavelmente devida à falta de dados precisos, seja para produção de gás, seja para estudos de mercado para a energia a ser produzida”.

Esta afirmação foi relatada pelos técnicos especialistas da U.S. EPA na *2nd International Methane Mitigation Conference*, realizada em Novosibirsk, na Rússia em junho de 2000. A referida afirmação se mantém atualizada segundo os relatos técnicos da U.S. EPA no Workshop International denominado “Geração de Eletricidade com Gás de Lixo em São Paulo” realizado em São Paulo, Brasil em junho de 2001 (U.S. EPA, 2001).

Além disso, o *Landfill Methane Outreach Program*, da U.S. EPA tem procurado auxiliar os países, entre os quais notadamente o Brasil, não somente no intercâmbio técnico e científico, mas, sobretudo em estudos que apontem para a viabilização técnico-econômica do aproveitamento energético do biogás.

Diante de novas perspectivas de estudos e projetos sobre o assunto e, no decorrer desta dissertação, será definido um Projeto Conceitual, baseado em cálculos elaborados a partir de metodologias conhecidas, dados teóricos e, experimentais, provenientes de diferentes fontes. O projeto está enfocado na análise da viabilidade técnico-econômica de instalação de pilhas a combustível em aterros sanitários, avaliando-se, deste modo, a possibilidade de se produzir energia elétrica e energia térmica com menor impacto ambiental.

Este estudo leva em consideração a Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR), Complexo Delta, do município de Campinas, Estado de São Paulo, Brasil, que mediante uma análise preliminar apresentou as condições necessárias para implantação de um projeto de aproveitamento energético do gás de aterro. Entre as condições mais importantes destacam-se:

- Na URTR - Delta A foram depositados até hoje mais de um milhão de toneladas de resíduos e, segundo a U.S. EPA (1996), URTR's com essa quantidade de

resíduos depositados apresentam uma produção de gás que permite a utilização de sistemas para aproveitamento energético, tais como, motores a combustão ou pilhas a combustível;

- a composição do lixo é rica em matéria orgânica, maximizando a produção de CH_4 aproveitável e,
- a vida útil do aterro sanitário é superior a 20 anos.

O projeto em estudo inclui a concepção de um SISTEMA INTEGRADO, inovador na área de aproveitamento de biogás, que consiste na exploração conjunta da URTR-Delta A e, da ETE-Piçarrão, favorecida pela proximidade entre as duas unidades, a qual permitirá maximizar o aproveitamento do biogás, otimizar a produção de CH_4 e diminuir o impacto ambiental do sistema como um todo. O referido sistema é apresentado na figura 1.1, podendo-se destacar as seguintes características:

- utilização conjunto do CH_4 e do CO_2 gerados em URTR's, tratando-se de um estudo pioneiro no Brasil;
- geração de energia elétrica e térmica, através do uso de pilhas a combustível, representativas de uma tecnologia nova e ainda em intenso desenvolvimento tecnológico em nível mundial;
- utilização de uma tecnologia relativamente recente na geração de energia, abordando-se um estudo na procura de combustíveis alternativos ao petróleo;
- atenuação do impacto ambiental devido à diminuição das emissões na URTR de CH_4 e outros gases tóxicos;
- diminuição nas emissões dos gases próprios do sistema, devido ao aproveitamento energético mais eficaz, no caso do uso das pilhas a combustível, quando comparados com motores a combustão e turbinas a gás;
- utilização de um processo ambientalmente correto para correção de pH de esgoto alcalino, aproveitando o CO_2 disponível;
- solução do problema de disposição de lodos gerados na ETE, visando o aumento da quantidade do CH_4 gerado na URTR.

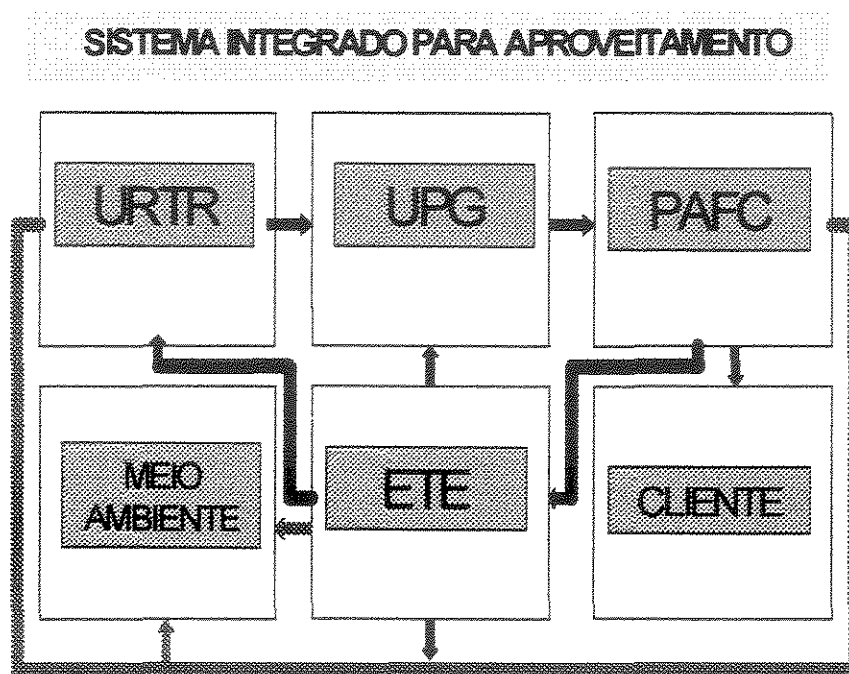


Figura 1.1. Sistema Integrado (URTR / ETE / PAFC).

1.2. Objetivos

O objetivo deste estudo é apresentar um projeto conceitual para aproveitamento do gás de aterro sanitário utilizando pilhas a combustível, para geração de energia elétrica e térmica; detalhando e analisando os aspectos técnico-econômicos envolvidos.

Os objetivos específicos visam:

- apresentar alternativas técnicas relevantes para a concepção e operação de um aterro sanitário com fins de aproveitamento energético;
- calcular a quantidade de gás gerado na URTR, por meio de métodos teóricos e experimentais, a partir da quantidade e da composição dos resíduos domiciliares e comerciais gerados no município e, da provável composição química dos gases, levando-se em consideração a eficiência dos processos de decomposição dos resíduos e de extração dos gases;
- dimensionar o sistema de geração de energia, determinado-se o potencial de produção de energia elétrica e térmica;
- determinar os processos necessários para recuperação e aproveitamento energético do gás, tais como, o sistema de captação, a unidade de pré-tratamento e de reforma de gás, o tipo de pilha a combustível e o reator para neutralização de esgoto alcalino, dando-se importância aos aspectos técnicos relevantes de cada componente do sistema;
- procurar alternativas para implantação da pilha a combustível e aproveitamento energético do gás gerado na URTR;
- apresentar uma estimativa preliminar dos custos e uma avaliação da viabilidade do projeto.

1.3. Organização do trabalho

No Capítulo II, apresenta-se a revisão bibliográfica referente a todos os aspectos envolvidos no projeto e, nas diferentes alternativas viáveis para cada etapa do sistema de aproveitamento energético do gás de aterro sanitário. Como parte deste capítulo tem-se a discussão de temas relacionados a:

- resíduos sólidos;
- aterros sanitários;
- gás de aterro sanitário;
- sistemas de pré-tratamento do gás de aterro sanitário;
- aspectos teóricos das pilhas a combustível e,
- neutralização de esgoto alcalino.

No Capítulo III, apresentam-se os métodos teóricos e experimentais necessários para:

- determinar o potencial de resíduos depositados na URTR;
- calcular a quantidade de CH_4 produzido no aterro sanitário;
- dimensionar o sistema de captação de gases;
- calcular a produção de energia elétrica e térmica;
- definir a capacidade de neutralização de esgoto alcalino e,
- estimar os custos envolvidos para a avaliação econômica preliminar do projeto.

No Capítulo IV, apresenta-se a proposta do Sistema Integrado para o projeto do município de Campinas, fazendo uma descrição detalhada de cada etapa do processo:

- Unidade de Pré-tratamento do Gás (UPG) e componentes;
- Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) e componentes;
- Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) e componentes.

Apresentam-se ainda os cálculos e resultados técnico-econômicos relativos ao projeto proposto.

Finalmente no Capítulo V, apresentam-se as conclusões do ponto de vista técnico-econômico e as sugestões para futuros trabalhos nesta área.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica abrange itens relacionados tanto aos aterros sanitários bem como às pilhas a combustível. São incluídas também informações referentes às unidades de processamento necessárias para o acoplamento dos diversos sistemas, tais como, pré-tratamento de gases, reforma de combustível e neutralização de esgoto.

2.1. Resíduos sólidos

A palavra resíduo deriva do latim *residuu*, significando aquilo que resta de qualquer substância. Posteriormente foi adjetivada de “sólido” para diferenciar dos resíduos líquidos lançados com os esgotos domésticos e das emissões gasosas das chaminés à atmosfera, SMA/SP (1993). Conforme a norma brasileira ABNT/NBR 10.004(1987), os resíduos sólidos são definidos como:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de variação. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos da água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Dentro do contexto de aproveitamento de resíduos sólidos, pode-se notar que, as definições constituem conceitos relativos, do ponto de vista de diferentes autores, como por exemplo, a descrição de CAMPBELL, citado por TEIXEIRA (1993), a qual relata que “resíduos são uma fonte potencial de matéria-prima para alguém, no local errado e no tempo errado”. Ainda o mesmo autor coloca:

“é interessante expressar a relatividade do conceito de resíduo, pois parte da premissa de que algo que é resíduo para alguém é passível de se tornar matéria prima para outra pessoa. Isso é correto até certo ponto, pois se deve reconhecer a realidade de que há restrições técnicas e econômicas à completa reciclagem e reutilização”.

Segundo SODRÉ (1997), o ser humano se livra do lixo jogando-o fora de seu alcance, mas não do ambiente em que vive, e segundo o mesmo autor, essa atitude tem um duplo custo. Primeiro, o preço pago pela perda do que serviria como matéria-prima em um novo ciclo de produção; segundo, o custo da remoção e disposição final dos resíduos. Enquanto o custo de transformação da matéria-prima está embutido no preço final do produto, o custo do tratamento dos resíduos recai sobre a sociedade como um todo, sem distinguir o nível de consumo de cada um.

2.1.1. Fontes de geração de resíduos sólidos

De acordo com a U.S. EPA (1990), os resíduos que são depositados nos aterros sanitários têm origem em três fontes: domiciliar ou residencial, comercial e industrial. Os resíduos domiciliares e comerciais são denominados de Resíduos Sólidos Municipais.

Segundo TCHOBANOGLIOUS et al. (1993), as instalações, as atividades e os locais onde são gerados os resíduos, de acordo com suas fontes específicas são classificados em:

- residenciais, são resíduos gerados em residências unifamiliares e multifamiliares, edifícios de pouca, média e grande altura;
- comerciais, são gerados em lojas, residências, mercados, edifícios de escritórios, hotéis, motéis, lojas de impressos, mecânicas, entre outras;
- institucionais, são gerados em escolas, hospitais, prisões, centros governamentais;
- construção e demolição são gerados em novas construções, reparos/reformas, demolições de edifícios, quebra de pavimento;
- serviços municipais são gerados em limpeza de ruas, praças, parques, praias e outras áreas de recreação;
- estações de tratamento, gerados em estações de tratamento de água, esgoto e processos de tratamento industriais;
- resíduos sólidos municipais, gerados em todas as fontes acima citadas;
- industriais, são resíduos gerados em construções e demolições, fabricações leves e pesadas, refinarias, indústrias químicas, entre outras indústrias;
- agrícolas, culturas, hortas, vinhedos, cana de açúcar e outros.

2.1.2. Fatores que influenciam a geração e a composição dos resíduos

De acordo com LIMA (1995), alguns dos fatores que influenciam a origem e geração dos resíduos são:

- número de habitantes do local;
- área relativa de produção;
- variações sazonais;
- condições climáticas;
- socioeconômicos: costumes da população, nível educacional, poder aquisitivo;
- coleta: tempo, eficiência, tipo de equipamento;
- disciplina e controle dos pontos produtores e,
- leis e regulamentações específicas.

O mesmo autor ressalta os aspectos econômicos como um dos fatores mais importantes para a origem e a formação dos resíduos sólidos. Quando ocorrem variações na economia de um “sistema”, seus reflexos são imediatamente percebidos nos locais de disposição e tratamento dos resíduos. Outros fatores também são importantes, por exemplo, as migrações periódicas nas férias de verão e inverno, onde ocorrem consideráveis mudanças na rotina dos estabelecimentos comerciais e industriais, principalmente nas cidades turísticas.

De acordo com a SMA/SP (1998), a produção média diária de uma pessoa é de 0,6 kg/hab/dia de resíduos. O mesmo informe apresenta a tabela 2.1, que ilustra a taxa *per capita* de produção de resíduos sólidos domiciliares em função da população.

Tabela 2.1. Produção de resíduos sólidos domiciliares.

População (Nº Habitantes)	Produção de resíduos <i>per capita</i> (kg/hab/dia)
Até 100 mil	0,4
100 mil a 200 mil	0,5
200 mil a 500 mil	0,6
> 500 mil	0,7

Fonte: Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo (SMA/SP, 1998).

2.1.3. Composição dos resíduos sólidos

A composição dos resíduos sólidos é função de cada atividade desenvolvida pelo homem e, sofre variações com o decorrer do tempo, conforme o desenvolvimento de uma região e depende das modificações advindas da transformação dos processos industriais.

A composição dos resíduos sólidos pode ser classificada de diferentes formas, considerando-se, o tipo de material, a biodegradação, a origem, entre outras. A classificação quanto ao tipo de material é a mais usual. A seguinte classificação foi tomada do Departamento Ambiental da Inglaterra, DoE (1992):

- matéria orgânica;
- papel e papelão;
- plástico duro e plástico filme;
- metal ferroso;
- metal não ferroso;
- vidro;
- têxteis;
- entulho, madeira e similares, por exemplo, resíduos de jardinagem;
- outros materiais combustíveis e não combustíveis.

2.2. Aterros sanitários

Para a ABNT/NBR 8419 (1984), “aterro sanitário é o processo utilizado para disposição de resíduos sólidos no solo, em especial lixo domiciliar, que, fundamentado em princípios de engenharia e procedimentos operacionais específicos, permitem a configuração segura, em termos de controle da poluição ambiental e proteção ao meio ambiente”.

Levando em consideração uma definição mais genérica, LIMA (1995) cita que um aterro sanitário assume o comportamento de um biodigestor ou reator biológico, podendo ser definido, guardando as devidas particularidades, como um reator heterogêneo não convencional, já que a matéria orgânica presente no lixo, quando aterrada, sofre um

processo de digestão similar ao que ocorre em digestores de meio sólido. Complementa ainda que, nos aterros sanitários ocorrem processos capazes de bioestabilizar a matéria orgânica inclusive os metais pesados. Segundo FERRUCCIO (1997), a definição anterior de Lima é semelhante à de muitos outros autores, como por exemplo, CARRA e COSSU (1991), STEGMANN (1991), NILSSON e EDNER (1991).

Segundo NUNES (1994), os aterros sanitários têm um importante papel no Sistema Integrado de resíduos sólidos. Conforme LOUWMAN (1992), o aterro sanitário é o método final de tratamento de resíduos, quando já foram utilizados os demais métodos possíveis. De acordo com COSSU (1989), países como Canadá, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Itália, Japão, Holanda, Polônia, África do Sul, Suécia, Suíça, Reino Unido e Estados Unidos, depõem cerca de 70% dos seus resíduos em aterros sanitários.

Segundo MELDONIAN (1998), as vantagens que podem ser destacadas do aterro sanitário, quando comparados com outros métodos de disposição de resíduos sólidos são citadas a seguir:

- propicia uma disposição adequada do lixo;
- o custo de investimento é inferior às opções de tratamento;
- oferece grande capacidade de absorção de resíduos e,
- comparativamente tem o menor custo de operação.

Embora ofereça a melhor forma de disposição do lixo, um aterro sanitário também possui desvantagens (MELDONIAN, 1998):

- requer a disponibilidade de grandes áreas próximas às cidades, para comportar todo o volume de lixo e não encarecer o seu transporte;
- necessita de disponibilidade de material para cobertura diária;
- apresenta riscos de contaminação do solo, águas superficiais e lençóis freáticos, como consequência da ação do chorume;
- a operação adequada é dependente das condições climáticas e,
- não assegura qualquer forma de um efetivo tratamento do lixo, mas simplesmente sua disposição, com todas as suas características.

Fatores importantes a serem considerados nas definições de projeto, tomados na elaboração do denominado Projeto Conceitual, incluem alguns problemas como o processo de geração e de migração do gás, de geração e contaminação ambiental pelo chorume, bem como o aspecto estético, como a paisagem e o controle do lixo (OGATA, 1983). Para caracterizar um aterro sanitário deve-se atender a todas as especificações técnicas da norma brasileira ABNT/NBR 8419 (1984).

A geração de gás em aterros sanitários pode causar problemas, dentre os quais estão o acúmulo de metano, que pode gerar risco de explosão. Além disso, a ausência de percursos adequados para o gás fluir faz com que a pressão do gás aumente até gerar grandes rachaduras e rupturas na geomembrana (U.S. EPA, 1992).

Outros gases gerados pela decomposição dos resíduos, mesmo em pequenas quantidades, apresentam fortes odores. Dentre eles o gás sulfídrico (H_2S), amoníaco (NH_3), o indol e as mercaptanas. (POUSTCHI et al., 1989). Alguns dos gases produzidos, apesar de perigosos, são inodoros, como o metano e o dióxido de carbono.

Além dos odores, há também problemas de formação de vapores tóxicos e migração não controlada dos gases. Estes poderão causar náuseas, vômitos, dores de cabeça, perda de apetite, respiração enfraquecida, reações alérgicas, insônia, irritação nos olhos, nariz e garganta, destruição do senso de bem estar e do ambiente externo causando incômodos, aborrecimentos e depressões a pessoas que residem próximas aos aterros sanitários (POUSTCHI et al., 1989).

Atualmente, em muitos aterros, a infiltração de água no resíduo sólido é restrita praticamente ao mínimo, reduzindo desta forma, a quantidade de gás gerado e, conseqüentemente, o impacto ambiental. Isso os torna pouco atrativos para utilização como sistemas que podem originar renda com a recuperação do gás e, conseqüente geração de energia elétrica e térmica. Para resolver este problema tem-se aplicado técnicas de isolamento total do aterro podendo-se aproveitar os gases gerados e evitando-se a contaminação ambiental.

Desde o começo da década dos anos noventa, a legislação ambiental da Europa tem favorecido a construção de aterros sanitários de retenção total, “*containment sites*”, os

quais são projetados para isolar os resíduos e o chorume resultantes, do meio ambiente (DoE, 1986).

Todos os problemas e perigos envolvidos na construção de um aterro sanitário podem, entretanto, ser perfeitamente controlados, caso a sua construção seja subordinada a um planejamento global, e obedeça aos critérios apropriados de projeto. Este planejamento compreende o estudo detalhado dos resíduos que irão constituir o aterro, a avaliação da adequação do local, o estudo e a execução de projeto de engenharia para a construção das células de confinamento, o desenvolvimento do aterro, o controle de poluentes e, finalmente, o controle e acompanhamento da execução por técnicos habilitados (PINTO, 1979).

2.2.1. Classificação dos aterros

Segundo MELDONIAN (1998), de acordo com a disposição dos resíduos sólidos os aterros podem ser classificados como:

- **aterros comuns:** mais conhecidos como lixões, lixeiras ou vazadouros, onde foi determinada uma área para depositar o lixo sem nenhum tipo de planejamento e controle. Este sistema é indesejável sob aspectos sanitários e ambientais, porém considera-se como o sistema mais econômico;
- **aterros controlados:** diferenciam-se dos anteriores pelo fato de serem cobertos diariamente por uma camada de material inerte;
- **aterros sanitários:** são sistemas desejáveis sob aspectos sanitários e ambientais, porém envolvem altos custos de operação. De acordo com a ABTN/NBR 10.004 (1987) são definidos como:

“a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Método este que utiliza princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível, reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário”.

2.2.2. Métodos de operação de aterros sanitários

Segundo BALDERRAMA (1993) e PINTO (1979), de acordo com a definição de aterro sanitário, que envolve as etapas de espalhamento, compactação e cobertura diária, consideram que os três principais métodos de disposição são:

- i. **método da área:** utilizado quando a topografia apresenta-se irregular. Neste caso, o aterro é executado sobre o terreno acidentado, utilizando-se as depressões existentes, e construindo-se células de confinamento de maneira superpostas, sendo que o resíduo sólido é espalhado e compactado sobre a superfície original do solo. Este é recomendado quando o lençol de água subterrânea está próximo à superfície;
- ii. **método da trincheira:** neste método os resíduos são espalhados e compactados em uma vala ou trincheira escavada. O material de cobertura, retirado dessa escavação, é espalhado e compactado sobre os resíduos, o que facilita a operação do aterro. Este método é mais indicado para os casos em que os terrenos são planos, e onde o lençol freático não está próximo à superfície;
- iii. **método da rampa:** este método aproveita geralmente um talude ou contenção existente, sendo o material de cobertura escavado.

Uma parte fundamental de um aterro sanitário é a formação das células de confinamento ou compartimentos para confinamento do lixo, devendo ter de 2 a 3 metros de altura, chegando a atingir 5 metros, como nos aterros que recebem lixo da cidade de São Paulo (PINTO, 1979).

Conforme KARSIOTIS (1981), DoE (1995) e HUTCHINGS (1996), os principais métodos de operação do aterro sanitário que conduzem ao aumento da geração de gás rico em CH_4 tornando-o viável para aproveitamento energético, são:

compressão dos resíduos: em teoria, uma alta densidade de resíduos permite reter melhor a umidade e, criar uma maior superfície de atividade microbiana, mas tem-se que levar em conta que a compressão não deve chegar a ponto de limitar totalmente a permeação da água;

escolha do material de cobertura: para otimização da produção de gases;

- **adição de CaCO_3 :** para ter um efeito tampão, *buffer*;

- **adição de água:** para incrementar ou manter a umidade no seio da massa em digestão.

Podem ser somados aos métodos anteriores, de acordo com CUNHA (2002), as seguintes operações:

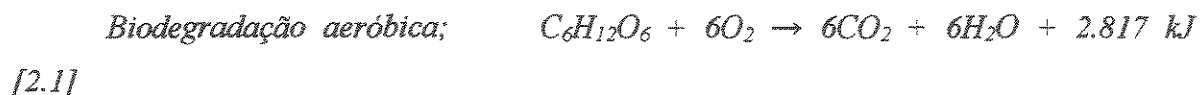
- impermeabilizar a superfície livre do aterro para impedir a difusão de gases ou intrusão de ar, principalmente oxigênio;
- criar pontos de concentração do gás com pressão negativa e de valor reduzido. A extração de gases com valores de pressão negativa elevada pode ocasionar entrada de ar no interior do leito de resíduos, conduzindo à perda do ambiente anaeróbico e, além disso, aumentar consideravelmente o risco de explosão pela presença do oxigênio;
- reinjetar na massa do aterro nutrientes e organismos anaeróbicos lixiviados para líquidos percolados tais como chorume e lodos de esgoto digerido anaerobicamente. A recirculação por lixiviação é empregada para distribuir bactérias, nutrientes e umidade, de maneira mais uniforme. Desta forma, a geração do gás é maximizada atingindo altos fluxos, que são necessários para utilização de sistemas de recuperação do gás de aterro sanitário.

2.3. Gás de aterro sanitário

Quando os resíduos são depositados nos aterros sanitários, acontece uma decomposição anaeróbica que produz o gás de aterro sanitário, também chamado biogás, gás de lixo ou em Inglês, *landfill gas*. Em alguns aterros, o gás gerado contém aproximadamente 50% de CH₄, que pode ser usado para propósitos energéticos. Conforme SCOTT (1995), o gás de aterro pode ser definido como um composto de todos os gases e vapores gerados como resultado da deposição de resíduos em um aterro sanitário.

ATTEWELL (1993) e EDEN (1995) estimaram que a geração de gás de aterro sanitário pode ocorrer entre os primeiros 10 a 15 anos a partir da deposição dos resíduos e, depois desse período, a geração de gás começa a diminuir até chegar às pequenas quantidades que podem continuar sendo emitidas por cerca de 50 anos ou mais.

De acordo com KARSIOTIS (1981), a degradação dos compostos orgânicos no aterro sanitário é feita por bactérias, a qual é chamada de biodegradação. Na superfície do aterro, a degradação é aeróbica e produz CO_2 , água e crescimento de bactérias, enquanto abaixo da superfície, onde quase não há presença de oxigênio, a degradação é anaeróbica e, produz principalmente CH_4 , CO_2 e crescimento de bactérias anaeróbicas. Ambos processos são exotérmicos e as reações que os representam são apresentadas a seguir:

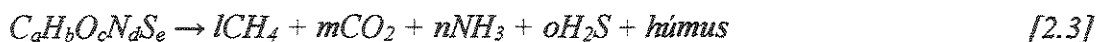


A degradação anaeróbica dos compostos orgânicos ocorre em duas etapas:

- i. **Produção ácida:** pH entre 4,5 e 6,5, com geração principalmente de ácidos orgânicos, CO_2 , H_2O e bactérias;
- ii. **Produção de CH_4 :** pH entre 6,8 e 7,2, com geração principalmente de CH_4 , CO_2 e bactérias.

O mesmo autor salienta que as bactérias metanogênicas são necessariamente anaeróbicas, conhecendo-se pelo menos 10 espécies diferentes, específicas para cada tipo de substrato. Todas essas espécies apresentam uma baixa capacidade de crescimento, a qual é influenciada por fatores ambientais físicos e químicos, que conseqüentemente o processo de metanogênese acaba por diminuir a velocidade de produção de CH_4 . A quantidade de CH_4 vai depender, por exemplo, de fatores tais como, a quantidade e tipo de resíduo depositado, das condições de temperatura, pH, alcalinidade e umidade.

Segundo LUTTON et al. (1979), o processo bioquímico para geração de gás por decomposição anaeróbica de materiais orgânicos colocados em um aterro sanitário, pode ser representado de modo geral pela reação:



Conforme KARSIOTIS (1981), DoE (1995) e HUTCHINGS (1996), um aterro sanitário sob condições ambientais favoráveis pode apresentar cinco fases de produção de gás. A primeira fase é aeróbica, a segunda é hidrólise anaeróbica, a terceira é o começo da metanogênese, a quarta a estabilização da metanogênese, que ocorre entre 180 e 500 dias após o início da primeira fase e, por último a etapa de oxidação ou entrada de ar. Na figura 2.1. apresenta-se um diagrama de fluxo das etapas de produção de gases em um aterro sanitário.

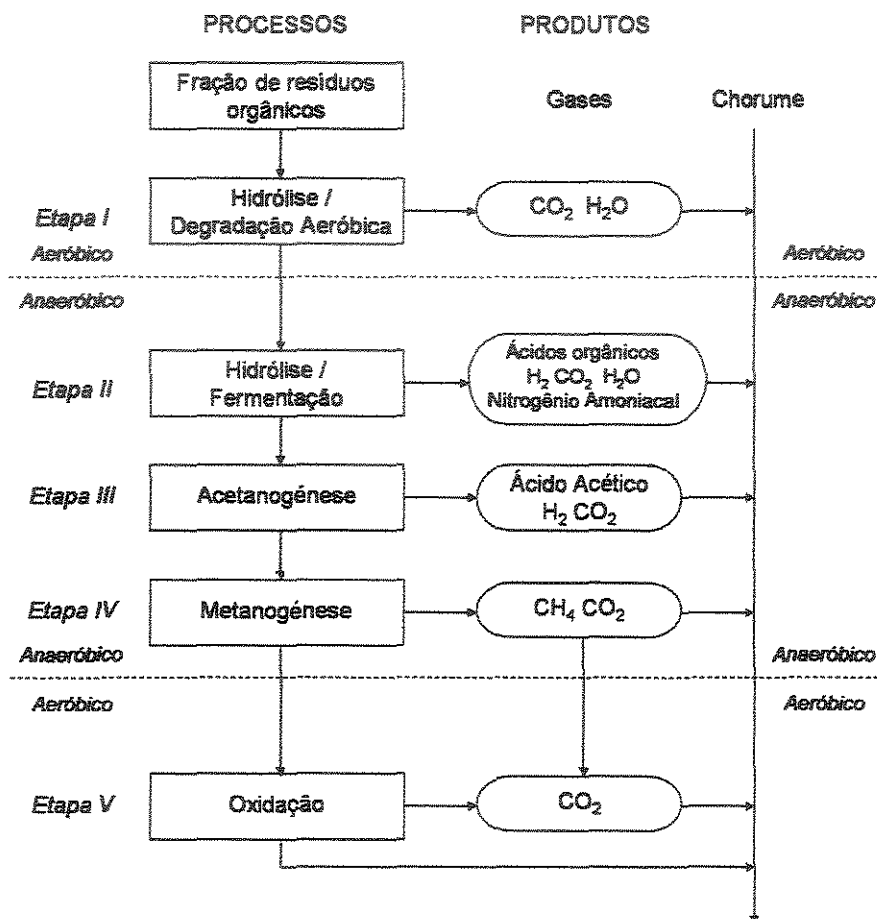


Figura 2.1. Etapas de produção de gases em um aterro sanitário (DoE, 1995).

A degradação dos resíduos de um aterro compreendem as seguintes etapas:

- **hidrólise ou degradação aeróbica:** processos que ocorrem durante a fase de deposição enquanto o material fica exposto a uma alta concentração de oxigênio. Durante esse período os microorganismos aeróbicos (bactérias) degradam a matéria orgânica gerando CO₂, água e matéria orgânica parcialmente degradada. A intensa atividade microbiana gera calor e aumenta a

temperatura dos resíduos para valores entre 80 e 90°C. A presença de odores desagradáveis é uma característica associada a esta etapa devido à presença de ésteres orgânicos;

- **hidrólise e fermentação:** na presença de um ambiente anaeróbico e de alguns materiais mais complexos, tais como, celulose, gorduras, proteínas e carboidratos. Os mesmos são fermentados por bactérias e suas ligações químicas são quebradas até formar compostos ácidos solúveis tais como ácidos graxos e amônia. Durante esta etapa o nitrogênio é substituído pela geração de CO_2 , H_2 e formação de chorume. A temperatura diminui até ficar entre 30 e 50°C, com esta fase podendo durar vários meses;
- **acetogênese:** ocorre em um ambiente anaeróbico, e as bactérias transformam os ácidos solúveis formados na etapa anterior em acetatos, CO_2 e H_2 . Durante essa etapa, outra bactéria converte H_2 , CO_2 e carboidratos em ácido acético;
- **metanogênese:** em um ambiente totalmente anaeróbico, a bactéria metanogênica se torna dominante dando início à produção de CH_4 . O referido microorganismo metaboliza o acetato formando CH_4 , CO_2 , H_2O e calor;
- **etapa final:** nesta etapa já foram esgotados os resíduos biodegradáveis e a taxa de produção de gás diminui permitindo a entrada de ar e progressivamente vai se restabelecendo as condições aeróbicas.

De acordo com HAMADA (1997), a geração de gás de aterro sanitário pode ser estimada com base na composição química esperada para os resíduos aterrados, especificamente os componentes orgânicos biodegradáveis. Por outro lado, a velocidade de degradação vai depender da natureza do componente, classificado-se como segue:

- rapidamente biodegradável;
- lentamente biodegradável;
- não biodegradável ou dificilmente biodegradáveis.

Os compostos rapidamente biodegradáveis incluem restos de alimento, papel e papelão, que do ponto de vista prático demoram, em média, seis anos para atingirem a estabilização. No decorrer deste período, o primeiro ano compreende uma fase de adaptação e a geração de gases é praticamente nula. Após o primeiro ano inicia-se a produção de CH_4 , atingindo-se um pico ao final do segundo ano.

Os compostos lentamente biodegradáveis incluem materiais têxteis e madeira, estimando-se um tempo médio para estabilização total de 16 anos. Neste caso, somente ao final do primeiro ano verifica-se o início de produção de gases, que atinge um pico aproximadamente ao final do sexto ano, chegando gradativamente a zero no décimo sexto ano. Como forma de se estabelecer critérios para quantificação dos gases gerados, considera-se a distribuição triangular, apresentada na figura 2.2.

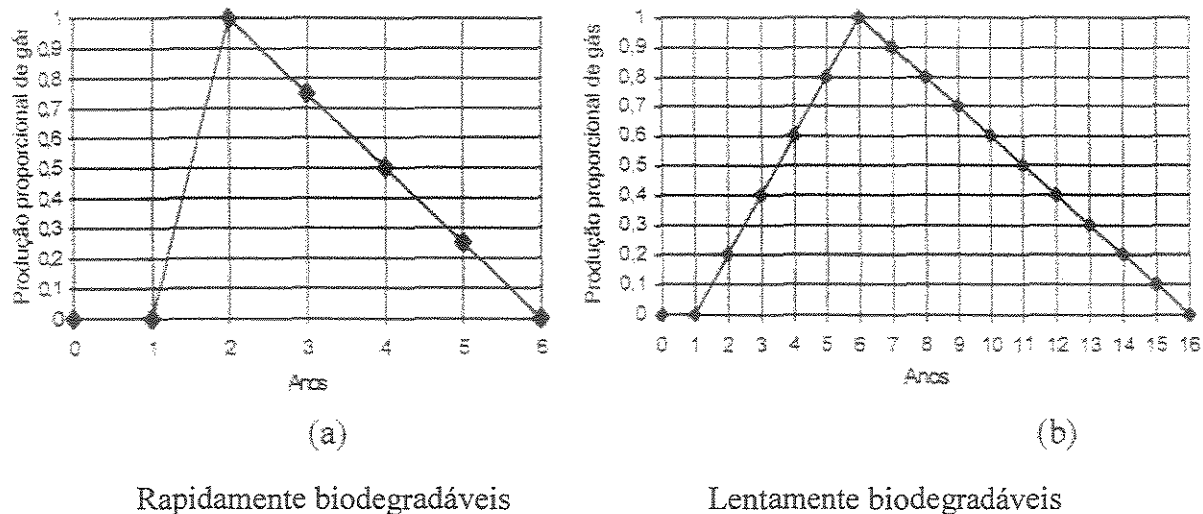


Figura 2.2. Geração de gás para componentes biodegradáveis (CUNHA, 2002).

Os compostos não biodegradáveis incluem materiais como plásticos, vidros, metais, entre outros. Esses materiais apresentam uma degradação muito lenta ou inexistente, portanto, a geração de gases é pouco significativa para o aproveitamento energético de um aterro sanitário.

2.3.1. Fatores que afetam a geração de gás

Conforme KARSIOTIS (1981), DoE (1995) e HUTCHINGS (1996), as condições favoráveis ou fatores adequados que afetam a produção de CH_4 são:

- **umidade:** o conteúdo de umidade ideal situa-se entre 60 e 80% em massa. Segundo DoE (1986), em termos práticos, um percentual de umidade acima de 40% em condições anaeróbicas garante a degradação, enquanto abaixo de 40% a decomposição se reduz drasticamente;

- **temperatura:** a faixa ótima está entre 30 e 35°C, mas a faixa total de operação aceitável está entre 25 e 40°C. Temperatura abaixo de 15°C limita severamente a metanogênese (DoE, 1991);
- **pH:** uma ótima metanogênese ocorre entre 6,8 e 7,2 e segundo DoE (1991) uma faixa de produção razoável de metano poderia estar entre 6,5 e 8,5;
- **alcalinidade:** maior que 2.000 mg/L de CaCO₃;
- **composição do resíduo:** afeta diretamente a taxa, composição e quantidade dos gases produzidos. Para casos particulares, resíduos tóxicos e traços de metais podem inibir a produção de metano, assim como a falta de nitrogênio. Sendo a razão ideal entre C:N igual a 16;
- **conteúdo de nutrientes:** as bactérias existentes nos aterros sanitários precisam de vários nutrientes para crescer. Dentre tais nutrientes, cita-se carbono primário, hidrogênio, nitrogênio, fósforo e pequenas quantidades de sódio, cálcio, magnésio e algum traços de metais (Mc BEAN et al., 1995);
- **profundidade do aterro sanitário:** os processos anaeróbicos geralmente acontecem em profundidades superiores a 5 metros, onde não há presença de oxigênio ou intercâmbio de gases com os da superfície que deve ser mínimo ou inexistente. A maior taxa de produção de metano é alcançada em condições totalmente anaeróbicas.

Na figura 2.3 apresenta-se um resumo dos principais fatores externos e internos que afetam a geração de gás em um aterro sanitário.

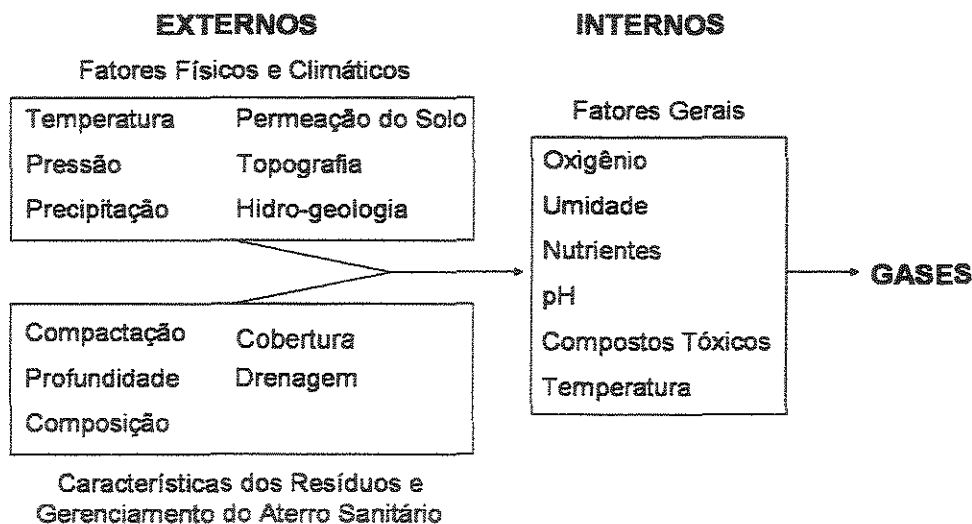


Figura 2.3. Fatores que afetam a geração de gás.

2.3.2. Composição do gás de aterro sanitário

Os principais gases encontrados nos aterros sanitários são: metano, dióxido de carbono, nitrogênio, oxigênio, ar, amônia, hidrogênio e gás sulfídrico. Os gases produzidos em maiores quantidades são CH_4 e CO_2 totalizando mais de 90% do volume de gás gerado (TCHOBANOGLOUS et al., 1977). Essa mistura não ocorre até o aterro sanitário tornar-se anaeróbico (U.S. EPA, 1992).

As emissões de compostos orgânicos não metânicos (NMOC's), compreendem mais de 100 variedades de compostos orgânicos voláteis e poluentes do ar perigosos, tais como cloreto de vinileno e benzeno, sendo que essas emissões geralmente representam menos de 1% da composição total do gás de um aterro sanitário (U.S. EPA, 1992).

Durante o primeiro ano, depois dos materiais serem colocados no aterro sanitário, o gás predominante é CO_2 , sendo este inadequado para recuperação e uso. Após esse período a concentração de CH_4 aumenta e, então, o gás pode ser utilizado como fonte de combustível ou como fonte de energia (U.S. EPA, 1992). O processo bioquímico evolui até a concentração de CH_4 atingir valores entre 50 e 60%. O aterro pode então continuar produzindo CH_4 nessas concentrações por 10, 20 ou mais anos, segundo os estudos de ROBINSON et al. (1986).

As mudanças na composição dos gases, durante as cinco etapas de formação, são descritas pelo seguinte modelo clássico desenvolvido por FARQUHAR e ROVERS (1973), visualizado na figura 2.4.

A velocidade de produção de gás está relacionada com a velocidade de decomposição dos resíduos e é altamente dependente da umidade. A taxa de produção do gás a velocidades mais elevadas ocorre com os teores de umidade na faixa de 60 a 80% de saturação. Uma típica taxa de produção de gás por resíduo sólido úmido situa-se entre 20 e 50 mL/kg/h, podendo continuar alta por décadas. Baixas taxas de produção podem continuar por séculos devido à quantidade de material, e resistência do mesmo a biodegradação (U.S. EPA, 1992).

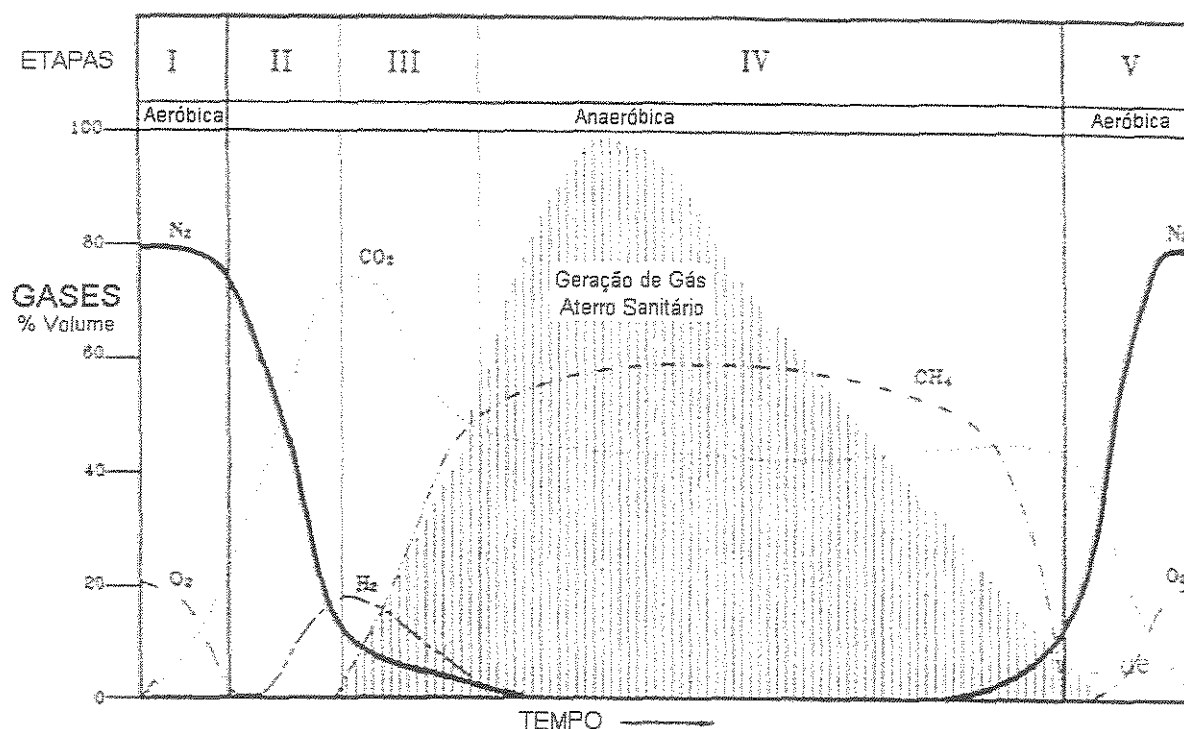


Figura 2.4. Composição dos gases durante as cinco etapas de geração (DoE, 1995).

Como a composição dos gases varia ao longo do tempo, o projeto da unidade de pré-tratamento de gás tem que ser capaz de lidar com esta situação, não afetando a viabilidade econômica do projeto e sendo aplicável para qualquer tipo de aterro sanitário (SANDELLI e SPEIGEL, 1992).

Contudo, o poder calorífico do gás emitido por aterros sanitários é aproximadamente a metade do poder calorífico do gás natural, sendo considerado baixo para substituir diretamente o gás natural. Em vista disso, o gás de aterro requer processos de purificação, sendo geralmente utilizado conjuntamente com o gás natural, para obtenção de melhores rendimentos.

2.3.3. Drenagem e captação dos gases gerados

Dentre os mais diversos tipos de projetos para drenagem e captação dos gases, dois tipos de sistemas têm sido utilizados no controle e possível recuperação do CH_4 gerado nos aterros sanitários. Tais sistemas podem ser definidos como passivos e ativos.

Sistemas passivos contam com processos naturais para o escapamento dos gases do aterro para atmosfera e evitam que os fluxos se dirijam para áreas indesejáveis.

Sistemas ativos, por sua vez, utilizam processos de bombeamento para retirar o gás do aterro sanitário (ROBINSON et al., 1986). Os sistemas passivos são mencionados por BALDERRAMA (1993) e têm os seguintes componentes:

- solos impermeáveis ou paredes de argila;
- trincheira de ventilação e,
- saída dos gases.

O uso dos solos impermeáveis tem por finalidade retardar o movimento do gás na direção horizontal, dentro do aterro sanitário, podendo ser utilizado juntamente com algum sistema de bombeamento, para lançar o gás à atmosfera. Uma aproximação desse sistema é cavar uma trincheira ao longo das margens do aterro, preenchendo-a com material granulado, por onde o gás se deslocará, para depois então escapar verticalmente para a atmosfera. Os sistemas passivos são adequados quando o escapamento do gás para os seus arredores não apresenta um alto grau de periculosidade (HAGERY et al., 1973).

Os sistemas ativos de captação de gás incorporam meios mecânicos, geralmente bombas e/ou compressores, para a retirada dos gases do aterro. Esses sistemas devem ser utilizados quando se faz necessário um maior grau de confiabilidade do que o oferecido por um sistema passivo (BALDERRAMA, 1993).

Nestes sistemas, são escavados poços com 1 m de diâmetro, onde tubos perfurados de PVC possuindo 10 a 15 cm de diâmetro são introduzidos no meio do poço, sendo o espaço restante preenchido com agregado graúdo (ROBINSON et al., 1986). Segundo KARSIOTIS (1981), o PVC é muito difundido neste tipo de aplicação pela resistência que apresenta à corrosão, enquanto o agregado graúdo é usado para prevenir a obstrução dos furos dos tubos de PVC.

Os poços são interligados e conectados a um sistema de circulação dos gases por bombas de vácuo ou sopradores, sendo o gás coletado por este sistema ou, descarregado diretamente para atmosfera. Porém, esta prática deve ser evitada, sendo indicado a

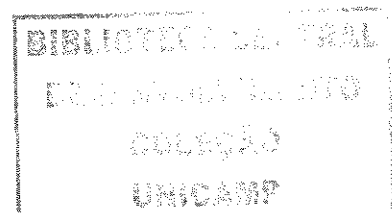
utilização de um sistema de queima. O sistema de tubulações é equipado com várias válvulas e pontos de monitoramento a fim de garantir o controle da quantidade de gás que está sendo recuperada em cada área específica do aterro (HAGERY et al., 1973).

É comum que a extração de gás seja feita utilizando tubos perfurados verticais devido que este é o modo mais simples de levar a cabo o sistema, quando o aterro sanitário já foi definido. Porém, em vários locais são embutidos tubos de sucção horizontais quando os resíduos estão sendo depositados no aterro sanitário. Desse modo, o gás pode ser facilmente extraído no início da sua produção e pode ser sugado para fora antes do recobrimento final do aterro sanitário.

Em alguns casos, um filme impermeável é utilizado como cobertura do aterro sanitário, sendo que embaixo do mesmo quase todo o gás pode ser coletado e recuperado. Embora esta seja uma solução cara, é usada em países onde há leis rígidas que regulamentam as emissões dos aterros sanitários. Além do custo, esta solução apresenta outra desvantagem, já que o filme obstrui a penetração de água no aterro minimizando a produção de gás. Neste caso, faz-se necessário a injeção de água por baixo da membrana para a manutenção de produção.

A etapa seguinte consiste na sucção do gás para fora do aterro sanitário por meio de uma bomba de gás ou um compressor, que o conduz à planta de pré-tratamento por meio de diferenças de pressão.

A conexão dos poços, da bomba e do sistema de recuperação de gás pode ser feita de diferentes modos, sendo o mais antigo e, talvez o modo mais comum fazer-se a conexão dos diversos poços a um tubo coletor principal que percorre toda a extensão do aterro sanitário. O principal problema neste sistema é a dificuldade envolvida na regularidade da qualidade e quantidade do gás. Outro problema é mapear os locais de vazamentos quando todos os poços estiverem conectados em uma grande rede de captação de gases. Para minimizar os custos operacionais e disponibilizar condições adequadas para os trabalhadores, a melhor solução consiste na utilização de tubos únicos, ligando cada poço a uma bomba.



De acordo com KARSIOTIS (1981), um sistema de extração ideal para o aproveitamento do gás do aterro sanitário deve ser projetado para atingir a produção máxima possível, de modo contínuo e, que apresente uma composição elevada e constante de CH_4 . O nível ótimo de produção deve ser calculado levando em conta que uma rápida extração pode gerar uma forte pressão negativa que ocasiona a entrada de ar dentro do aterro sanitário, diminuindo a proporção de CH_4 e conseqüentemente sua utilidade. Estudos preliminares realizados nos EUA mostraram que o valor ótimo médio da taxa de extração é $5,6 \text{ m}^3/\text{h}$ por cada metro de profundidade do poço ($1 \text{ ft}^3/\text{min} \cdot \text{ft}$). Na figura 2.5. apresenta-se o referido sistema.

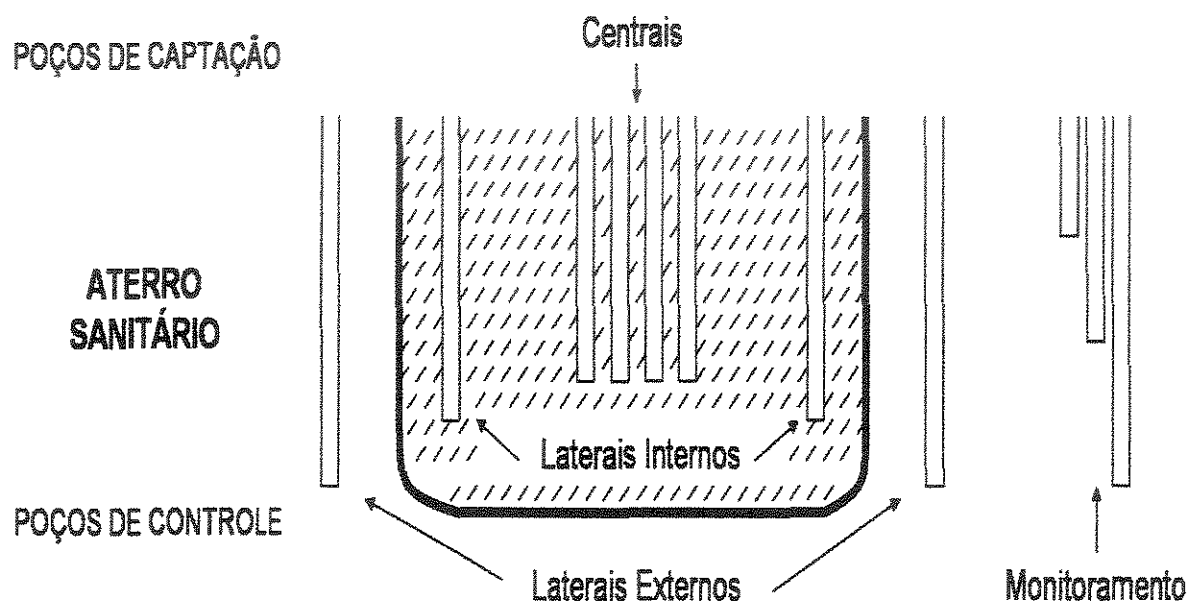


Figura 2.5. Sistema de drenagem e captação do gás emitido (U.S. EPA, 1992).

2.3.4. Alternativas para o aproveitamento dos gases de aterro sanitário

No trabalho de MOTTA (1986) é apresentada uma lista dos equivalentes caloríficos do biogás, comparado com os de outros combustíveis, mostrando seu potencial energético. A lista é apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2. Equivalentes caloríficos do biogás (60% CH₄).

Combustível	Biogás (m³)
1 kg de GLP (Gás liquefeito de petróleo)	2,33
1 litro de gasolina	1,59
1 litro de óleo Diesel	2,10
1 litro de óleo combustível	1,90
1 litro de álcool hidratado	0,91
1 kg de lenha (10% de umidade)	0,46
1 kWh de eletricidade	1,20

Fonte: MOTTA (1986).

Durante os últimos 25 anos foram instaladas várias plantas para extração e utilização de gás de aterro sanitário e, segundo WILLUMSEN (1999), existiam no mundo em 1999 aproximadamente 955 plantas, nas quais o gás era usado na geração de energia. Além do aproveitamento energético, a extração de gás reduz a emissão de metano na atmosfera minimizando o efeito estufa. Na tabela 2.3 é apresentada uma relação dessas plantas.

Tabela 2.3. Plantas de aproveitamento do gás de aterro sanitário no mundo.

País	No.	País	No.	País	No.
E.U.A.	325	Austrália	25	Finlândia	10
Alemanha	150	Dinamarca	21	Polônia	10
Inglaterra	135	Noruega	20	Brasil	6
Suécia	70	Austria	15	Rep. Tcheca	5
Holanda	60	Suíça	10	Hungria	5
Itália	40	França	10	China	3
Canadá	25	Espanha	10	Total	955

Fonte: WILLUMSEN (1999).

Uma planta de geração de energia abastecida com gás de aterro sanitário é composta por um sistema de extração e um sistema de aproveitamento. O sistema de recuperação completo pode-se compor de diferentes tipos de unidades de extração e de aproveitamento.

O método mais comum para aproveitamento energético é através de motores a gás acoplados a geradores elétricos. O gás também pode ser utilizado em caldeiras para produção de água quente ou, para processos que requeiram vapor ou água quente. Na figura 2.6 apresenta-se uma extensa gama de aplicações do gás de aterro e na figura 2.7 apresenta-se uma planta de produção de energia elétrica a partir de gás de aterro sanitário.

O grau de purificação do gás de aterro sanitário dependerá das exigências da aplicação específica na qual será utilizado. Assim, para queima direta, por exemplo, na geração de calor em um forno, não será necessário se fazer pré-tratamento do gás. Para utilização em caldeiras ou motores de gás, geralmente, não se faz necessária uma purificação exaustiva. Entretanto, é imprescindível a remoção de impurezas, sob a forma de partículas e a remoção de H_2S para evitar a corrosão dos equipamentos. Em alguns casos, o CH_4 é quase totalmente purificado e depois usado na rede de gás natural.

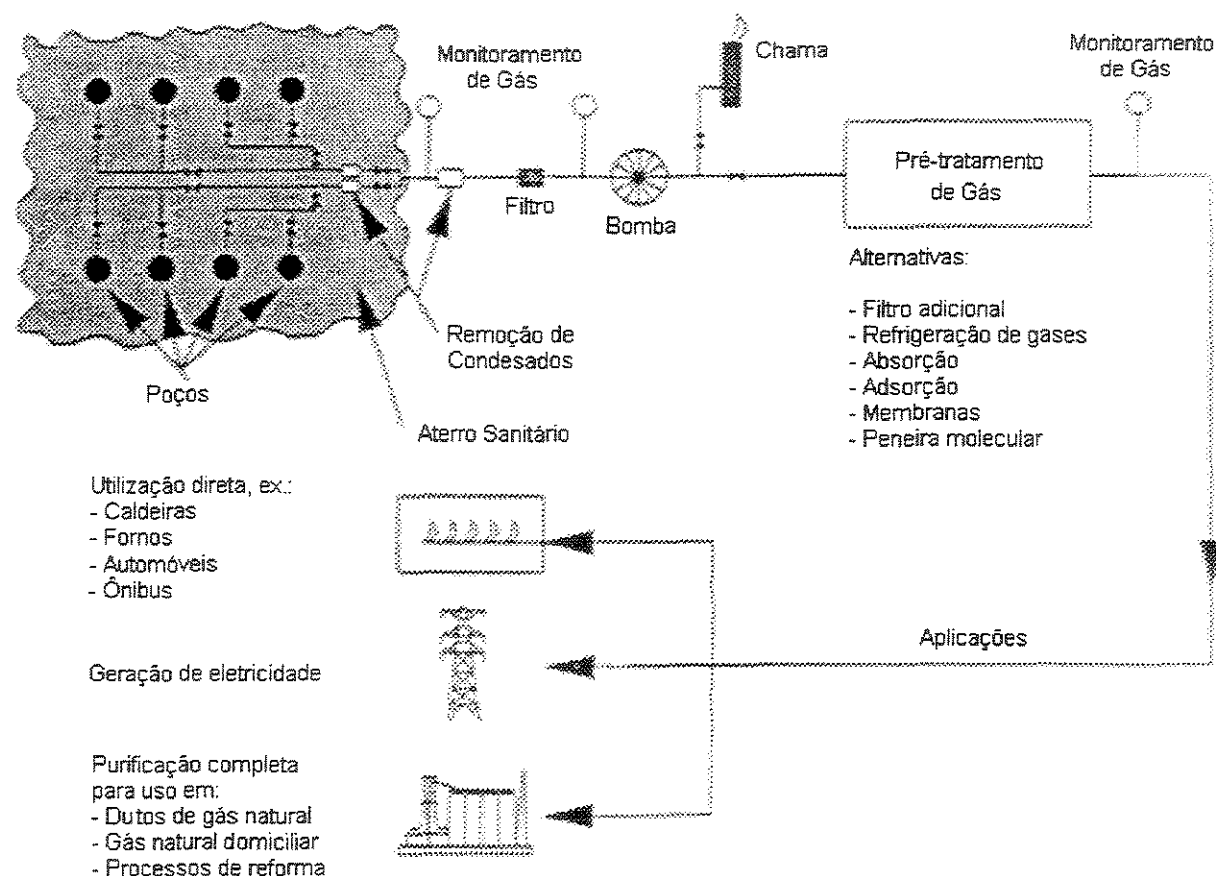


Figura 2.6. Alternativas de utilização de gás de aterro (HUTCHINGS, 1996).

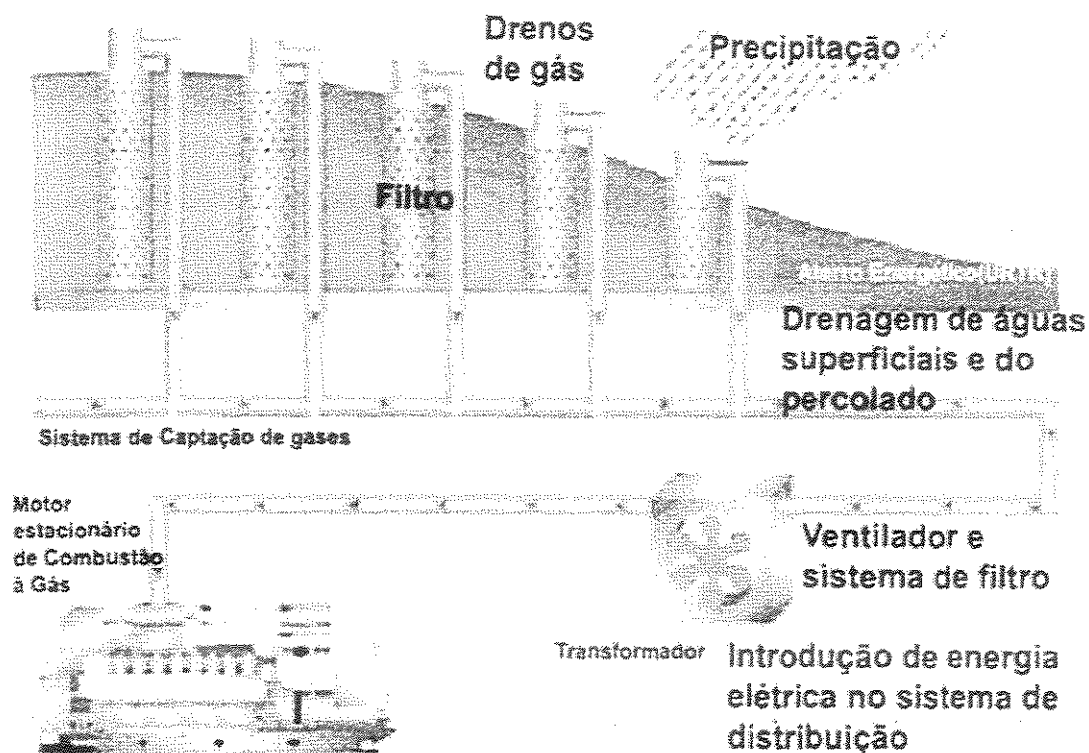


Figura 2.7. Planta de geração de energia elétrica a partir de gás de aterro (CUNHA, 2002).

As técnicas mais comuns para aproveitamento de gás de aterro são:

- **Produção de energia**

O uso mais conhecido do gás é o seu aproveitamento em plantas de produção de energia, que utilizam um motor de combustão interna acoplado a um gerador. A produção de energia desses sistemas fica em torno de 350 e 1.200 kW por máquina. Em vários países europeus é também comum utilizar-se o calor residual da água de esfriamento. Porém, isto não é comum nos E.U.A., embora mais de 50% da energia disponível seja perdida. Em plantas maiores com produção em torno de 4 MW, às vezes são usadas turbinas a gás, e em plantas de grande capacidade podem ser usadas turbinas a vapor. Assim, a maior planta no mundo, localizada nos E.U.A., tem capacidade de 45 MW. As plantas *Combined Heat and Power Plant* (CHP), comparadas sob o ponto de vista de produção de energia são os sistemas mais eficientes para aproveitar a energia de aterros sanitários.

Pode-se considerar a existência de dois tipos de máquinas a gás, máquinas de combustão interna e máquinas de duplo-combustível, ambas de pistão. As máquinas

de combustão interna podem ser usadas em plantas CHP com capacidades geradoras de 20 kW até 8 MW. É comum o uso de tais máquinas, já que o projeto é relativamente simples e o custo é inferior. Neste tipo de equipamento, as velas são usadas para acender o gás, enquanto que, em máquinas de duplo-combustível é injetado de 5 a 8% combustível de Diesel.

- **Sistemas com caldeiras**

O segundo maior uso do gás de aterro sanitário ocorre em fornos a gás, nos quais o gás é usado para o aquecimento da água de caldeiras. Este é um sistema simples, porém menos rentável por apresentar dificuldade na distribuição. Em outros termos, o preço de kW de energia produzido é maior em relação ao preço de kW térmico e, além disso, a energia é vendida com relativa facilidade pela rede de transmissão. A energia térmica disponibilizada para alguns sistemas com caldeiras é usada em estufas, em circulação normal de água quente ou ainda no aquecimento do ar que é soprado nas estufas. Este também é um modo relativamente simples e eficiente para a utilização do gás. Estudos sobre o aproveitamento de gás apresentam que do total de gás alimentado para o sistema é produzido 35% de energia elétrica, 53% calor e 12% de perdas.

- **Utilização direta do gás**

Alguns aterros sanitários no Reino Unido são construídos em velhas minas de argila, originalmente utilizadas na fabricação de tijolos. Muitas destas fábricas usam gás natural no forno e podem substituí-lo diretamente por gás de aterro sanitário. Em alguns casos, o gás de aterro sanitário é usado misturado com gás natural. Outra possibilidade é usar o gás em fornos para produção de cimento.

- **Tratamento do gás para se chegar ao gás natural**

Algumas plantas tratam o gás de aterro sanitário até atingir a qualidade de gás natural. Nestes casos, pode ser distribuído pela rede de gás natural, porém são necessários grandes investimentos em plantas de purificação. Antes de se fazer fluir o gás de aterro sanitário tratado na rede de gás natural, o mesmo deve estar livre de qualquer tipo de particulado sólido, umidade e odores. O principal passo no

processo de tratamento é a separação de metano e gás carbônico. Para este processo três técnicas são utilizadas:

- absorção química;
- adsorção por variação de pressão (PSA);
- separação por membrana.

- **Utilização de gás em veículos**

Em vários lugares no mundo, por exemplo, nos E.U.A. e na França, há plantas nas quais o gás de aterro sanitário é comprimido e usado em ônibus e carros comuns. A rentabilidade depende do sistema que é escolhido; assim, será relativamente caro investir em um sistema para alguns poucos veículos. Também é importante considerar os incentivos que podem existir em cada país para fomentar a utilização dessa tecnologia.

- **Pilha a combustível**

O gás de aterro sanitário também pode ser usado em pilhas a combustível. Este sistema está sendo testado nos E.U.A. há alguns anos, com plantas de produção desde 25 kW até 200 kW, utilizando pilhas a combustível de ácido fosfórico. O investimento inicial é alto o que torna difícil encontrar-se uma solução lucrativa. Porém, atualmente existe um interesse crescente na utilização de outras alternativas, tais como, pilhas a combustível de carbonato fundido e de óxido sólido que apresentam vantagens no sistema de reforma do CH_4 , por não precisarem de uma purificação exaustiva do gás e, apresentam a possibilidade de aproveitamento do calor gerado, melhorando assim as possibilidades de viabilização econômica para estas aplicações.

- **Evaporação do chorume**

O tratamento do chorume é uma das várias preocupações ambientais na operação de um aterro sanitário. O projeto, construção e custo de operação podem ser fortemente influenciados pela necessidade de tratamento do chorume. O chorume pode ser tratado em uma planta convencional de tratamento de águas residuais, ou em alguns casos, é captado e tratado no aterro sanitário. Outra possibilidade é usar o gás de aterro sanitário como combustível para evaporação do chorume.

2.3.5. Aspectos econômicos

Custo do sistema de aproveitamento de gás de aterro sanitário

O sistema de extração consiste em um sistema coletor, um sistema de sucção por bombas e um sistema de monitoramento e controle. Para poços de profundidade média de 10 metros, a variação dos investimentos para o sistema de coleta é de 2,0 a 4,0 US\$/m², e do sistema de sucção é de 1,0 a 4,5 US\$/m². Na tabela 2.4 apresenta-se um resumo do valor dos investimentos por quilowatt de energia para um sistema completo de recuperação de gás de aterro.

Tabela 2.4. Investimento médio para recuperação de gás de aterro sanitário (EUA)

Componente	Valor US\$/kW
Sistema de coleta	200 – 400
Sistema de sucção	200 – 300
Sistema para aproveitamento	850 – 1.200
Planejamento e projeto	250 – 350
Total	1.550 – 2.250

Fonte: Guia interno do Banco Mundial (WILLUMSEN, 1988).

Retorno do investimento do sistema de aproveitamento de gás de aterro

Segundo WILLUMSEN (1988), a renda de recuperação de gás de aterro sanitário é significativamente dependente do tipo de energia produzida. O preço para venda de energia elétrica sofre flutuações de um país para outro, mas regularmente está na faixa de 0,01 US\$/kWh (fora horário de pico) para 0,08 US\$/kWh (horário de pico) com uma média de 0,04 US\$/kWh.

De acordo com o mesmo autor, para tornar possível a recuperação de gás de aterro sanitário, sem subsídios, a eletricidade produzida nos E.U.A. e no Reino Unido deve ser vendida a um preço de 0,03 US\$/kWh ou superior. Para aterros sanitários pequenos (menos de 500.000 ton), por exemplo, na Dinamarca, a eletricidade produzida deve ser vendida a partir de 0,055 US\$/kWh.

Os regulamentos para subsidiar os custos das fontes de energia renováveis e promover, por exemplo, a redução de CO₂, poderiam ajudar a viabilização da exploração de aterros sanitários em regiões onde a energia elétrica é mais barata. Cita o trabalho de WILLUMSEN (1988) os subsídios equivalentes a 0,004 US\$/kWh nos E.U.A. e a 0,04 US\$/kWh na Dinamarca. Estes valores dependem diretamente da importância da diminuição do impacto ambiental e, do interesse de cada país para o apoio e procura de fontes energéticas primárias alternativas.

De acordo com o documento de SENAGA e EGYDIO (2004), por meio do sistema de “Créditos de Carbono” os países desenvolvidos pagam pela redução da emissão dos gases de efeito estufa. O referido sistema serve como forma de compensação financeira para elaboração de projetos em aterros de resíduos sólidos no Brasil. Estima-se que o valor da tonelada de carbono na União Européia chegará ao equivalente a US\$ 20, sendo que hoje esse valor oscila em até US\$ 4.

De acordo SENAGA e EGYDIO (2004), a Onix Sasa, que gerencia o Aterro de Tremembé, no vale de Paraíba, é a primeira empresa no Brasil a assinar um contrato de venda de crédito de carbono a partir de dezembro de 2003. O comprador é o Governo da Holanda e o contrato vai durar dez anos, envolvendo o equivalente a 500 mil toneladas de gás carbônico no valor total de 1,5 milhões de euros ou, aproximadamente, 5,6 milhões de reais.

Aspectos da viabilidade de instalação de uma Pilha a Combustível

SANDELLI e SPEIGEL (1992) apresentam uma comparação entre o sistema tradicional de queima dos gases e o sistema de aproveitamento que utiliza uma pilha a combustível, assumindo como única fonte de renda a comercialização de eletricidade. Na figura 2.8 apresenta-se a comparação econômica do sistema de queima de gases com o sistema de pilha a combustível para diminuição das emissões de CH₄.

A figura 2.8 apresenta que para um mercado maduro, ou seja, onde já é comercializada energia elétrica a partir de gás de aterro sanitário, a aplicação de

pilhas a combustível é viável quando o custo da eletricidade é maior que 0,055 US\$/kWh. No caso de um mercado novo, este valor seria maior que 0,090 US\$/kWh. Os valores anteriores podem ser diminuídos considerando-se o potencial de renda da energia térmica e os incentivos pela diminuição do impacto ambiental, vantagens adicionais associadas à utilização de gás de aterro sanitário e ao emprego das pilhas a combustível.

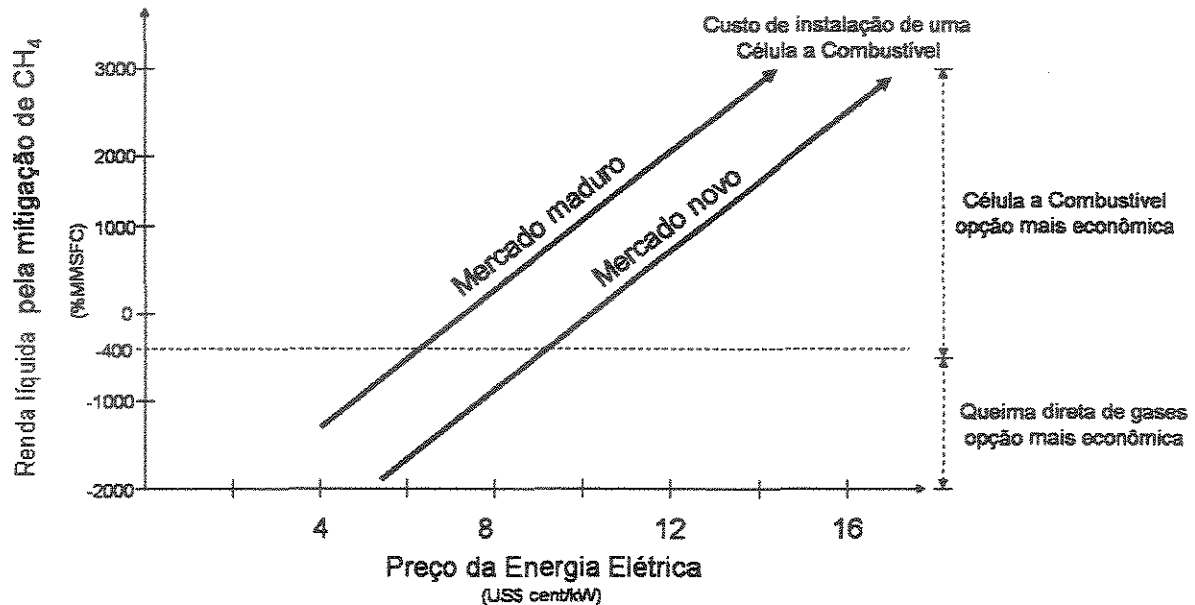


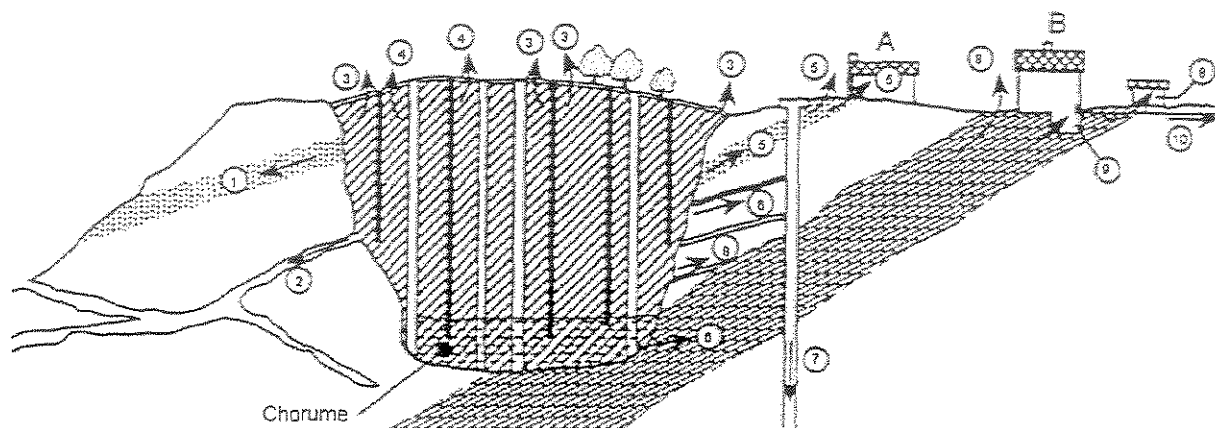
Figura 2.8. Queima de Gases versus Pilha a Combustível (SANDELLI e SPEIGEL, 1992).

2.3.6. Problemas ambientais

A potencial migração de gás do aterro sanitário para o meio ambiente é determinado por vários fatores inter-relacionados, tais como, a pressão desenvolvida dentro do aterro pela produção do gás, a permeabilidade relativa dos resíduos (densidade), o tipo de camada circunvizinha, a porosidade das camadas de cobertura, as mudanças nos níveis da água e as características geológicas do solo (por exemplo rocha permeável, fissuras, etc.) (CAMPBELL, 1987 e DoE, 1991).

Para diminuir a difusão de gás no meio ambiente foi implementada na Inglaterra, a construção de aterros acima de uma camada de plástico, por exemplo, polietileno de alta

densidade, diminuindo drasticamente a permeabilidade e prevenindo as infiltrações de chorume através da base e dos lados do aterro sanitário (DoE, 1986). Na figura 2.9. são apresentados os possíveis caminhos de migração dos gases em aterros sanitários.



- | | | |
|----------------------------|---------------------------------------|--|
| 1. Terra permeável | 5. Preenchimento artificial permeável | 8. Mudanças na composição do solo a material permeável |
| 2. Gretas naturais | 6. Fissuras por alta pressão | 9. Fundações de construções |
| 3. Laterais poços internos | 7. Laterais poços externos | 10. Tubulações de serviços |
| 4. Fraturas da cobertura | | |

Figura 2.9. Migração dos gases em aterros sanitários (DoE, 1991).

Conforme HUTCHINGS (1996), a migração de gás de aterro sanitário para o meio ambiente origina os seguintes problemas:

- efeitos na camada de ozônio;
- efeito estufa;
- perigos de explosão;
- sufocamento;
- toxicidade;
- odor desagradável;
- efeitos nocivos na vegetação;
- propriedades corrosivas tanto no ar como no solo.

De acordo com U.S. EPA (1992) um projeto de aterro sanitário deve ter sistemas de barreira para controle de migração de gases. Na figura 2.10 observam-se os métodos mais utilizados para tal controle.

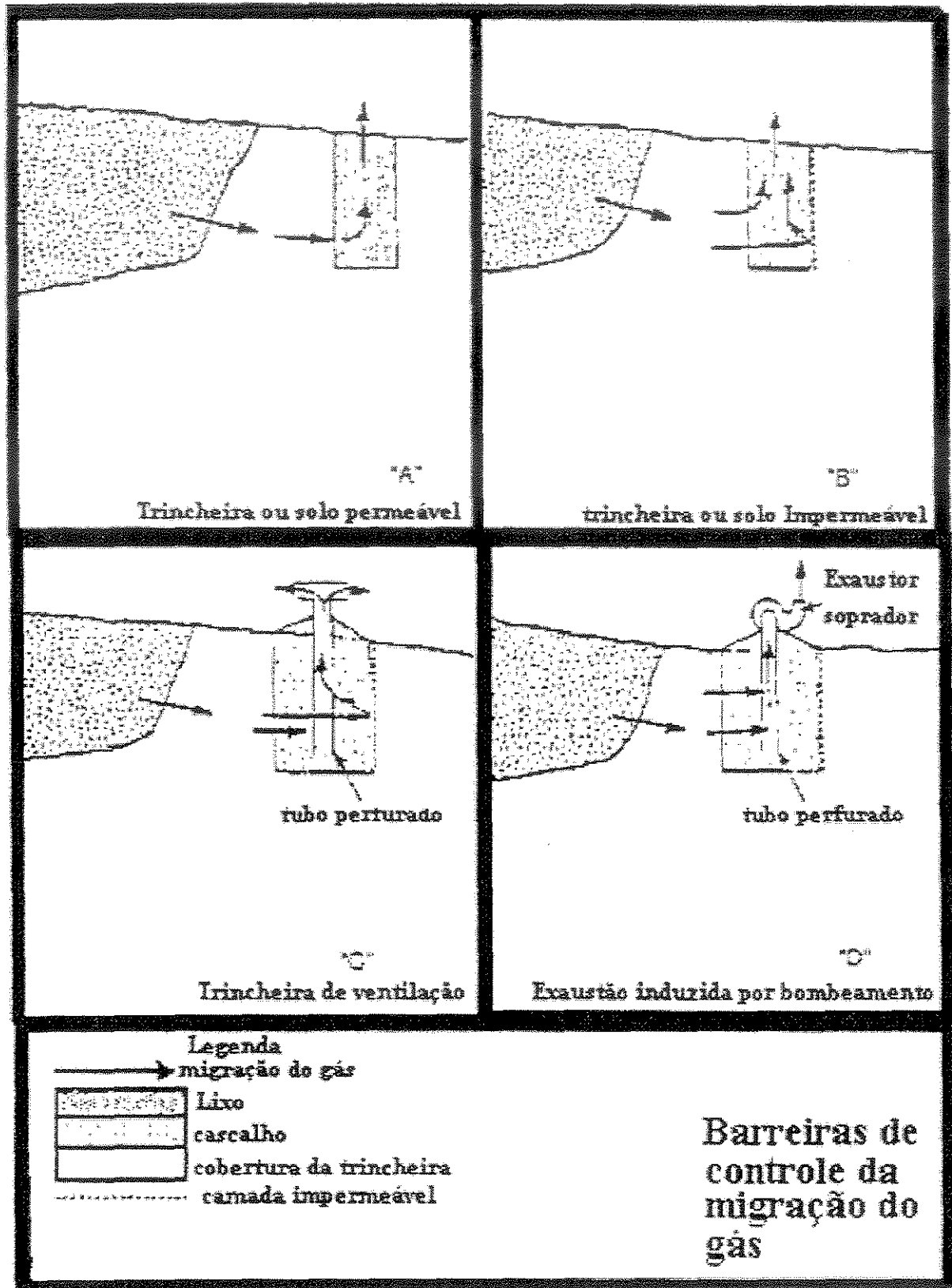


Figura 2.10. Barreiras de controle da migração do gás (U.S. EPA, 1992).

2.4. Sistemas de pré-tratamento de gases de aterro sanitário

O gás de aterro sanitário, como já foi dito, é composto principalmente por CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 , além de outros compostos, que apesar de estarem presentes em baixas concentrações originam grandes problemas quando do seu aproveitamento.

De acordo com STEINFELD e SANDERSON (1998), traços desses compostos podem gerar produtos de combustão tóxicos e poluentes, odores, corrosão de equipamentos, envenenamento dos catalisadores de reformadores e perda de eficiência das pilhas a combustível, conseqüentemente, na maioria dos sistemas de aproveitamento do gás de aterro sanitário, esses compostos serem removidos.

Alguns problemas típicos gerados por alguns traços de gases presentes no gás de aterro sanitário são a corrosão de equipamentos devido à formação de ácido clorídrico e ácido sulfúrico. No caso específico de utilização de uma pilhas a combustível de ácido fosfórico, os compostos de enxofre e os hidrocarbonetos clorados reagem com os catalisadores e acabam por desativa-los.

Conforme SANDELLI e SPIEGEL (1992), em alguns casos onde a legislação ambiental é rígida, como no sudeste da Califórnia nos EUA, a agência de proteção ambiental (EPA) determina a instalação de sistemas de pré-tratamento, mesmo que o gás seja ou não aproveitado, quando a concentração dos compostos que não sejam gases principais do processo, entre eles os compostos orgânicos não metânicos, seja superior a 150 mg/ano.

Segundo STEINFELD e SANDERSON (1998) os principais traços de compostos encontrados no gás de aterro sanitário podem ser classificados nos seguintes grupos:

- **compostos orgânicos**, saturados e insaturados, com massas moleculares maiores que o CH_4 e geralmente insolúveis em água; álcoois orgânicos e hidrocarbonetos ácidos, a maioria solúveis em água, e hidrocarbonetos aromáticos;
- **compostos com cloro**, hidrocarbonetos primários clorados e ácido clorídrico;
- **compostos com enxofre**, tais como ácido sulfídrico, sulfeto de carbonila, dissulfeto de carbono e mercaptanas;

- **compostos inorgânicos**, inertes e outros, não classificados nos outros grupos.

De acordo com STEINFELD e SANDERSON (1998), os compostos mais prejudiciais para o aproveitamento do gás de aterro sanitário utilizando pilhas a combustível e, que devem ser removidos, até atingir concentrações muito baixas são: ácido sulfídrico, ácido clorídrico, dióxido de enxofre e amônia, compostos orgânicos de enxofre e hidrocarbonetos clorados. O monóxido de carbono é um composto bastante prejudicial para os catalisadores das pilhas a combustível de ácido fosfórico, porém geralmente não está presente no gás de aterro sanitário. A quantidade de CO presente no gás que será alimentado para a pilha a combustível, é resultante do processo de reforma do CH₄.

De acordo com STEINFELD e SANDERSON (1998) existem vários sistemas de purificação de gases usados em processos químicos industriais que podem ser utilizados para pré-tratamento de gás de aterro sanitário. A tabela 2.5. apresenta um resumo dos sistemas comumente usados na indústria química.

Tabela 2.5. Sistemas para remoção de compostos orgânicos, de cloro e de enxofre.

Compostos Orgânicos	Cloro	Enxofre
- Adsorção em camadas de carbono, PSA/TSA*.	- Alumina ativada.	- Óxido de
- Absorção em solventes, tais como metanol, selexol (dimetil éter de polietileno glicol), CO ₂ liq.	- Formulações de alumina, carbonato de potássio e	ferro, tais como <i>Sulfatreat</i> .
- Carbono (não remove sulfeto de carbonila).	óxido de cálcio.	- Remoção com gases ácidos
- Refrigeração para condensação de comp.orgânicos.		

* Adsorção por variação de pressão (PSA) e adsorção por variação de temperatura (TSA).

Fonte: STEINFELD e SANDERSON (1998).

KUMAR e VAN (1989) relatam que a tecnologia de membranas, de absorção e de adsorção, foram os sistemas para pré-tratamento de gás de aterro sanitário utilizados até então. Alguns exemplos dessas tecnologias são as membranas *Prism*[®] e *Separex*[®] utilizadas em processos de alta pressão de 250 a 800 psi, resultando em um alto consumo de energia elétrica e com uma recuperação de CH₄ em uma faixa entre 70 e 95%. As tecnologias de absorção, tais como *Selexol*[®], *Kryosol*[®], *Binax*[®] e processo baseado em remoção com gases ácidos, que também operam com alta pressão, aumentam a faixa de recuperação de CH₄ entre 90 e 95% e a tecnologia de adsorção *Gemini*[™] que opera em uma faixa de pressão baixa (50-150 psi), com uma recuperação superior a 96% e pureza do CH₄ superior a 99%.

2.5. Pilhas a combustível

As pilhas a combustível podem ser comparadas às baterias elétricas que originam meios para converter a energia das ligações químicas de uma substância, diretamente em eletricidade. A diferença entre uma bateria e uma pilha a combustível é que em uma bateria todos os reagentes estão presentes no seu interior e são consumidos lentamente durante utilização da bateria. Em uma pilha a combustível os reagentes, combustível e oxigênio, são providos continuamente à pilha, a partir de fontes externas.

De modo geral, as pilhas a combustível apresentam-se atrativas como fontes de produção de energia pela alta eficiência de transformação dos combustíveis primários em eletricidade e calor. A eficiência de produção de energia elétrica situa-se teoricamente entre 40 e 60%, dependendo do tipo de pilha e das condições de operação.

As pilhas são intrinsecamente mais eficientes que as máquinas de combustão interna porque não dependem do Ciclo de Carnot e, portanto podem atingir os valores elevados de eficiência.

Em algumas aplicações, tais como no setor automobilístico, com o sistema operando entre 12 e 25% da máxima potência, a eficiência elétrica global é alta, próxima de 50%. Porém a eficiência pode diminuir quando se requer uma máxima potência em um curto intervalo de tempo. Como o decréscimo da eficiência está intimamente relacionado com o aumento da potência de saída, os aspectos econômicos e o rendimento de uma pilha a combustível acabam por estar também correlacionados.

Para cada aplicação, há uma eficiência ótima, que resulta na produção de eletricidade com menor custo. Cabe salientar que o custo final da energia elétrica é função não apenas das características de desempenho das pilhas, mas também depende do investimento inicial, da vida útil, do perfil de utilização do sistema e do custo da produção do hidrogênio.

Outra vantagem significativa das pilhas a combustível é a versatilidade, que permite seu emprego para aplicações portáteis e estacionárias e, o uso dos mais diversos combustíveis, nas diversas formas da matéria (gás, líquido ou sólido), tais como, gás natural, metanol, etanol, gás do carvão, etano, propano, nafta, amônia e compostos orgânicos e inorgânicos que contenham elevadas quantidades de hidrogênio na cadeia.

Existem casos em que as pilhas a combustível podem operar com hidrocarbonetos, com a vantagem de serem dispositivos que apresentam baixa emissão de poluentes, quando comparados com os sistemas de combustão. A geração de energia sem emissão de poluentes é atualmente o principal critério que atua como força motriz impulsionadora da tecnologia das pilhas a combustível.

Outras importantes vantagens da tecnologia das pilhas a combustível para obtenção de energia elétrica são:

- cogeração de energia, ou seja geração de energia elétrica e energia térmica, onde o sistema pode atingir valores de eficiência de até 85%;
- utilização da energia térmica gerada (vapor ou água quente) em processos industriais, no aquecimento de ambientes, etc;
- diminuição da emissão de gases poluentes, adequando-se às mais exigentes regulamentações para a proteção do meio ambiente;
- produção de energia elétrica em uma faixa entre 25 W e 50 MW;
- fabricação de sistemas modulares de reforma e pilha a combustível;
- produção de eletricidade de alta confiabilidade, sendo ideal para a operação de equipamentos eletrônicos, sensíveis às variações de tensão;
- facilidade de localização próximo aos pontos de consumo de energia, reduzindo assim as perdas decorrentes da transmissão de energia, cujo valor atual, segundo CUNHA (2002), está entre 8 e 10% da energia produzida, além de reduzir os investimentos com as redes de transmissão;
- baixa exigência de manutenção e o longo período de funcionamento, quando comparado com outras tecnologias de geração de energia;
- baixo nível de ruído, pela ausência de partes móveis.

2.5.1. Conceitos gerais

Uma pilha a combustível é um conjunto de células a combustível conectadas em série. A célula a combustível é um dispositivo que transforma a energia química do hidrogênio gasoso em energia elétrica e térmica, através de um processo de oxidação eletroquímico. O mecanismo fundamental da operação é a reação inversa da eletrólise da água. Uma célula está constituída de um ânodo, um cátodo e um eletrólito, todos apropriadamente dispostos. Na figura 2.11 apresenta-se um esquema geral de uma célula a combustível do tipo membrana polimérica (PEMFC) ou ácido fosfórico (PAFC).

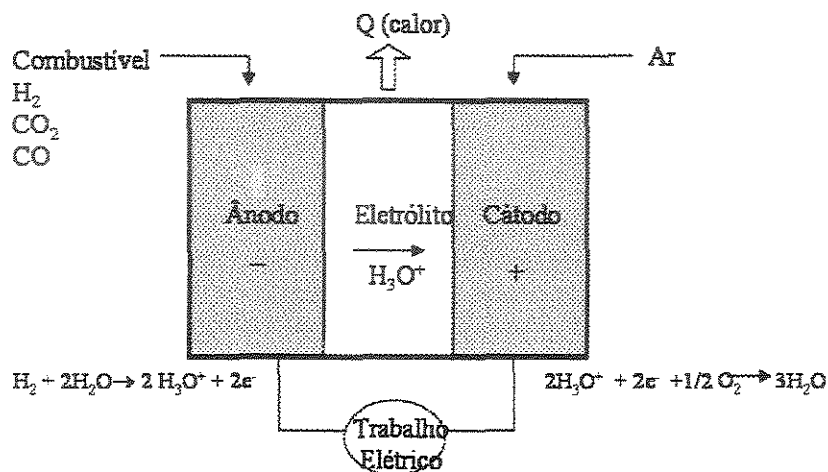


Figura 2.11. Célula a combustível tipo PEMFC.

Os gases de alimentação da célula são introduzidos e distribuídos por canais de fluxo, impressos nas placas coletoras de corrente, geralmente construídas em grafite. O H₂ é alimentado no compartimento anódico e entra em contato com o ânodo contendo platina, ocorrendo a catálise que facilita a separação do H₂ em elétrons e prótons (íons de H₂).

Em uma PEMFC ou em uma PAFC, os íons de hidrogênio passam através do eletrólito e, novamente, com o auxílio da platina, se combinam tanto com o oxigênio como com os elétrons, junto ao cátodo, produzindo água. O oxigênio disponível no cátodo é resultante da alimentação de ar, por exemplo, no compartimento catódico. Os elétrons não passam através do eletrólito deslocando-se do ânodo para o cátodo através de um circuito externo, no qual se situa um motor ou outro dispositivo de carga elétrica.

No processo da eletrocatalise, que ocorre em uma célula a combustível, tipo PEMFC ou PAFC, a platina catalisa a reação de dissociação da molécula de hidrogênio em

dois átomos de hidrogênio, havendo inicialmente um processo de adsorção do gás sobre a platina. Posteriormente, cada átomo de hidrogênio perde um elétron de modo a se tornar um íon H^+ . Fluxos da corrente de íons H^+ são conduzidos por meio do eletrólito e deslocam-se através deste até o cátodo, enquanto os elétrons passam do ânodo para o circuito externo, que tem uma carga instalada, e então se dirigem à superfície do cátodo. A reação de uma molécula de oxigênio no cátodo é um processo de redução com 4 elétrons e ocorre em uma sequência de vários passos. As reações que representam o fenômeno completo são apresentadas a seguir:



Para THOMAS e ZALBOWITZ (1999), catalisadores a base de platina, mesmo sendo caros, parecem ser os únicos capazes de gerar altas taxas de redução de O_2 à baixa temperatura, aproximadamente 80°C . Por exemplo, verifica-se que o desempenho das PEMFC é muito limitado pela baixa taxa da meia-reação de redução de O_2 , sendo cerca de 100 vezes mais lenta que a meia-reação de oxidação de H_2 . Além disso, os processos físicos, químicos e eletroquímicos que ocorrem em cada eletrodo, ânodo e cátodo são complexos. No ânodo, o gás hidrogênio deve se difundir através de caminhos tortuosos, com o auxílio de difusores de gás, até encontrar as partículas de platina, dispostas na superfície do ânodo.

Para facilitar o processo de catálise, as partículas nanodispersas de platina são suportadas em aglomerados de carbono aumentando a superfície de ação catalítica e, conseqüentemente, a eficiência do eletrocatalisador. Além disso, nas PEMFC uma pequena quantidade de solução ionomérica da Nafion® é incorporada aos eletrodos, maximizando a área interfacial entre as várias fases dos eletrodos, partículas de eletrocatalisador, aglomerados de carbono e eletrólito.

Segundo THAMPAN et al. (2001), o procedimento anterior aumenta a taxa de reação eletroquímica visto que mais platina é envolvida na reação e o eletrólito acaba por permear a estrutura do eletrodo, facilitando o transporte dos prótons através da membrana eletrolítica. Na figura 2.12 apresenta-se um esquema representativo do fenômeno completo que ocorre em uma célula a combustível tipo PEMFC.

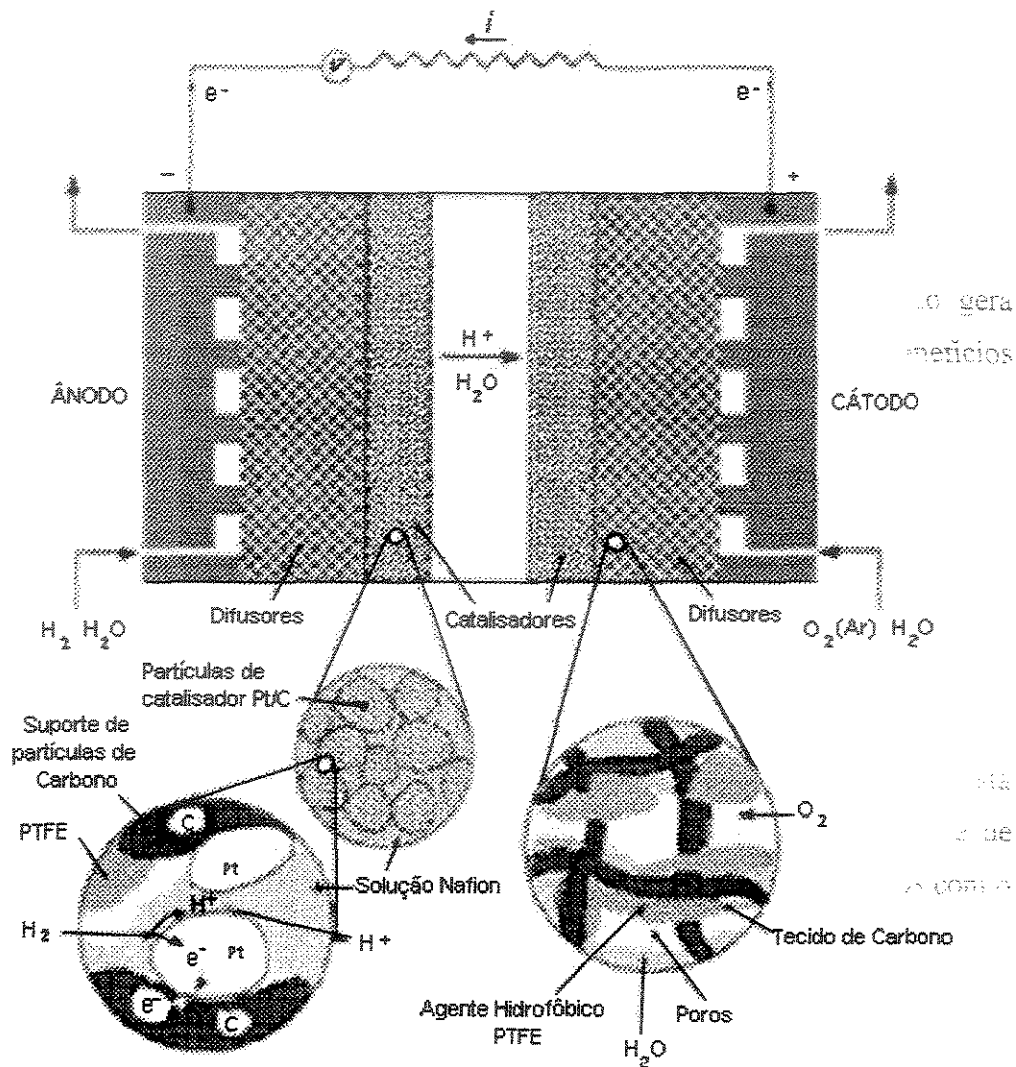


Figura 2.12. Princípio de funcionamento de uma PEMFC (THAMPAN et al., 2001).

2.5.2. Tipos de pilhas a combustível e suas aplicações

As pilhas a combustível podem ser classificadas de diversas maneiras, de acordo com as características das células que as compõem, por exemplo, considerando-se o tipo de eletrólito, a temperatura de operação, o tipo de composto de alimentação ao sistema. A classificação quanto ao tipo de eletrólito utilizado, é a mais usual:

- célula a combustível alcalina – AFC;
- célula a combustível de membrana polimérica – PEMFC;
- célula a combustível de ácido fosfórico – PAFC;
- célula a combustível de carbonato fundido – MCFC;
- célula a combustível de óxido sólido – SOFC.

As células a combustível operam à diferentes temperaturas sendo que a temperatura de operação está atrelada aos eletrólitos que as mesmas utilizam. As principais características dos cinco tipos de células a combustível estão resumidas na tabela 2.6 e os principais aspectos técnicos dos diferentes tipos de células são apresentados na tabela 2.7.

Tabela 2.6. Características operacionais das células a combustível.

Células a combustível	Eletrólito	Temp. de Operação (°C)	Reações
<i>Membrana Polimérica</i> <i>PEMFC</i>	Polímero orgânico sólido de poli (ácido perfluorosulfônico)	60-100	<i>Anodo:</i> $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ <i>Cátodo:</i> $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ <i>Célula:</i> $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
<i>Alcalina</i> <i>AFC</i>	Solução aquosa de hidróxido de potássio	90-100	<i>Anodo:</i> $H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ <i>Cátodo:</i> $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$ <i>Célula:</i> $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
<i>Ácido Fosfórico</i> <i>PAFC</i>	Ácido fosfórico líquido	175-200	<i>Anodo:</i> $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ <i>Cátodo:</i> $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O$ <i>Célula:</i> $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$
<i>Carbonato Fundido</i> <i>MCFC</i>	Solução fundida de lítio, sódio e carbonato de potássio	600-700	<i>Anodo:</i> $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ <i>Cátodo:</i> $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ <i>Célula:</i> $H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$
<i>Óxido Sólido</i> <i>SOFC</i>	Óxido de zircônio com pequena quantidade de ítrio	900-1000	<i>Anodo:</i> $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ <i>Cátodo:</i> $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ <i>Célula:</i> $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Fonte: THOMAS e ZALBOWITZ (1999).

Tabela 2.7. Aspectos técnicos das células a combustível.

Células a combustível	Eficiência Elétrica Real (%) Atual / Proj.		Densidade de Potência (mW/cm²) Atual / Proj.		Potência Projetada (kW)	Aplicação Projetada (h)	Custo Projetado (US\$/kW)	Aplicações
<i>Alcalina</i>	40	50	100 - 200	>300	10-100	>10.000	>200	Espaço 1960 Transporte 1996 Estacionária 1966
<i>Ácido Fosfórico</i>	40	45	200	250	100-500	>40.000	>1.000	Sistemas integrados de energia 1992
<i>Carbonato Fundido</i>	45	50-60	100	200	1.000-100.000	>40.000	>1.000	Co-geração e gera. de energia 1996
<i>Óxido Sólido</i>	45	50-60	240	300	100-100.000	>40.000	>1.500	Co-ger. / geração de energia 2000 Espac. e Terr. 2010
<i>Eletrólito Polimérico</i>	45	50	350	>600	1-1.000	>40.000	>200	Espaço 1960 Transporte 1996 Submarino 1996 Portátil 2004

Fonte: Adaptada de SRINIVASAN et al. (1993).

2.5.3. Pilhas a combustível de ácido fosfórico

Conforme com a revisão apresentada por TREVISAN (2004), os primeiros programas de desenvolvimento de pilhas de ácido fosfórico nos Estados Unidos datam da década de 1960. O programa conhecido como TARGET (Team to Advance Research for Gas Energy Transformation, 1967-1976) teve como incumbência o desenvolvimento de pequenas plantas de PAFC para a geração de energia elétrica e térmica para uso residencial, utilizando como combustível o gás natural. O programa contou com a participação de diversas companhias de eletricidade e de gás, cabendo à empresa fabricante de aviões, Pratt e Whitney, a produção de 65 plantas de 12,5 kW de capacidade. As plantas foram testadas entre 1971 e 1973 em 35 pontos diferentes, operando em indústrias, prédios de apartamentos, restaurantes e outros locais dos Estados Unidos, no Canadá e no Japão.

Durante os anos seguintes foram desenvolvidos muitos outros programas de pesquisa e desenvolvimento das PAFC, principalmente nos Estados Unidos, estimulados pelo programa TARGET, patrocinados pelo DOE (Department of Energy), EPRI (Electric Power Research Institute), e GRI (Gas Research Institute). Todos esses novos programas de pesquisa, desenvolvimento e demonstração (P&D&D) de PAFC tiveram como meta comum a atingir os objetivos relacionados sob ponto de vista comercial das pilhas.

No ano de 1992 as PAFC desenvolvidas pela companhia UTC foram comercializadas, representando o que se chama de “primeira geração de sistemas de pilhas a combustível”. Estima-se que por volta de US\$ 200 milhões tenham sido investidos nas PC25™ em pesquisa e desenvolvimento ao longo de mais de 20 anos de esforços.

WHITAKER (1997) destaca a entrada em uma nova etapa no desenvolvimento das PC25™, o chamado “ciclo virtuoso”, e que consiste em recursos aportados para o aumento do volume de unidades produzidas, e deste modo reduzir os custos de produção da pilha.

O programa de demonstração patrocinado pelo Departamento de Defesa Americano (DOD Fuel Cell Demonstration Program) foi responsável pela compra e instalação de 30 plantas de PAFC em instalações militares americanas nos anos de 1993 e 1994. Este

programa pôde monitorar dados de eficiência elétrica e térmica das pilhas, bem como averiguar técnica e economicamente cada um dos sistemas em questão.

Entre os anos de 1995 e 1997 foi realizado pelo DOD o programa “Climate Change Fuel Cell Program”, que viabilizou através de subsídios federais à entidades não federais, a aquisição e instalação de mais de 100 plantas de PAFC, tendo como prioridade a instalação em locais do departamento de defesa americano. Atualmente, a empresa já produziu mais de 500 unidades de pilhas PAFC operando em 84 cidades dos Estados Unidos e em 12 países da Europa, Ásia, América do Norte e América do Sul, tendo acumulado mais de 3 milhões de horas de serviço.

As PAFC ainda são consideradas uma forma cara de geração de energia, e para tanto, a penetração no mercado tem sido alcançada às custas de investimentos em áreas como subsídios ao mercado, expansão das aplicações da pilha e redução dos custos da própria tecnologia.

2.5.3.1. Empresas fabricantes

Conforme TREVISAN (2004), as principais empresas que comercializam PAFC estão localizadas em EUA e Japão:

- **UTC (EUA)**

A UTC dedica-se a mais de trinta anos ao desenvolvimento de diversos tipos de pilhas a combustível, incluindo AFC, PAFC, MCFC, PEMFC e SOFC. A UTC é a responsável pela produção e comercialização de plantas estacionárias de pilhas de ácido fosfórico PC25TM, que atualmente é comercializada na versão PC25TMC. O pacote comercializado inclui todos os equipamentos necessários para a conversão do combustível em eletricidade de corrente alternada, tendo capacidade de fornecer 200 kW de energia elétrica, além de possibilitar o aproveitamento da energia térmica na forma de água quente. O sistema pode operar com diversos tipos de combustível, como por exemplo, o gás natural, o metano, o propano e o hidrogênio.

- **Mitsubishi Electric Corporation (Japão)**
Desenvolvimento de PAFC (de até 500 kW).
- **Toshiba Corporation (Japão)**
Desenvolvimento de PAFC (200 kW, 1 MW, além do joint venture com a United Technologies Corporation/ONSI)
- **Fuji Electric (Japão)**
Desenvolvimento de PAFC de várias capacidades: 50, 100 e 500 kW.

2.5.3.2. Aplicações

A PAFC, em razão da sua capacidade de produção energética, é vista como possível fonte geradora para instalações de médio porte. Porém, convém salientar que algumas aplicações possibilitam tirar proveito de outras características das PAFC, como a grande confiabilidade e a alta qualidade das energias elétrica e térmica produzidas, a opção pela produção de energia elétrica em corrente contínua e por fim a disponibilidade de combustível no local da instalação (TREVISAN, 2004). A seguir são apresentadas algumas das possíveis aplicações para a parte referente à energia elétrica e à energia térmica produzidas pelas pilhas:

- **Aplicações referentes à energia elétrica produzida**

O projeto de instalação de pilha a combustível deve levar em conta a capacidade de fornecimento de energia elétrica ao sistema existente no local, ou também poder atuar como sistema de “back-up”, fornecendo energia de forma ininterrupta e/ou ainda de forma independente. A qualidade da energia elétrica fornecida pela pilha, caracterizada pela constância da tensão e frequência no fornecimento, aliada à confiabilidade do sistema, permite a indicação da instalação das PAFC em locais como:

- clínicas, centros médicos e hospitais;
- instalações de segurança máxima;
- centros de comunicação e de dados;
- processos de fabricação eletrônicos;
- instalações controle de tráfego aéreo;
- radares;

- navios;
 - laboratórios e centros de pesquisa;
 - locais remotos;
 - locais que tenham à disposição uma fonte de combustível, tais como, processos industriais (petroquímicos), depósitos de lixo orgânico, plantas de tratamento de esgoto, etc.
- **Aplicações referentes à energia térmica produzida**
 - plantas de aquecimento central;
 - piscinas;
 - circuitos de aquecimento ambiente;
 - refradores de absorção;
 - água quente doméstica.

2.5.3.3. Principais componentes

O sistema completo para geração de energia elétrica a partir de CH_4 utilizando PAFC está constituído por quatro subsistemas principais: unidade para processamento de combustível (Reformador), sistema de Células a Combustível, inversor de corrente e unidade para recuperação de calor. Além disso são necessários equipamentos para o controle de operação automática do sistema completo. A continuação apresenta-se o detalhe de cada um dos componentes mencionados:

- **Reformador**

Dois diferentes tipos de rotas para a conversão do gás em produtos úteis podem ser denominadas: diretas e indiretas. As rotas diretas são processos de uma única etapa, onde o gás reage com o oxigênio, ou outra espécie oxidante, para se obter diretamente o produto desejado. Excetuando-se a combustão completa para fins de aquecimento, todos os outros processos ainda encontram-se em estudo, devido ao fato de que as conversões e seletividades obtidas ficam abaixo dos requerimentos para aplicações industriais.

As rotas indiretas são processos de duas etapas onde o gás é inicialmente convertido em gás de síntese, $\text{H}_2 + \text{CO}$, via reforma a vapor, oxidação parcial, reforma com CO_2 ou

por meio da combinação de dois destes métodos, sendo que o gás de síntese é então convertido no produto de interesse. Na figura 2.13, são listados alguns dos vários produtos que podem ser obtidos a partir do gás rico em CH_4 , como é o caso do gás de aterro sanitário pré-tratado, bem como as reações envolvidas nestas conversões (ROSS et al., 1996).

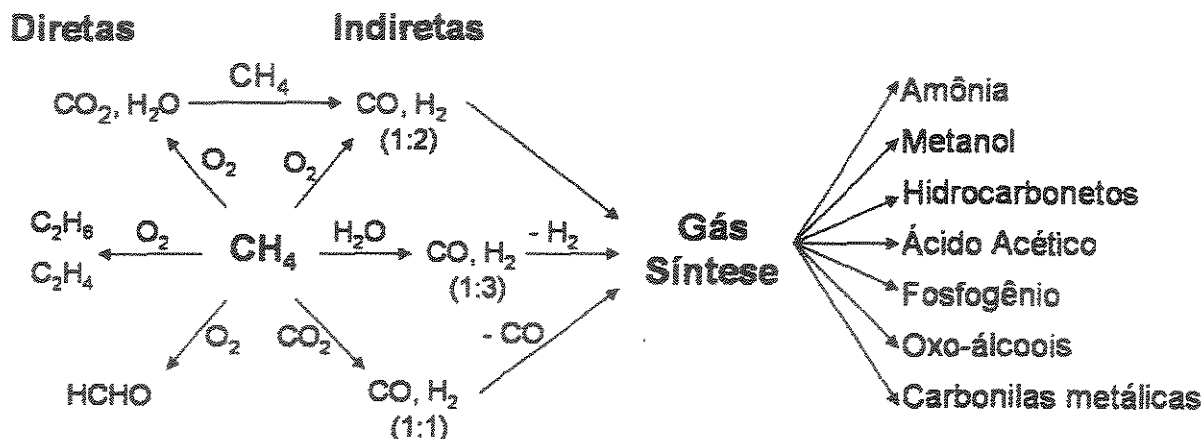


Figura 2.13. Alternativas para produção de compostos a partir de CH_4 (ROSS et al., 1996).

O CH_4 pode ser transformado em H_2 e CO ou CO_2 através de um processo de reforma, em presença de vapor de água, sendo esta uma tecnologia utilizada na indústria química em um grande número de aplicações. Industrialmente, o hidrogênio encontra aplicação em síntese de produtos químicos, na obtenção de atmosferas redutoras, entre outras aplicações, de acordo com SILVA (1991), VON SPAKOUSKY e OLMER (2002).

A reforma catalítica do CH_4 fornece como produto $\text{H}_2 + \text{CO}$, que são interessantes como reagentes para síntese de Fisher-Tropsch, de metanol e de amônia, segundo BRANDFORD e VANNICE (1999) e para processos de carbonilação, hidrogenação, redução dentre vários outros, de acordo com CHODHARY et al. (1998) e ROSTRUP, NIELSEN e ALSTRUP (1999). Conforme com AL-QAHTANI (1997) e MOK et al. (1983), o processo de reforma a vapor não é totalmente eficiente na conversão de hidrocarbonetos e além do monóxido de carbono e o hidrogênio aparecem traços de hidrocarbonetos, dióxido de carbono.

O termo reforma é usado de uma forma ampla, podendo ser aplicado também aos processos de aumento de octanagem de gasolina, segundo SINFELT (1981), PARERA e FÍGOLI (1995). Estudos feitos por ROSTRUP-NIELSEN (1984) apresentam que na indústria de gases, a reforma também é usada para a reação “*water-gas shift*” ou conversão de hidrocarbonetos com alta capacidade calorífica para misturas gasosas de baixa capacidade.

Nos trabalhos de PEÑA et al.(1996), AITANI (1996), POIRIER e SAPUNDZHIEV (1997), CHAN e WANG (2000), YAAKOB et al. (2000) e LI et al. (2000) é apresentado que a reforma a vapor do CH₄ a baixa temperatura, produz H₂ de alta pureza, gás adequado para uso em pilhas a combustível.

O hidrogênio utilizado nas pilhas a combustível pode ser obtido de múltiplas fontes, tais como, água, metano, propano, metanol, etanol, amônia, biogás, entre outras. Neste trabalho são detalhados os aspectos técnicos quando é utilizando gás de aterro sanitário pré-tratado, como fonte de obtenção do hidrogênio. O CH₄, presente no gás de aterro sanitário, é uma fonte de hidrogênio ideal, devido à elevada razão H/C considerado o melhor combustível primário conhecido para pilhas a combustível. O sistema de processamento do combustível em uma planta de PAFC, ou sistema de reforma, é geralmente constituído por três processos químicos fundamentais:

- dessulfuração;
- reforma a vapor ou reforma catalítica e,
- processo de conversão do CO em CO₂.

O processo de dessulfuração é necessário para que eventuais percentagens elevadas de enxofre presentes no gás sejam eliminadas, já que provocam intenso envenenamento do catalisador do reformador. Antes de entrar no dessulfurizador, o gás é pré-aquecido e hidrogênio reciclado é adicionado para promover a formação do gás sulfídrico, que é facilmente removido pela reação com óxido de zinco. As reações do processo são:



seguida de



Os catalisadores empregados na primeira reação são óxidos de cobalto e de molibdênio ou então de níquel e molibdênio, suportados em alumina. A segunda reação ocorre em um leito de absorção de óxido de zinco constituinte da mesma etapa do processo. Os catalisadores são ativos em uma faixa de temperatura entre 250 e 450°C e a pressão de operação do dessulfurizador pode variar entre 0 e 10 kg/cm².

Continuando a descrever as etapas dos processos, o gás de aterro é novamente aquecido e o passo seguinte é a reforma a vapor propriamente dita. A reação de reforma pode ser escrita como:



Como catalisadores para reforma a vapor são empregados diversos metais. Os metais do grupo VIII-B (Fe, Co, Ni, Rb, Ru, Pd, Os, Ir e Pt), com uma grande variedade de suportes têm sido estudados conforme AL-QAHTANI (1997).

São encontradas na literatura referências ao uso de catalisadores tipo Pt/Al₂O₃, Pt/TiO₂, PtMgO, Pt/Ni/CeO (BRANDFORD e VANNICE, 1999), KniCa/ZSI (BRANDFORD e VANNICE, 1998), Ru/Al₂O₃, Ru/TiO₂, Ru/C (CHANG et al., 2000), Ni/AlNiCu, Ni/SiO₂ (FRANÇA et al., 1997), Pt/ReAl₂O₃ (STAGG et al., 1998), Pt/Sn-ZrO₂ (STAGG et al., 2000), Pt/La-ZrO₂, Pt/Ce-ZrO₂ (HEINEMANN, 1981), sendo que os catalisadores mais empregados para esta reação, em especial, são os catalisadores de níquel com diversos suportes e promotores (ROTRUP, 1984).

De acordo com TEMKIN (1979), a reação de reforma de metano [2.10] é realizada na presença de catalisadores de Níquel suportado, a temperaturas elevadas, tipicamente acima de 500°C e a pressão entre 0 e 10 kg/cm². A reação de reforma a vapor é altamente endotérmica e como o número de moles dos produtos superam o dos reagentes, a reação é favorecida pela temperatura elevada e a pressões reduzidas. Estas reações são reversíveis e estão normalmente em equilíbrio, com altas taxas de reação.

Geralmente o vapor é normalmente adicionado em excesso com relação ao requerido estequiometricamente pela reação [2.10], deslocando-se assim o equilíbrio da

reação [2.11] no sentido da formação de CO_2 , reação “water-gas shift”. Isto é feito para evitar a deposição de carbono via reação de Boudart [2.12] que também é catalisada pelo níquel (CLARKE et al., 1997 e OSAKI e MORI, 2001).



O vapor também poderia ser substituído completamente, ou em parte, por CO_2 como na reação [2.13], chamada de “reforma com CO_2 ” ou “reforma a seco” o que resulta em uma razão H_2/CO mais favorável para algumas aplicações (BRADFORD e VANNICE, 1998 e CHANG et al., 2000).



No caso do gás para ser alimentado no sistema de pilhas a combustível de ácido fosfórico, PAFC, é necessário fazer uma conversão, mais completa possível, do CO em CO_2 para evitar o envenenamento dos eletrocatalisadores dos eletrodos das pilhas. Para isto, o gás reformado, ($\text{H}_2 + \text{CO}$) é resfriado para que possa abastecer os conversores de CO do primeiro e do segundo estágio obtendo a reação [2.11].

A reação de conversão também é uma reação de equilíbrio, mas é exotérmica e não é influenciada pela pressão. O calor liberado pela reação eleva a temperatura do gás, o que por sua vez contribui para que o equilíbrio da reação seja deslocado no sentido dos reagentes. A utilização de dois estágios de conversão em série, e separados por uma etapa de resfriamento do gás torna-se necessária, para aumentar a produção de hidrogênio, e reduzir a quantidade de CO no processo.

O catalisador geralmente utilizado no conversor do primeiro estágio é uma mistura dos óxidos de ferro e cromo, estando ativo em uma faixa entre 330 e 350°C. O gás de alimentação é introduzido no conversor em uma temperatura mais baixa possível por volta de 350°C para maximizar a formação de CO_2 . No conversor de segundo estágio, o catalisador é a base de óxidos de cobre e zinco, suportados em alumina. A temperatura de operação do catalisador se situa entre 200 e 250°C e a pressão dos conversores entre 0 e 10 kg/cm^2 .

Após a etapa da conversão, o gás é resfriado em um condensador de vapor para remover o excesso de água e então passa a suprir as pilhas a combustível. Teoricamente, em termos da proporção molar, o gás é composto por 80% de gás hidrogênio e 20% de dióxido de carbono (% em massa). Na prática, metano residual, monóxido de carbono, vapor de água e certas impurezas também estão presentes.

Cerca de 80% do hidrogênio produzido é consumido na geração da eletricidade pela pilha a combustível, sendo o restante recirculado e aproveitado para a combustão no queimador do reformador. Em regime estacionário de produção da pilha, os queimadores são alimentados apenas com o gás hidrogênio recirculado do ânodo, ou seja, a fração não usada na produção de eletricidade, não havendo assim necessidade da adição do gás natural para a queima. O valor de utilização de cerca 80% maximiza o rendimento total do processo, pois possibilita a combustão de hidrogênio no queimador sem perdas para a atmosfera, aliado a um bom rendimento de pilha.

• Células a combustível

A pilha tipo PAFC é formada por várias células a combustível, “empilhadas”, que operam conjuntamente. A estrutura básica de uma célula a combustível consiste de um eletrólito de ácido fosfórico, depositado em uma matriz, posicionada entre dois eletrodos, o cátodo e o ânodo. Na figura 2.14. apresenta-se o esquema da estrutura básica e o mecanismo de funcionamento geral de uma PAFC.

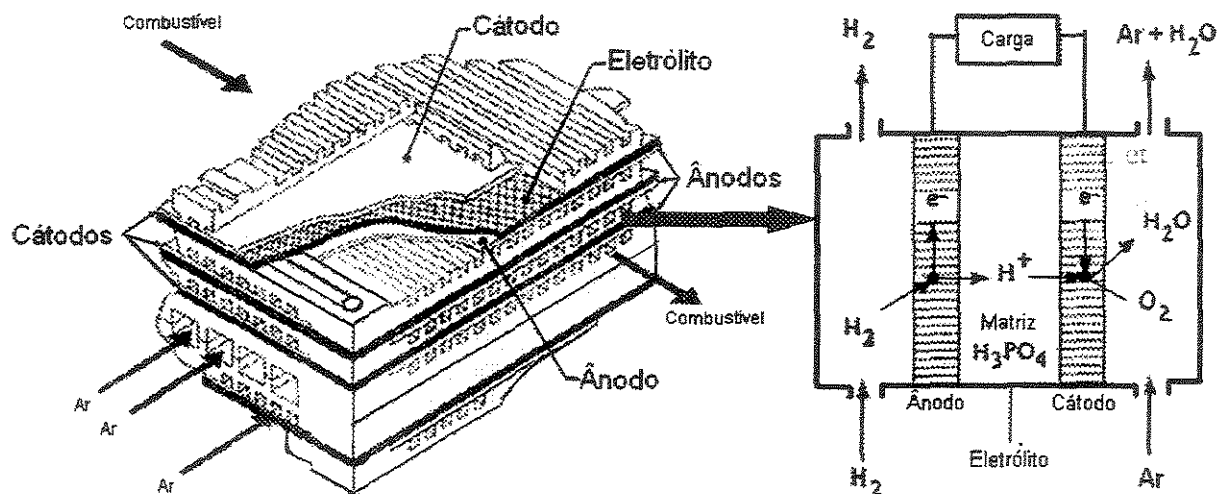


Figura 2.14. Esquema da estrutura básica e de funcionamento de uma PAFC.

As PAFC operam em uma faixa de temperatura entre 180 e 210°C, apresentando maior eficiência quanto mais elevada for a temperatura. O valor de temperatura mais elevada é limitado pelas altas taxas de corrosão dos materiais das pilhas. A faixa de pressão de operação varia de uma até algumas dezenas de atmosferas, sendo que pressões elevadas são utilizadas em pilhas de maior capacidade. Os principais componentes da célula a combustível são descritos a seguir:

- Eletrodos e catalisadores

Os eletrodos são compostos de uma camada de catalisador onde ocorre a reação eletroquímica, e por um substrato, onde a fina camada catalisadora está mecanicamente suportada. Os componentes da camada catalisadora são platina altamente dispersa, carbono, suportando-a e, um agente hidrofóbico, geralmente o Teflon®. O carbono tem também como função transportar os elétrons.

- Camada difusora

A camada difusora é um material que reforça mecanicamente a camada catalisadora e permite a passagem de elétrons e dos gases reagentes. O material geralmente empregado é o carbono na forma de tecido ou papel de fibra de carbono com uma espessura na faixa entre 1,0 e 1,8 mm. O substrato apresenta características tais como, boa estabilidade química, térmica e mecânica às condições de operação em um ambiente ácido, temperatura de operação medianamente elevada, (200°C) e pressão e sendo ainda bom condutor térmico e eletrônico.

- Ácido fosfórico

Utiliza-se geralmente o ácido fosfórico (104%), que apresenta vantagens tais como, aplicabilidade em alta temperatura, com baixa taxa de corrosão, tolerância ao CO₂, baixa pressão de vapor, bom solvente ao O₂, boa condutividade iônica sem apresentar condutividade eletrônica e, ângulo de contato maior que 90°C. Porém, o ácido fosfórico apresenta ponto de solidificação a 42°C. Assim as células devem ser mantidas aquecidas durante o tempo em que a pilha estiver fora de operação. Também, uma parte do ácido fosfórico é perdida da matriz durante a operação, sendo então necessário um sistema de reposição do ácido no sistema.

- ° Matriz

A função da matriz é reter o ácido fosfórico na célula através da ação da capilaridade. A matriz corretamente usada é composta de um fino pó de carbetto de silício (SiC), ligado a uma pequena quantidade de Teflon®. A sua espessura deve ser a menor possível para diminuir a resistência interna, geralmente entre 0,1 e 0,2 mm. A matriz deve ter capilaridade apropriada para reter o ácido, agir como um isolante eletrônico, prevenir a passagem de gases reagentes entre os eletrodos, ter uma condutividade térmica elevada e boa estabilidade mecânica e térmica.

- ° Separadores: placas bipolares

O objetivo dos separadores é prevenir a mistura do gás rico em hidrogênio com o ar na célula, bem como ligar os dois eletrodos eletricamente. São geralmente empregadas chapas finas de carbono vítreo ou fibra de carbono, com espessuras de menos de 1 mm, para reduzirem a resistência térmica e elétrica no sistema. Os separadores devem apresentar excelente impermeabilidade para prevenir a mistura dos gases reagentes, boa estabilidade térmica, química e mecânica em altas temperaturas, elevada pressão e ambiente ácido e uma boa condutividade térmica e elétrica.

- ° Sistemas de distribuição e alimentação dos gases

Existem dois tipos de sistemas, constituindo uma estrutura interna e outra estrutura externa. Na estrutura interna, o suprimento de gás está incorporado no interior da própria célula, sob a forma de canais perpendiculares ao plano da célula. Na externa, os recipientes se encontram usualmente conectados aos lados da pilha.

- ° Sistema de resfriamento da pilha

O resfriamento da pilha pode ser feito com ar, água ou líquido dielétrico (óleo). O calor liberado pelo sistema exotérmico da pilha apresenta alta qualidade e pode ser aproveitado em processos de cogeração, com a eficiência do sistema atingindo até 80%, quando se soma a eficiência elétrica e com a térmica.

Informações encontradas no EG&G SERVICES et al. (2000) apresentam os principais materiais que estão sendo utilizados em uma célula a combustível de ácido fosfórico. Esses materiais são apresentados na tabela 2.8 .

Tabela 2.8. Materiais utilizados em uma PAFC.

Componentes da célula	Materiais
Ânodo	PTFE- Pt/C (Carbono Vulcan XC-72 ^a e 0,1 mg Pt/cm ²)
Cátodo	PTFE, Pt, C (Carbono Vulcan XC-72 ^a e 0,5 mg Pt/cm ²)
Suporte dos eletrodos	Papel carbono
Suporte do eletrólito (Matriz)	PTFE- SiC
Eletrólito	104% H ₃ PO ₄

Fonte: Adaptada do EG&G SERVICES et al. (2000).

• Inversores

Estes sistemas interligam as pilhas a combustível a rede de distribuição de energia e têm como função converter a corrente elétrica contínua produzida em corrente alternada. O tipo de inversor utilizado nas pilhas a combustível depende do tipo de operação da pilha e comumente são dois tipos:

- de linha comutada, que operam somente ligados às linhas de tensão da rede e não podem operar como fonte de energia elétrica independente;
- de auto comutação, que podem operar como fonte de energia independente e também em paralelo com a rede em condições de sincronismo.

As principais características que devem ter os inversores para utilização em plantas de pilhas a combustível são:

- sincronização;
- fornecimento de potência reativa;
- adequação conforme a regulamentação de tensão da rede,
- proteção contra falhas no sistema;
- excelente filtragem de tensão;
- eliminação de harmônicas de alta frequência;
- alta eficiência;
- operação estável.

• Sistema de controle

A principal função do sistema de controle é detectar qualquer variação da carga e alterar a taxa de fluxo dos reagentes que alimentam a pilha e os processos de reforma do combustível, tudo em função da demanda de corrente elétrica requerida, em um

determinado instante. O sistema de controle deve atuar simultaneamente na unidade de reforma, na pilha a combustível e nos inversores de corrente.

O método de controle da energia produzida depende do tipo de operação da pilha e é diferente para cada caso, fonte de energia independente ou sistema conectado à rede de energia elétrica. Para plantas independentes, geralmente de pequena escala e com aproveitamento do calor gerado pela pilha, as características que os sistemas de controle devem apresentar são:

- o inversor deve ser controlado, detectando as variações de tensão na saída do dispositivo, devido às mudanças da carga;
- o fluxo de gás que alimenta a pilha é controlado, detectando as variações do valor da corrente contínua produzida pela pilha na entrada do inversor, e assim que a corrente aumenta, uma válvula posicionada na entrada do reformador é aberta de modo proporcional, permitindo um suprimento maior de combustível.

Existem outros mecanismos de controle para um sistema completo, reformador/pilha/inversores, por exemplo, controle da diferença de pressão entre os gases reagentes (menor que 500 mm de água em regime transiente), controle da tensão máxima de operação (0,8 V), para plantas de grande capacidade conectada à rede é necessário o controle do balanço do fluxo entre os gases que entram e saem do reformador, entre outros.

• Trocadores de calor

As PAFC disponíveis comercialmente incluem uma série de trocadores de calor incorporados na própria pilha. No caso da utilização de pilhas refrigeradas a água, os trocadores podem fornecer o fluido em duas temperaturas diferentes:

- o temperatura elevada, proveniente do sistema de resfriamento da pilha na forma de vapor saturado a 130°C. A energia térmica deste sistema está na faixa entre 15 a 30% da energia total disponível no combustível;
- o temperatura média, proveniente do calor recuperado dos gases de entrada no ânodo, de saída do cátodo e do gás de exaustão do reformador. A temperatura média da água de saída dos trocadores de calor é de 60°C. A energia térmica deste sistema está na faixa entre 25 a 45% da energia total disponível no combustível.

2.6. Sistemas para neutralização de esgoto alcalino

Conforme SCHWARZLMÜLLER (2001), atualmente, o método mais utilizado para neutralizar o pH do esgoto alcalino é a adição de ácidos inorgânicos, por exemplo, o ácido clorídrico e o ácido sulfúrico. Porém, a utilização de ácidos para neutralização gera problemas técnicos e outros problemas ambientais, tornando discutíveis os reais benefícios desse método.

A neutralização com HCl gera cloreto de sódio em concentrações prejudiciais para a fauna e flora dos rios e mares. Além disso, esse ácido cria problemas de corrosão em equipamentos e em estruturas metálicas. Por sua vez, o ácido sulfúrico gera altas concentrações de sulfatos, acima do permitido na maioria dos países, que é de 400 mg/L.

De acordo com SCHWARZLMÜLLER (2001), outro método recente que está apresentando bons resultados na diminuição do pH de esgoto alcalino, proveniente processos industriais, é a neutralização com CO₂. Comparando-se o método do CO₂ com o método que utilizam ácidos inorgânicos obtém-se as seguintes vantagens:

- disponibilidade de obtenção de CO₂ de diferentes fontes que em alguns casos tratam-se de fontes já existentes e sem custo, tais como gás de combustão de caldeiras, gás de aterro sanitário e gás de biodigestores;
- o projeto dos equipamentos são de baixo custo;
- não se atinge pH muito ácido e por isso não é necessária a instalação de equipamentos sofisticados para medição e controle da vazão dos reagentes;
- o bicarbonato formado durante a neutralização não é contaminante do meio ambiente;
- o CO₂ apresenta facilidades no transporte e utilização e, não é perigoso quando comparado com o HCl ou H₂SO₄;
- baixa manutenção do sistema de neutralização e elevado tempo de vida útil dos equipamentos, devido a não haver produtos corrosivos presentes no processo;
- diminuição do impacto ambiental pela não geração de cloreto e sulfato, além da utilização de gases que causam o efeito estufa, quando aproveitados.

A eficiência de um reator de neutralização de esgoto depende dos seguintes fatores:

- superfície de contato entre o gás e o esgoto;
- tempo de contato entre o gás e o esgoto;
- alcalinidade do esgoto;
- componentes do esgoto que originam sua alcalinidade e sua concentração;
- concentração de cálcio que produz CaCO_3 em contato com CO_2 .

Atualmente, alguns exemplos de indústrias que estão utilizando CO_2 para neutralização de esgoto gerado no processo produtivo são:

- engarrafadoras, para o tratamento das águas de lavagem de garrafas;
- papel e produção de polpa, para o tratamento do esgoto do processo produtivo;
- tinturaria e acabamento têxtil, para o tratamento do esgoto do processo produtivo;
- produção de concreto, para a diminuição do pH de água de lavagem de caminhão;
- plantas de energia, para a preparação de água usadas nos circuitos de resfriamento do processo;
- lavagem de carros e roupas, diminuindo o pH da água de lavagem;
- tratamento de esgoto, com ajuste do pH da água antes do tratamento biológico.

CAPÍTULO III – MEMORIAL DE CÁLCULO

Neste capítulo apresentam-se os métodos de cálculo, teóricos e experimentais, necessários para o dimensionamento do sistema e para a avaliação técnica-econômica.

3.1. Resíduos depositados na URTR

A quantidade de resíduos que recebe uma URTR (Q_R), em toneladas por ano, pode ser calculada pela equação [3.1]. Em cidades com aterros sanitários controlados, (Q_R) pode ser obtido diretamente pela pesagem dos caminhões coletores do lixo.

$$Q_R = Pop \times TGR \times Col \times Rec \times 0,001 \text{ ton.kg}^{-1} \times 365 \text{ dias} \quad [3.1]$$

onde,

Pop = população do município ou área atendida pela URTR (hab);

TGR = taxa diária média de geração de resíduos por habitante ($\text{kg.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$);

Col = percentagem de coleta de resíduos do município (%);

Rec = percentagem de resíduos reciclados (%).

A U.S. EPA (1996) propõe uma metodologia de avaliação inicial da possibilidade de recuperação do biogás gerado em URTR's, considerando uma quantidade mínima de resíduos com viabilidade passível de exploração, no aproveitamento energético. A experiência da U.S. EPA indica que URTR's que contenham pelo menos 1 milhão de toneladas de resíduos são aproveitáveis para coleta e utilização de CH_4 , sempre que esses aterros apresentem as condições necessárias para produção de gás, como composição alta de resíduos orgânicos, umidade, temperatura, ambiente anaeróbico e pH adequados. Uma aproximação à quantidade total de resíduos que foram depositados na URTR (Q_{TR}) pode ser calculada a partir da multiplicação da quantidade de resíduos que recebe uma URTR (Q_R) pela idade do aterro (I).

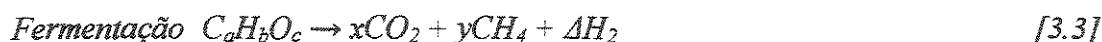
3.2. Produção de biogás

A seguir apresenta-se os métodos de cálculo para produção de biogás. Os métodos teóricos apresentados são determinados a partir das reações de fermentação, combustão e

biodegradação. Os métodos experimentais são dados por duas técnicas utilizadas atualmente para o cálculo do potencial de produção de gás em aterros sanitários.

3.2.1. Análise termodinâmica

De acordo com VOURNAS e KHANH citados no trabalho de KARSITIS (1981), para determinar pela análise termodinâmica, a máxima quantidade de metano que pode ser produzido por quilograma de resíduo, considera-se que todo o material orgânico é biodegradável, sendo razoável essa consideração, quando a quantidade de material plástico e de madeira é baixa, em relação aos outros resíduos orgânicos. Segundo os autores, o material orgânico segue as seguintes reações, que servem como base para fazer os cálculos de geração de metano:



onde,

$$m = x + y, n = 2y$$

Fazendo subtração das duas equações, e remanejando, e substituindo o calor de formação de cada produto obtém-se,

$$y = (\Delta H_1 - \Delta H_2) / 191,7 \text{ mol } CH_4 / \text{mol de substrato} \quad [3.4]$$

Como a parcela (ΔH_2) pode ser considerada desprezível, quando comparado com (ΔH_1), por exemplo, para a glicose $\Delta H_2/\Delta H_1 = 0,06$ e usando um volume para CNTP de 22,4 L/mol e reorganizando, obtém-se:

$$V_{CH_4} = 0,028 \Delta Hr \quad [3.5]$$

onde,

V_{CH_4} = volume de CH_4 para CNTP/kg de resíduo (L/kg);

ΔHr = energia de combustão em kJ/kg de resíduo.

A equação representativa do volume do CH_4 pode ser apresentada a partir de valores individuais de energia de combustão, de cada substância que compõem o resíduo total:

$$V_{\text{CH}_4} = 0,028 (a_1 \Delta H_1 + a_2 \Delta H_2 + \dots + a_i \Delta H_i) \quad [3.6]$$

onde,

a_i = fração em massa da substância i no resíduo;

ΔH_i = energia de combustão da substância i .

Segundo KARSITIS (1981), a energia de combustão dos resíduos sólidos é 6.500 kJ/kg, com umidade média de 55%. De acordo com MUÑOZ e MARTINEZ (2001) é 7.100 kJ/kg, com umidade média de 50%. A variação entre os valores depende diretamente da composição e da umidade dos resíduos sólidos que inclui a média de todos os componentes sejam biodegradáveis ou não. Para alguns resíduos específicos a energia de combustão é aproximadamente 2.800 kJ/kg para os restos de alimento, 13.800 kJ/kg para o papel e papelão, 13.800 kJ/kg para a madeira, 15.000 kJ/kg para os têxteis com maior percentagem de algodão e, 15.000 kJ/kg para papelão, madeira, têxteis e plásticos todos juntos.

3.2.2. Análise química

Segundo VOURNAS e KHANH citados no trabalho de KARSITIS (1981), para se determinar quimicamente a quantidade de metano que pode ser produzido por quilograma de resíduo, pode-se considerar que um mol de carbono presente no resíduo pode gerar um mol de gás, CO_2 ou CH_4 , conseqüentemente usando um volume para CNTP de 22,4 L/mol, obtem-se:

$$V_{\text{Total}} = 1.868 C_1 \quad [3.7]$$

onde,

V_{Total} = volume de biogás total / kg de resíduo;

C_1 = fração em peso de carbono biodegradável presente no resíduo.

O método para determinar o carbono biodegradável (C_1), presente no resíduo total é dado pela seguinte equação:

$$C_1 = C_k C_2 (B_1/B_2) \quad [3.8]$$

onde,

C_k = fração de carbono no material orgânico combustível seco;

C_2 = fração de material orgânico combustível seco presente no resíduo;

B_1 = fração de substâncias biodegradáveis presentes no resíduo;

B_2 = fração de substâncias combustíveis presentes no resíduo.

De acordo com BELL (1963), a fração (C_k) pode ser calculada usando a seguinte equação experimental:

$$C_k = (1 - \%Cinzas) / 2,08 \quad [3.9]$$

onde,

Cinzas = % de cinzas presentes no material orgânico biodegradável seco.

3.2.3. Cinética de reação

A temperatura afeta o local onde a degradação vai acontecer e a velocidade com a qual a substância é descomposta. A variação da temperatura durante a degradação aeróbica na primeira fase está dada pela equação experimental [3.10], resultante da análise de numerosos estudos (TABASARAN, 1976). O incremento da temperatura durante a degradação é apresentado na figura 3.1.

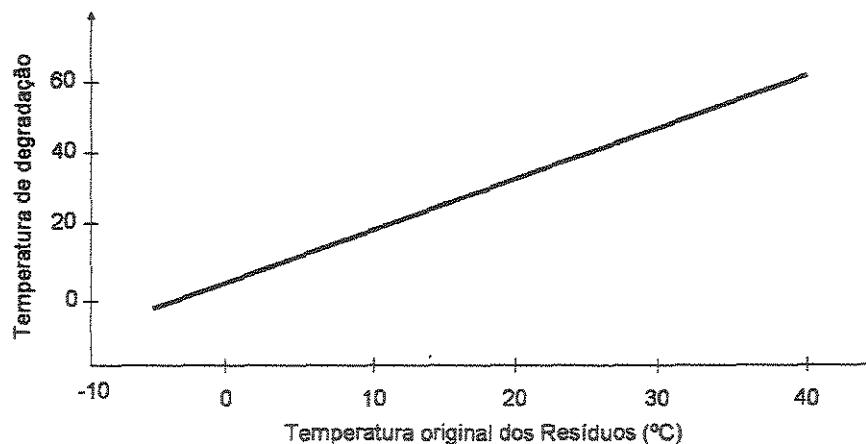


Figura 3.1. Evolução da temperatura durante a degradação anaeróbica.

$$C_e = C_o (0,014 T + 0,28) \quad [3.10]$$

onde,

C_o = carbono total que pode ser biodegradado para produzir gás;

C_e = carbono que pode ser biodegradado com temperatura para produzir gás;

T = temperatura (°C).

A velocidade de produção de gás é dada pela seguinte equação de primeira ordem (TABASARAN, 1976):

$$C_g = C_e (1 - e^{-0,07 t}) \quad [3.11]$$

onde,

C_g = quantidade de carbono transformado em gás;

t = tempo (anos).

Das equações [3.7], [3.10] e [3.11] obtém-se:

$$V_3 = 1.868 C_l (0,014 T + 0,28) (1 - e^{-0,07 t}) \quad [3.12]$$

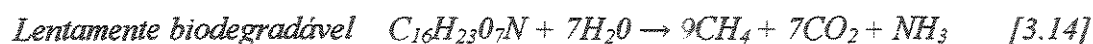
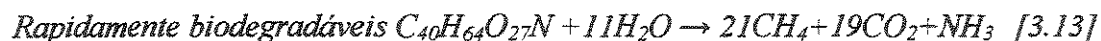
onde,

V_3 = volume de biogás / kg de resíduo.

3.2.4. Metodologias experimentais

- **Metodologia experimental HAMADA**

Conforme HAMADA (1997) as formulações básicas para os resíduos rapidamente e lentamente biodegradáveis e as reações químicas que resultam na geração de CH₄ e CO₂, com consumo de água em um ambiente anaeróbico, são representadas por:



Conhecendo as massas moleculares, a percentagem de cada componente biodegradável (seco) e suas massas moleculares (com base na formulação) e ainda os pesos específicos dos respectivos gases, pode ser determinado o volume de metano e de dióxido de carbono gerados. Nas condições normais de temperatura e pressão, a massa molecular do metano é de 16 g/mol e do dióxido de carbono é de 44 g/mol.

HAMADA (1997), também afirma que os valores assim calculados representam a quantidade máxima de gases que podem ser produzidas sob condições ótimas de degradação. Portanto, a quantidade de gás gerado será menor, pois nem toda a matéria orgânica biodegradável está disponível para ser decomposta ou não apresenta a temperatura e a umidade ideais para sustentarem as atividades biológicas. Com essas condições, os valores típicos de eficiência de degradação estão na faixa entre 50 e 75%. De acordo com as considerações anteriores pode-se ter pela tabela 3.1, a degradação de uma massa unitária de resíduo, com as devidas composições indicadas.

Tabela 3.1. Taxa de geração de gás distribuída ao longo dos anos.

Ano	Rapidamente biodegradável		Lentamente biodegradável		Total	
	Taxa geração ao final do ano	Gases gerados no ano	Taxa geração ao final do ano	Gases gerados no ano	Taxa geração ao final do ano	Gases gerados no ano
	m ³ /kg.ano	m ³ /kg	m ³ /kg.ano	m ³ /kg	m ³ /kg.ano	m ³ /kg
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0980	0,0490	0,0007	0,0004	0,0987	0,0494
3	0,0735	0,0857	0,0015	0,0011	0,0750	0,0868
4	0,0490	0,0612	0,0022	0,0018	0,0512	0,0631
5	0,0245	0,0367	0,0030	0,0026	0,0275	0,0393
6	0,0000	0,0122	0,0037	0,0033	0,0037	0,0156
7			0,0033	0,0035	0,0033	0,0035
8			0,0030	0,0031	0,0030	0,0031
9			0,0026	0,0028	0,0026	0,0028
10			0,0022	0,0024	0,0022	0,0024
11			0,0018	0,0020	0,0018	0,0020
12			0,0015	0,0017	0,0015	0,0017
13			0,0011	0,0013	0,0011	0,0013
14			0,0007	0,0009	0,0007	0,0009
15			0,0004	0,0006	0,0004	0,0006
16			0,0000	0,0002	0,0000	0,0002
Total	---	0,2450	---	0,0277	---	0,2727

Fonte: HAMADA (1997).

- **Metodologia experimental U.S. EPA**

De acordo com a Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental U.S. EPA (1996), o volume de gás gerado com composição aproximada de 50% de CH_4 para cada tonelada de resíduo é de $400 \text{ m}^3/\text{ton}$. Para calcular a produção anual de CH_4 gerado pela totalidade de resíduo depositado na URTR, tem-se:

$$Q_T = V_{\text{ton}} \times Q_R \quad [3.15]$$

onde,

Q_T = Quantidade total de gás (m^3/ano);

V_{ton} = Volume de gás por unidade de resíduo (m^3/ton);

Q_R = Quantidade de resíduos (ton/ano).

3.3. Sistema de poços

Para maximizar a captação de gases do aterro sanitário CARLSON (1977) propõe a distribuição geométrica dos poços apresentada na figura 3.2, minimizando a distância entre eles, sem entrar na área de influencia de cada poço.

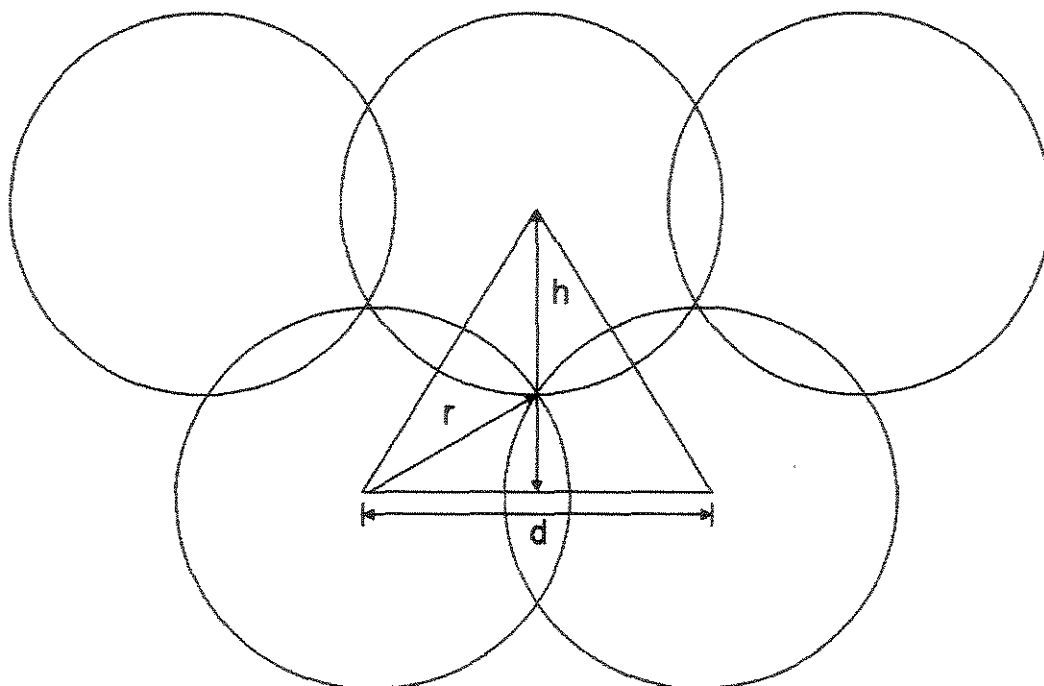


Figura 3.2. Distribuição dos poços de captação de gases (KARSIOTIS, 1981).

De acordo com a distribuição anterior e assumindo Q_P como a produção de gás para cada poço, tem-se que a contribuição da porção do triângulo para cada poço é $Q = 1/6 Q_P$ ($60^\circ/360^\circ$ para um triângulo equilátero) e a produção total do triângulo $Q_t = 3Q$ ou remanejando as equações tem-se que $Q_t = 1/2 Q_P$. Conhecendo que a área de um triângulo $A_t = 3 (3/4)^{1/2} R^2$ e a equação de Q_t pode ser calculada a produção por unidade de área Q_o :

$$Q_o = Q_t/A_t \quad [3.16]$$

Remanejando os valores e multiplicando Q_o por uma área específica A , obtem-se a equação para o cálculo da produção de gás por área, Q_A , em termos do raio e da produção estimada para cada poço:

$$Q_A = 0,3849 Q_P (A/R^2) \quad [3.17]$$

onde,

Q_A = produção total em uma área A (m^3/min);

R = distância de influência (m);

A = área determinada (m^2);

Q_P = velocidade de bombeamento para cada poço (m^3/min).

De acordo com essa distribuição e, fazendo as devidas relações geométricas podem ser calculadas as distâncias entre os poços em função do raio de influência, pelas equações:

$$X = 3^{1/2} R \quad [3.18]$$

$$Y = (7/4) R \quad \text{ou} \quad 1,01 X \quad [3.19]$$

onde,

X = distância entre dois poços consecutivos de uma mesma fileira;

Y = distância entre fileiras.

3.4. Produção de energia elétrica e térmica

Apresenta-se os dados e os procedimentos para cálculo da geração de energia elétrica e térmica, tanto para um sistema utilizando um moto-gerador quanto para um sistema utilizando uma pilha a combustível.

3.4.1. Utilização de um Moto-gerador

Conforme ALVES (2000) em sua avaliação dos moto-geradores a biogás da empresa austríaca WALKESHA, tem-se que o consumo de gás de aterro sanitário de um moto-gerador de 0,5 MW de potência, e 33% de eficiência teórica está em torno de 335 m³/h, para uma composição biogás de 50% em CH₄ aproximadamente. Para se calcular a capacidade de potência a ser instalada na URTR, tem-se:

$$P = (Q_{TOTAL}/C_{gerador}) \times P_{gerador} \quad [3.20]$$

onde,

P = Potência total a ser instalada (MWe)

Q_{TOTAL} = Quantidade total de biogás disponível (m³/h);

$C_{gerador}$ = Consumo específico de biogás do gerador (m³/h);

$P_{gerador}$ = Potência específica do gerador (MWe).

3.4.2. Utilização de uma Pilha a Combustível

De acordo com os trabalhos apresentados por SPIEGEL et al. (1997) e SPIEGEL al. (2003), uma pilha a combustível de ácido fosfórico, em inglês, *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)*, pode apresentar diferenças significativas na produção de energia elétrica, dependendo da composição média do CH₄ e do ar dentro do gás de aterro sanitário.

Esses autores mostraram que uma PAFC de 200 kW, instalada no aterro sanitário de Penrose EUA, e que apresenta uma composição média do biogás de 43,9% CH₄, 40,1% CO₂, 15,6% N₂ e 0,4% O₂, (% em massa), pode produzir 137 kW com uma eficiência

elétrica real de 37%. Porém os testes do sistema UPG-PAFC foram feitos a 120 kW, para evitar os problemas devidos às mudanças na composição do gás com o tempo.

Uma outra PAFC de 200 kW instalada no aterro sanitário de Gronton EUA, apresentando uma composição média do biogás de 57,0% CH₄, 41,3% CO₂, 1,3% N₂, 0,4% O₂, (% em massa) pode produzir 165 kW, com uma eficiência elétrica real de 38%, com os testes do sistema UPG-PAFC feitos a 140 kW.

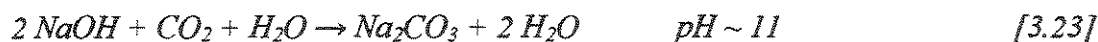
Segundo SANDELLI E SPIEGEL (1992) o consumo teórico de biogás para uma PAFC de 200 kW é de 117,9 m³/h com um poder calorífico de 4450 kcal/m³. De acordo com os resultados obtidos nos testes das PAFC's nos dois aterros dos EUA o consumo médio de biogás da PAFC é de 135,6 m³/h e a potência total a ser instalada na URTR pode ser calculada utilizando a equação [3.20].

3.5. Neutralização de esgoto alcalino

Conforme SCHWARZLMÜLLER (2001) as reações que representam a neutralização por meio de ácidos inorgânicos e por meio de CO₂ são:



De acordo com o referido autor, as reações que representam a neutralização por meio de CO₂ são:



Conhecendo a massa molecular de cada reagente em kg/kmol (NaOH = 40,0 , HCl = 36,5 , H₂SO₄ = 98,0 , Na₂CO₃ = 106,0 e CO₂ = 44,0) é possível calcular a quantidade de agente neutralizante para uma determinada quantidade de NaOH.

3.6. Modelos econômicos

Nesta seção são apresentados os modelos econômicos utilizados para determinar o custo preliminar e fazer a avaliação econômica do projeto. Os custos foram determinados com o auxílio de metodologias de cálculo apresentadas no estudo de STEINFELD e SANDERSON (1998) da *Energy Research Corporation* (ERC) de EUA. O referido estudo foi contratado por vários órgãos governamentais de EUA: *U.S Department of Energy* (DOE), *Office of Fossil Energy* e *Federal Energy Technology Center*. Dentro do trabalho os métodos para cálculo de custos do referido estudo é chamado de “Metodologia ERC/DOE”. A estimativa teórica dos custos e a avaliação econômica do projeto foram realizadas conforme os modelos estabelecidos por COULSON e RICHARDSON (1983).

3.6.1. Estimativa preliminar de custos

De acordo com COULSON e RICHARDSON (1983) antes de poder apreciar as possibilidades de lucro de um projeto são necessários uma estimativa do investimento total, parcelas que formam o custo de capital para se ter a instalação pronta a funcionar e, do custo de produção, parcelas componentes dos custos para a produção propriamente dita.

Conforme os referidos autores as estimativas de custos de capital podem classificar-se a grosso-modo em três tipos, de acordo com a sua exatidão e finalidade:

- **estimativas preliminares**; 30% de exatidão aproximadamente, utilizadas em estudos iniciais de viabilidade e para fazer escolhas grosseiras entre várias alternativas de projetos;
- **estimativas para autorização**, 10 a 15% de exatidão, utilizadas para a autorização de fundos para prosseguir com o projeto até ao ponto em que possa fazer-se uma estimativa exata e pormenorizada;
- **estimativas detalhadas**; 5 a 10% de exatidão, utilizadas para controle do custo do projeto e para contratos com preço fixo.

O custo da elaboração de uma estimativa pode variar entre 0,1% do custo total do projeto, para o caso de uma estimativa preliminar, até cerca de 2% para uma estimativa pormenorizada. Nas fases iniciais de um projeto apenas uma estimativa preliminar será necessária, e justificável, face à porção de informação desenvolvida até então.

3.6.1.1. Metodologia ERC/DOE

- **Custo de capital do sistema de coleta de gases**

Os custos do sistema de coleta de gases devem ser considerados na análise dos custos gerais de operação de um aterro sanitário e não fazem parte dos custos do sistema de aproveitamento energético dos gases. Os sistemas de coleta são requeridos, por regulamentações ambientais, para queimar os gases gerados e diminuir o impacto dessas emissões no ambiente. Porém, na maioria dos aterros sanitários brasileiros não existe essa estrutura, sendo necessário incluir neste capítulo o método de cálculo dos custos do sistema de coleta e transporte dos gases até o sistema de pré-tratamento, apresentando o investimento total requerido.

Para simplificar o cálculo do custo do sistema de coleta de gases foram feitas as seguintes considerações, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela U.S. EPA (STEINFELD e SANDERSON, 1998):

- os custos estão baseados em dólares americanos de novembro de 1996, utilizando os índices de custo para equipamentos da revista de engenharia química, *Chemical Engineering Magazine*;
- os custos diretos incluem, mão-de-obra, taxas, transporte e instalação dos equipamentos;
- os custos indiretos são estimados em cerca de 37% dos custos diretos e incluem engenharia, supervisão, despesas de campo, comissões, custos para arranque da unidade, testes e contingências;
- os custos para os sistemas de queima dos gases, não são incluídos.

As fórmulas simplificadas foram utilizadas em um aterro sanitário hipotético, com uma profundidade média de 30 m e que geraria $10,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ de biogás.

- **Custo dos poços para extração dos gases**

Foi assumida uma profundidade para cada poço de 75% da profundidade do aterro sanitário e a velocidade de coleta é de $0,12 \text{ m}^3/\text{min}$ para cada metro de profundidade. A fórmula simplificada é:

$$C_{\text{Poços}} = Q_{\text{TOTAL}} / 243 \quad [3.25]$$

onde,

$C_{Poços}$ = custo da construção dos poços (US\$);

Q_{TOTAL} = Total biogás produzido por ano no aterro sanitário (m^3/ano).

- Custo da interconexão dos poços e transporte dos gases

Estes custos são proporcionais ao número de poços e dependem da profundidade média do aterro sanitário. Foi assumida uma taxa de produção de gases de $180 m^3/ano$ para cada m^3 de resíduos sólidos, sendo um custo dado pela equação:

$$C_{Tubos} = Q_{TOTAL} / 15H \quad [3.26]$$

onde,

C_{Tubos} = custo da interconexão e transporte dos gases (US\$);

H = profundidade média do aterro sanitário (m).

- Bombas para extração dos gases e sistema de coleta do condensado

Os gases são extraídos através dos poços e das tubulações de interconexão com ajuda de bombas a baixa pressão. O sistema de coleta do condensado é usado para remover os líquidos que são formados quando o gás quente do interior do aterro chega à superfície e o vapor de água se condensa nas paredes das tubulações diminuindo a eficiência de extração. Esses custos além da separação do condensado incluem o ajuste do pH antes da descarga do líquido na planta de tratamento de esgoto e as tubulações para transporte de líquidos e seguem a equação:

$$C_{Bombas} = 3,78 (Q_{TOTAL})^{0,6} \quad [3.27]$$

onde,

C_{Bombas} = Custo das bombas de extração e do sistema de coleta do condensado (US\$).

- Custos operacionais do sistema de coleta de gases

Os custos operacionais anuais do sistema para coleta de gases incluem, mão-de-obra, materiais, eletricidade, disposição dos condensados, direitos de propriedade, taxas de propriedade, seguros e administração. A U.S. EPA leva em consideração que os custos operacionais são 50% do custo de capital do sistema de coleta de gases.

- **Custo de capital da UPG**

Conforme STEINFELD e SANDERSON (1998) os custos de capital da UPG estão baseados no valor do dólar americano do primeiro trimestre de 1997. Os custos são do sistema completo para pré-tratamento de gás para um fluxo de gases de 28.300 m³/dia. O custo dos catalisadores e absorvedores foram cotados com os fornecedores. Os custos dos reatores pressurizados, tubulações e materiais de isolamento são estabelecidos usando os procedimentos de Richardson. Os custos dos trocadores de calor, válvulas de controle e instrumentação são calculados a partir de orçamentos vigentes na data de equipamentos similares. O custo total para o sistema de pré-tratamento dos gases é estimado em US\$ 1.140.604

- Custos operacionais da UPG

O detalhe dos custos operacionais primários da UPG para cada etapa do processo incluem os materiais (catalisadores e absorvedores) e o custo da mão-de-obra associada à troca dos materiais de cada camada de pré-tratamento. Nestes custos esta incluída a energia consumida pelo compressor de gás de 0,04 US\$/kWh.

- Análise de sensibilidade do custo da UPG

O custo operacional depende diretamente da quantidade relativa de cada contaminante dentro do gás do aterro sanitário. Os principais contaminantes que influenciam o custo do pré-tratamento são o H₂S, compostos orgânicos de enxofre, compostos clorados. As mudanças nas concentrações desses componentes afetam a frequência de troca dos catalisadores e absorvedores. A sensibilidade do custo da unidade de pré-tratamento de gases pode ser

analisada utilizando a seguinte equação que também inclui o efeito do custo da energia elétrica.

$$C_{UPG} = [320,9 + 1863UPC + (0,543 H_2S + 2,064 RS + 1.776 HCl)/1000] / LHV \quad [3.28]$$

onde,

C_{UPG} = Custo do pré-tratamento (US\$/MMBtu);

UPC = Preço da energia elétrica (US\$/kWh);

H_2S = Concentração de ácido sulfídrico (ppbv);

RS = Concentração de compostos orgânicos de enxofre (ppbv);

HCl = Concentração de compostos (ppbv);

LHV = Calor de combustão do gás do aterro sanitário (Btu/dscf)

• Custo de capital da PAFC

Conforme TREVISAN (2004) os custos de capital para a implantação de um sistema de pilhas a combustível são o de aquisição da planta junto ao fabricante, os custos de transporte desde o país de origem até o ponto de instalação, os impostos envolvidos, os custos de instalação, além da aquisição de um tanque para o armazenamento da água quente e um transformador.

Segundo o fabricante, o custo da planta no modo *on-site* é de US\$ 850.000,00, sendo a previsão do custo de instalação em média de US\$ 100.000,00, podendo variar entre valores de US\$ 70.000,00 a 150.000,00. Os impostos envolvidos com a importação da planta são o imposto de importação (II), de 14%, o imposto sobre produto industrializado (IPI), de 5%, e o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS), de 18% sobre o valor do produto.

De acordo com TREVISAN (2004), os custos relacionados ao transporte foram estimados tanto pela Fundação de Desenvolvimento da Unicamp (Funcamp) quanto pelo setor de importação da Unicamp e são constituídos pela despesas bancárias (CAD), o frete internacional, a armazenagem, o desembaraço, Sicomex, o seguro e o transporte nacional. Na tabela 3.2 apresenta-se o valor de cada item e a soma total dos custos de capital, levando em conta que US\$ 1,00 = R\$ 2,90 / Janeiro de 2004.

Tabela 3.2. Custos de capital de uma PAFC.

Custo de capital	Valor (US \$)	Valor (R \$)
Planta da pilha a combustível	850.000	2.465.000
Instalação da planta / Transformador	100.000	290.000
Imposto de importação (II) 14%		345.100
Imposto sobre produto industrializado (IPI) 5%		123.250
ICMS 18%		443.700
Frete internacional	7.800	22.620
Armazenagem	8.500	24.650
Seguro	16.000	46.400
Transporte nacional		4.200
Desembaraço /Sicomex /Despesas bancárias		1.960
TOTAL		3.742.230

Fonte: Tabela adaptada do trabalho TREVISAN (2004).

○ Custos operacionais da PAFC

Conforme TREVISAN (2004), os custos de manutenção da planta de pilha a combustível considerados aqui são referentes a uma vistoria anual da planta e também à troca de componentes durante a sua vida útil, que é tomada como sendo de 20 anos. Essa troca de componentes é realizada no sexto e décimo terceiro ano de operação da planta.

No vigésimo ano, o valor da pilha é avaliado como sendo de US\$ 9.700 e este valor é, portanto descontado do total das despesas citadas.

A manutenção da planta é feita regularmente e engloba tarefas como a checagem dos equipamentos, limpeza, lubrificação, reposição de peças, manutenção em geral, etc. O intervalo de tempo entre cada uma delas é variado e pode ser desde a cada 3 meses até a cada 6 anos. Na tabela 3.3 apresenta-se a frequência das principais operações e a sua duração.

Tabela 3.3. Manutenção de uma PAFC.

Tipo	Frequência	Item	Duração
Manutenção durante a operação	A cada 3 meses	• Limpeza de filtros • Troca de resinas	1 dia
Vistoria anual	Anual	• Manutenção de bombas • Limpeza e inspeção de trocadores de calor e do tanque	Cerca de 4 dias
Troca de componentes	A cada 6 anos aprox.	• Troca da pilha a combustível • Reposição dos catalisadores do processo de reforma	Cerca de 2 semanas

Fonte: TREVISAN (2004).

3.6.1.2. Estimativa teórica

• Estimativa do investimento total

O investimento total necessário para um projeto é a soma dos capitais fixo e circulante. O capital fixo é o custo da instalação pronta para arrancar e inclui custos de:

- projeto, supervisão e construção;
- todos os grandes equipamentos, e acessórios, e instalação;
- linhas de processo, instrumentação e sistemas de controle e tubulações em geral;
- edifícios e estruturas;
- serviços auxiliares, tais como as unidades de tratamento de água e outros.

O capital circulante é o investimento adicional necessário para arrancar a instalação até que haja recebimento de receitas. Inclui os custos de:

- arranque e teste preliminares;
- estoques iniciais;
- matérias primas e intermediárias do processo;
- existências de produto acabado e sua estocagem;
- fundos para cobrir contas por cobrar aos clientes.

O capital circulante pode variar desde valores de 5% do capital fixo até 30% no caso de um processo que produza uma gama diversificada de produtos. Geralmente é usado um valor entre 10 e 20%.

COULSON e RICHARDSON (1983) apresentam um método fatorial para estimativa de custos, resumido na tabela 3.4. Os valores de f_1 até f_9 correspondem aos custos diretos e de f_{10} até f_{12} aos custos indiretos e a soma deles resultam no capital fixo total [3.29]. Com o capital fixo pode ser calculado o capital circulante que somados resultam no investimento total necessário [3.30].

$$CAP_{fixo} = C_{direto} + C_{indireto} \quad [3.29]$$

$$INV_{total} = CAP_{fixo} + CAP_{circulante} \quad [3.30]$$

Tabela 3.4. Fatores típicos para estimativa do custo de capital fixo.

CONSTITUINTE	TIPO DE PROCESSO		
	Fluidos	Fluido/Sólido	Sólidos
1. CUSTO EQUIPAMENTO PRINCIPAL (PCE)	PCE	PCE	PCE
f_1 Montagem do equipamento	0,40	0,45	0,50
f_2 Tubagem	0,70	0,45	0,20
f_3 Instrumentação	0,20	0,15	0,10
f_4 Eletricidade	0,10	0,10	0,10
f_5 Edifícios, processo	0,15	0,10	0,05
* f_6 Serviços auxiliares	0,50	0,45	0,25
* f_7 Sistemas de estocagem	0,15	0,20	0,25
* f_8 Preparação do local	0,05	0,05	0,05
* f_9 Edifícios auxiliares	0,15	0,20	0,30
2. CUSTO FÍSICO DA INSTALAÇÃO (PPC) PPC = PCE (1 + f_1 + f_2 + f_3 + + f_9)	3,40	3,15	2,80
f_{10} Projeto e Engenharia	0,30	0,25	0,20
f_{11} Pagamento ao empreiteiro	0,05	0,05	0,05
f_{12} Contingência	0,10	0,10	0,10
3. CAPITAL FIXO CF = PPC (1 + f_{10} + f_{11} + f_{12})	1,45	1,40	1,35

* Omite-se no caso de pequenas ampliações a locais existentes.

Fonte: COULSON e RICHARDSON (1983).

- **Custos de funcionamento**

Conforme COULSON e RICHARDSON (1983) é necessário uma estimativa dos custos de funcionamento (custo de produção) para avaliar a viabilidade de um projeto e para efetuar escolhas entre possíveis esquemas de processamento alternativos. Na tabela 3.5 resumem-se os diversos componentes típicos dos custos de operação ou custos de produção.

Tabela 3.5. Sumário dos custos de operação.

CUSTOS	VALORES TÍPICOS
Custos variáveis (A)	
1. Matérias primas	Orçamento (De acordo à produção)
2. Materiais diversos	10% do custo de manutenção
3. Água, eletricidade, gás, etc.	Preço x Consumo dos equipamentos
4. Embalagem e expedição	Normalmente desprezível
Custos fixos (B)	
5. Manutenção	5-10% do capital fixo
6. Mão-de-obra	10 -15% do custo de funcionamento
7. Supervisão	20% da mão-de-obra
8. Encargos gerais da fábrica	50% da mão-de-obra
9. Encargos de capital	15% do capital fixo
10. Seguro	1% do capital fixo
11. Impostos	2% do capital fixo
12. Patentes	1% do capital fixo
Custos diretos de produção	= A + B
Custos Indiretos (C)	
13. Despesas com vendas	20-30% do custo direto de produção
14. Encargos gerais	
15. Pesquisa e desenvolvimento	
Custo anual de produção (CAP)	= A + B + C
Custo de produção / kg de produto	= CAP / Volume de produção anual

Fonte: COULSON e RICHARDSON (1983).

Os custos de funcionamento estão divididos em dois grupos:

- **custos variáveis**, que dependem da quantidade de produto fabricado, tais com os relativos a matérias primas, materiais de produção diversos, água, gás, eletricidade, combustíveis, vapor, expedição e embalagem.
- **custos fixos**, que não variam com a produção, tais como os relativos a manutenção, mão-de-obra, custos de laboratório, encargos gerais da fábrica, custos de capital, contribuições, impostos, seguros, pagamentos de licenças e patentes.

Os custos anteriormente referenciados são os custos diretos de produção. Além desses custos estão as despesas de funcionamento gerais da companhia que adicionarão cerca de 20 a 30% aos custos diretos de produção, encargos gerais, custos de pesquisa e desenvolvimento, despesas de venda, reservas.

3.6.2. Avaliação econômica de projetos

COULSON e RICHARDSON (1983) descrevem algumas técnicas para avaliação econômica e os critérios usados para avaliar o desempenho econômico do projeto,

Fluxo de lucro líquido

O fluxo do lucro líquido é a diferença entre os ganhos e as despesas. As despesas são as parcelas necessárias para pagar o projeto e a partir dos bens para vender é calculado o lucro. O diagrama de fluxo da verba líquido acumulado ao longo da vida do projeto é apresentado na figura 3.3 e apresenta uma imagem nítida dos recursos necessários para um projeto e das datas dos lucros. Pode dividir-se o diagrama nas seguintes regiões características:

A→B: investimento necessário para projetar a instalação;

B→C: o fluxo significativo de capital para construir a fábrica e prover fundos para o arranque;

C→D: início da produção e das vendas. O ponto D chama-se ponto de saldo do investimento e o tempo para atingir esse ponto chama-se tempo de reembolso;

D→E: fluxo de verba acumulado positivo, ou seja início do lucro;

E→F: final da vida do projeto.

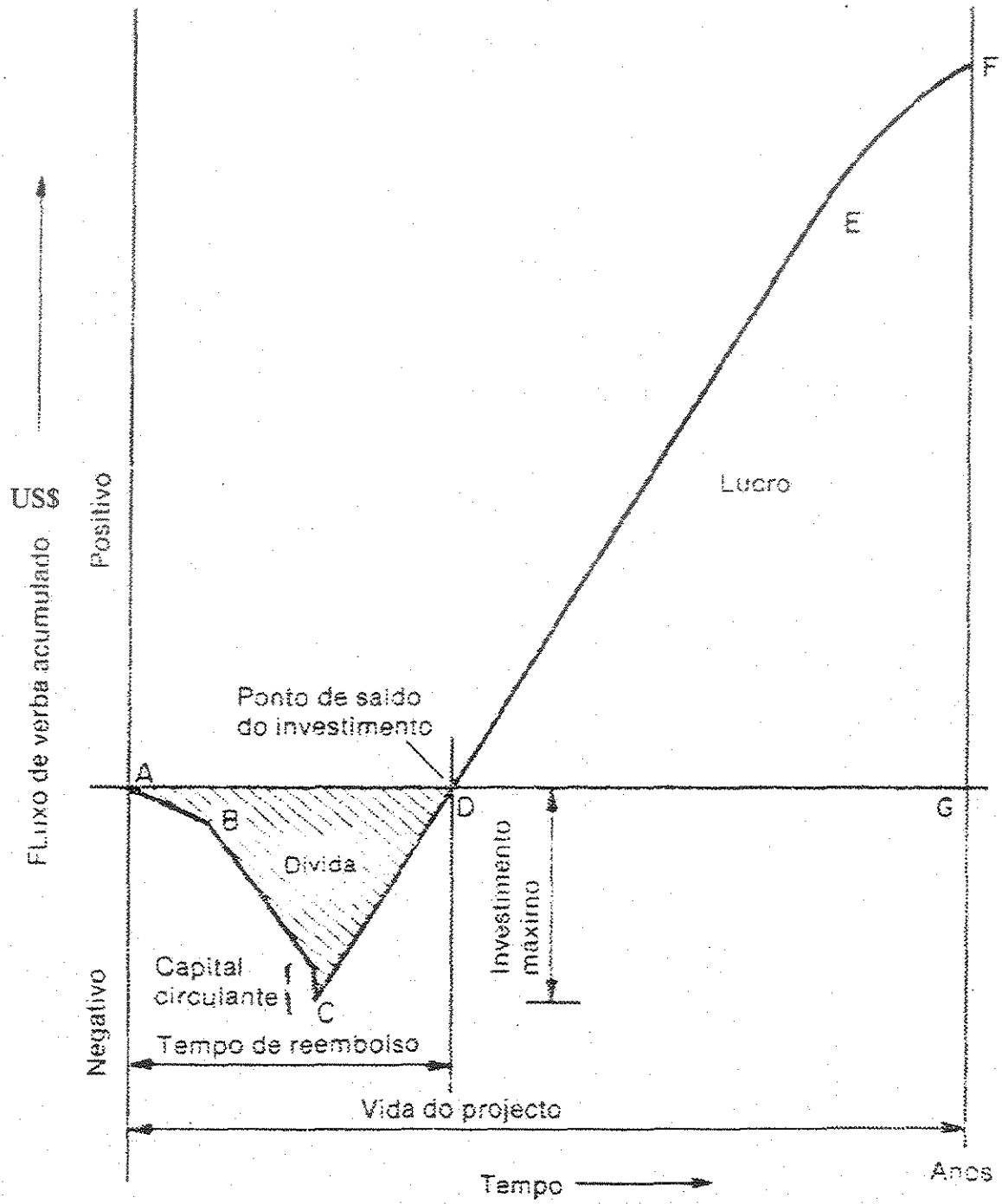


Figura 3.3. Diagrama de fluxo de investimentos (COULSON e RICHARDSON, 1983).

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A idealização e a concepção do Sistema Integrado proposto neste trabalho começou a partir da idéia de aproveitamento energético do gás de aterro sanitário utilizando a tecnologia de pilhas a combustível, apresentando os detalhes técnicos para tal propósito.

Além do aspecto puramente técnico, a premissa anterior foi desenvolvida levando em conta outros aspectos importantes. Primeiro, o aspecto econômico, visando maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis em cada uma das etapas, diminuir o custo de operação e aumentar os benefícios do sistema. Segundo, o aspecto ambiental, buscando minimizar o impacto do sistema como um todo.

De acordo com o mencionado, na primeira parte deste capítulo são apresentados os dados e detalhes tecnológicos de cada uma das etapas do Sistema Integrado. Na segunda parte são feitos os cálculos necessários para a avaliação técnico-econômica do sistema.

4.1. Sistema Integrado

Neste trabalho designa-se por Sistema Integrado à utilização do gás gerado na Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR) Delta A do município de Campinas/SP, tanto para geração de energia elétrica, no caso do CH_4 , quanto para a neutralização de esgoto alcalino, no caso do CO_2 , sendo ambos os produtos aproveitados no abastecimento da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Piçarrão do mesmo Município. Além disso, a integração permite também que futuramente os gases e os lodos gerados nos biodigestores da ETE sejam aproveitados dentro do mesmo sistema.

Como sistema de geração de energia elétrica, determinou-se a utilização de uma Pilha a Combustível do tipo Ácido Fosfórico (PAFC). As PAFC estão disponíveis comercialmente no mercado em plantas de 200 kW, e apresenta elevada confiabilidade em termos tecnológicos.

Segundo KING e McDONALD (2003), no Brasil tem-se conhecimento de 4 PAFC adquiridas até então pelas companhias Copel, Latec e Petrobrás. De acordo com SPIEGEL

e PRESTON (2003), existem 4 PAFC instaladas nos EUA para aproveitamento de gás gerado em aterros sanitários ou em biodigestores de plantas de tratamento de esgoto.

A utilização de PAFC faz com que seja necessária a instalação de uma Unidade de Pré-tratamento dos Gases (UPG), devido a existência na composição do gás de aterro de produtos, que podem envenenar os catalisadores tanto do sistema de reforma, como das células a combustível ou ainda, apresentarem forte potencial corrosivo diminuindo a vida útil dos equipamentos da instalação.

Por último, dentro da ETE será necessário a instalação de um Reator de Neutralização de Esgoto Alcalino (RNEA) para aproveitamento do CO_2 . Na figura 4.1 apresenta-se um diagrama do Sistema Integrado e na figura 4.2 apresenta-se o fluxo do projeto proposto.

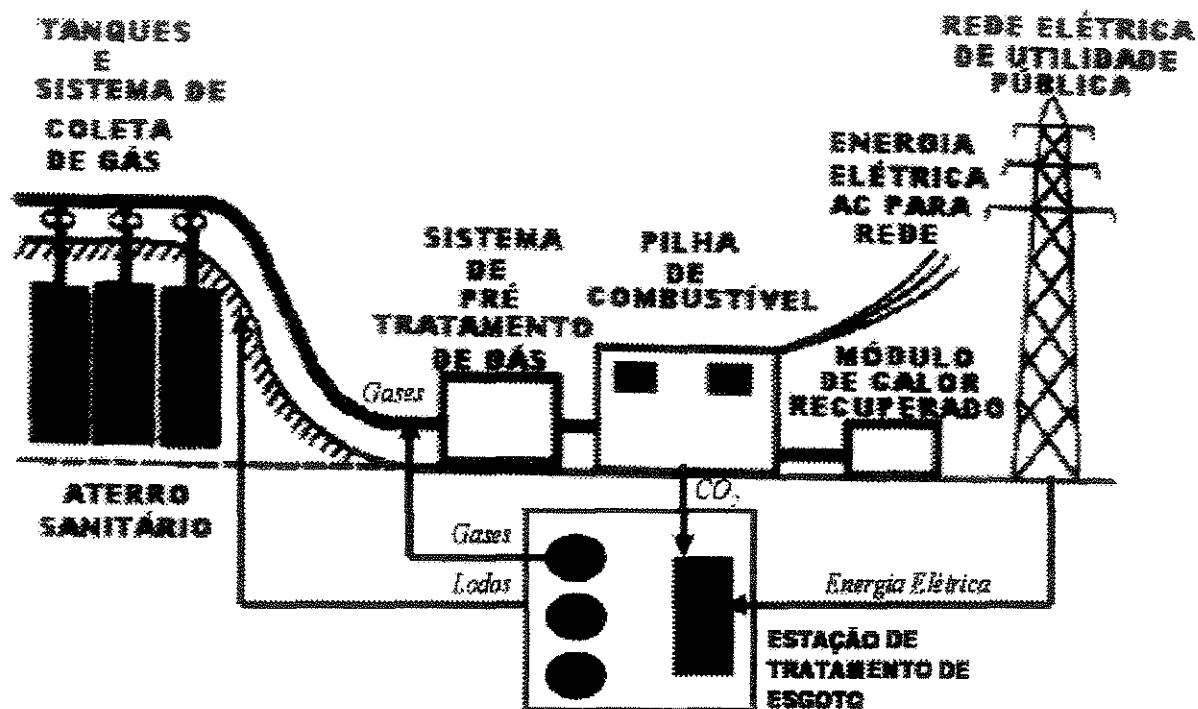


Figura 4.1. Esquema geral do Sistema Integrado.

SISTEMA INTEGRADO

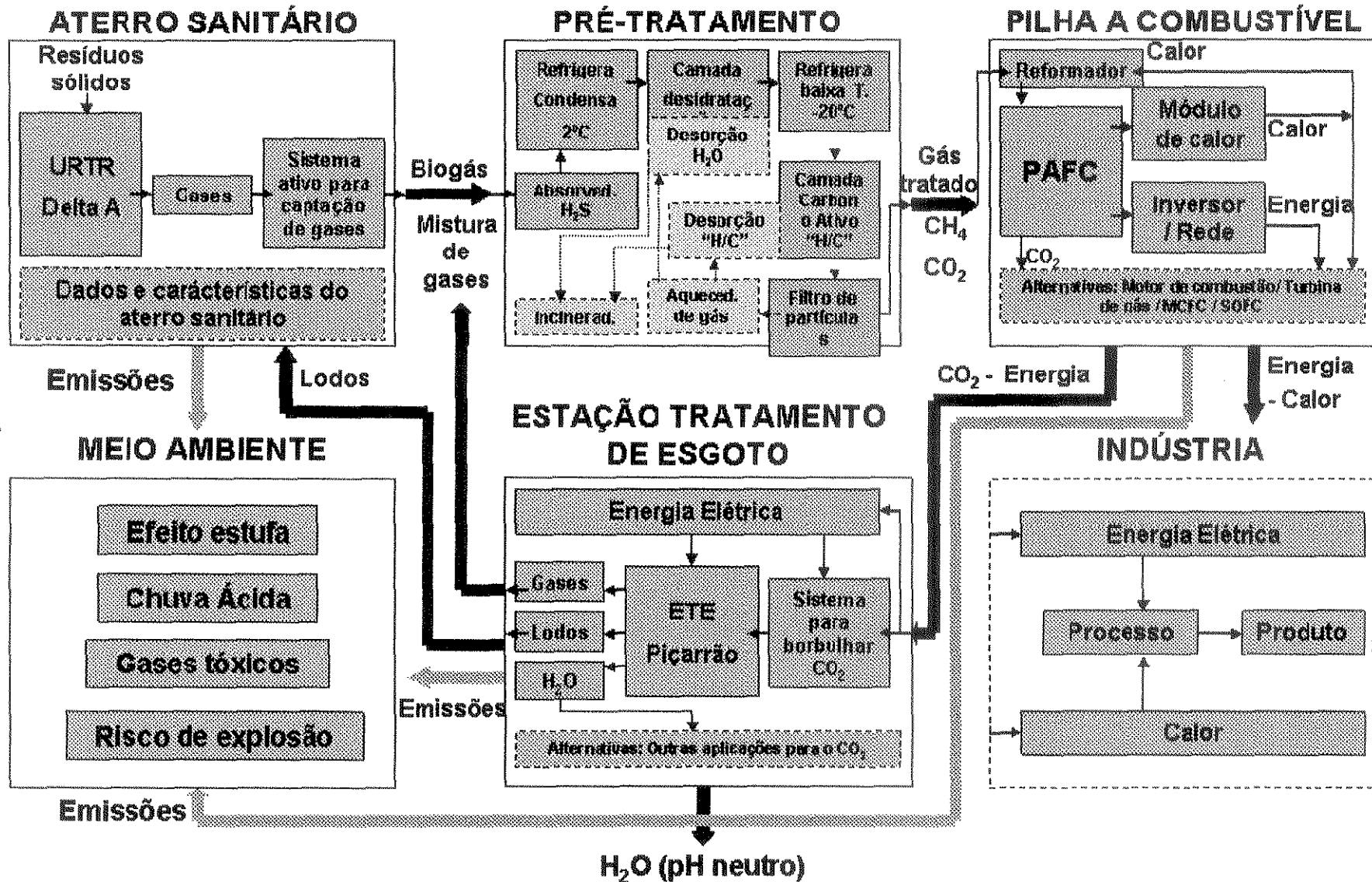


Figura 4.2. Sistema Integrado (URTR / ETE / PAFC)

4.1.1. Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR)

O diagrama de fluxo da URTR, primeira etapa do Sistema Integrado é apresentado na figura 4.3 .

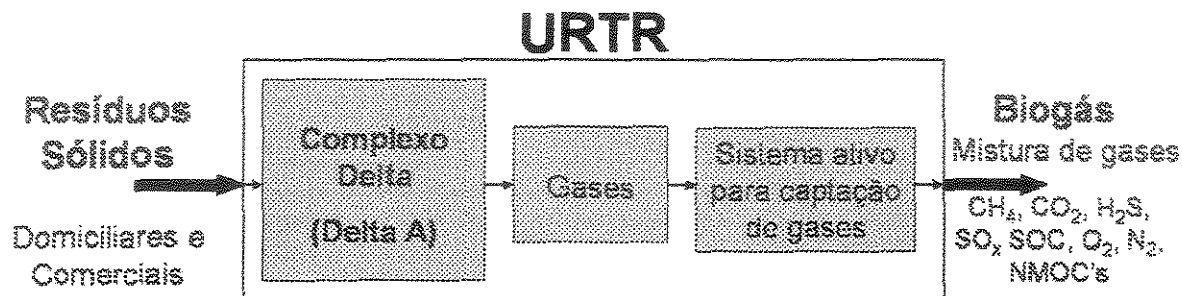


Figura 4.3. Diagrama de fluxo da URTR - Delta A.

Com base no diagrama de fluxo apresentado a seguir são detalhadas as etapas que compõem a URTR:

- **Complexo Delta (Delta A)**

De acordo com o informe CAMPINAS (1996), a Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos URTR, Complexo Delta, idealizado na segunda gestão do governo municipal do prefeito Magalhães Teixeira, em 1996, configurava-se como um Sistema Integrado de Tratamento e Destinação de Resíduos Sólidos de concepção abrangente, de acordo com os diferentes resíduos a serem tratados; resíduos domiciliares e comerciais, hospitalares, industriais e da construção civil. O modelo tecnológico foi elaborado dentro de uma concepção de Usina de Tratamento Integrado onde se previa unidades de segregação/triagem, compostagem, incineração e aterramento (CAMPINAS, 1994).

Atualmente, o projeto Complexo Delta conta com a implementação e operação do Aterro Sanitário Delta A que, de acordo com o Plano Diretor do Município, CAMPINAS (1995), tem uma área de 600.000 m². A URTR conta com uma usina para desinfecção de resíduos hospitalares (Sistema de Microondas) e com um projeto para futura área do Aterro Delta B. Na figura 4.4 apresenta-se o mapa do município de Campinas com a localização da URTR e da ETE.

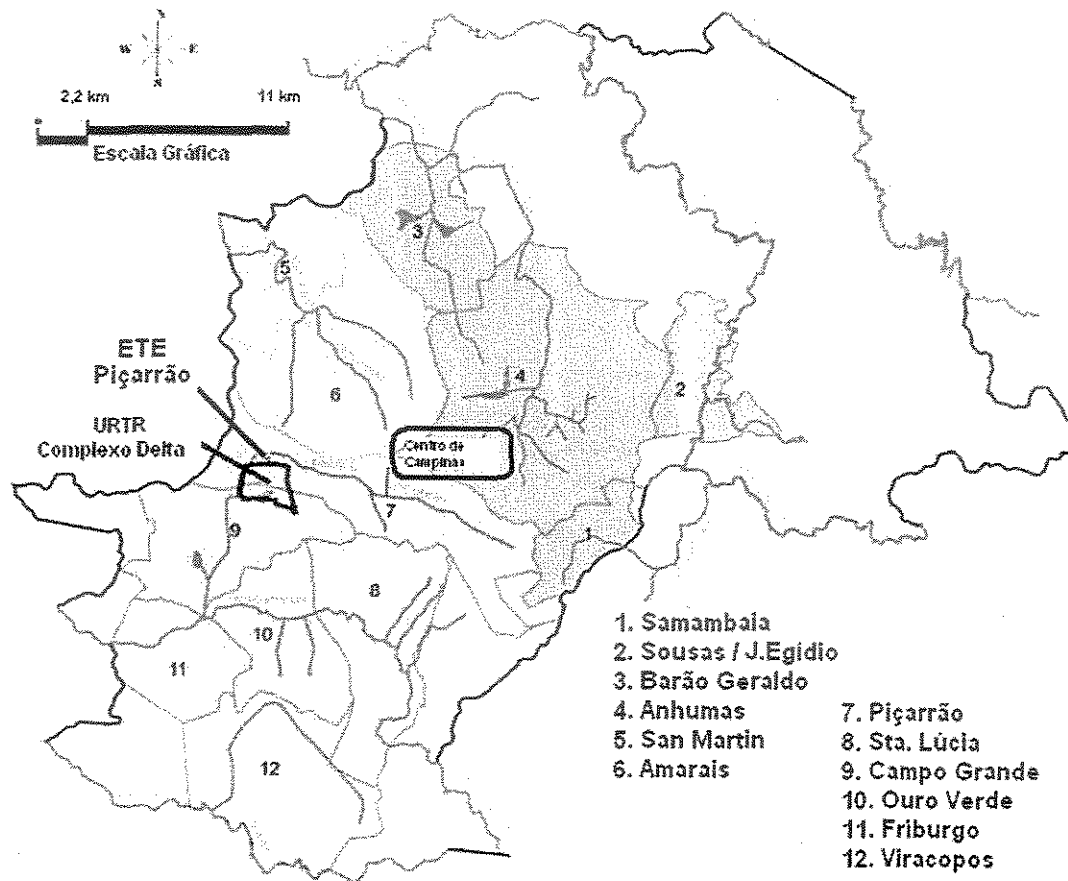


Figura 4.4. Localização do Complexo Delta (CAMPINAS, 1996).

Os principais parâmetros a serem levados em conta na URTR são a temperatura e a composição dos resíduos. Conforme o banco de dados climáticos do Brasil da EMBRAPA (2004), a temperatura mensal do município de Campinas/SP no período entre 1960 e 1990 é apresentada na tabela 4.1. Segundo as informações da EMPLASA (2002) adaptadas do Instituto Agrônômico de Campinas, a temperatura média para o ano de 1999 foi de 21,7°C. O gráfico de temperatura durante esse mesmo ano é apresentado na figura 4.5.

Tabela 4.1. Temperatura média mensal de Campinas entre 1960 e 1990.

Mês	Temperatura média(°C)	Mês	Temperatura média(°C)
Janeiro	24,00	Julho	18,20
Fevereiro	24,40	Agosto	19,30
Março	23,90	Setembro	21,00
Abril	22,00	Outubro	22,10
Maio	19,50	Novembro	22,90
Junho	18,30	Dezembro	23,40
Fonte: EMBRAPA (2004)		Média Ano	21,58

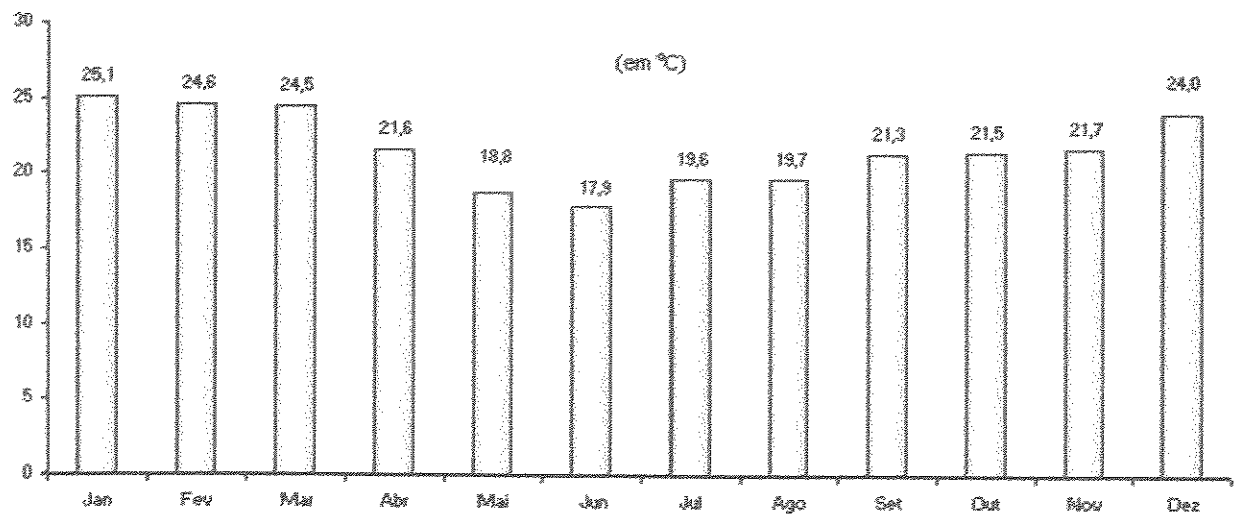


Figura 4.5. Temperatura média mensal de Campinas em 1999 (EMPLASA, 2002).

Na figura 4.6 é apresentado a composição média (% em massa) dos resíduos sólidos domiciliares e comerciais do município de Campinas (CAMPINAS, 1996).

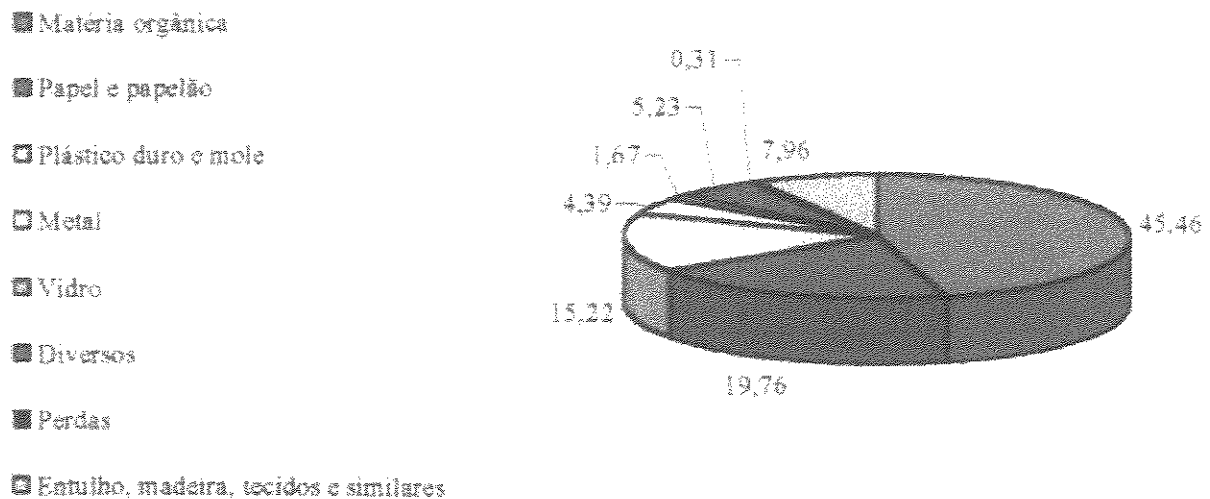


Figura 4.6. Composição média dos resíduos sólidos (CAMPINAS, 1996).

A unidade de medida utilizada é kg/m^3 (massa dos resíduos em relação ao volume). Para efeito de dimensionamento, o seu conhecimento é de fundamental importância. No Brasil, em função da grande quantidade de material orgânico no lixo, a massa específica varia entre 148 a 178kg/m^3 , no caminhão compactador sobe para 237 a 415kg/m^3 e nos aterros para 356 a 1.009kg/m^3 .

Tabela 4.2. Detalhamento qualitativo e estimativa em massa dos resíduos.

Resíduo	Categ.	Massa úmida (%)	Umidade típica (%)	Massa seca (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cinzas
Alimento	R	55,0	70,0	16,50	48,0	6,4	37,6	2,6	0,40	5,0
Papel e papelão	R	21,0	6,0	19,74	44,0	6,0	44,0	0,3	0,20	6,0
Têxteis	L	5,0	10,0	4,50	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Madeira	L	1,1	20,0	0,88	49,5	6,0	42,7	0,2	0,10	1,5
Plástico	N	8,9	2,0	8,72	60,0	7,2	22,8	0	0	10,0
Vidro	N	2,6	2,0	2,55	R	Rapidamente biodegradável				
Metais	N	5,4	2,0	5,29	L	Lentamente biodegradável				
Outros	N	1,0	5,0	0,95	N	Não biodegradável (dificilmente)				
Total		100,0	---	59,13	---					

Fonte: CUNHA (2002).

• Gases

As informações disponíveis na tabela 4.3 foram obtidas para determinar a composição característica do gás utilizado na operação de pilhas a combustível em aterros sanitários.

Tabela 4.3. Composição do gás emitido por aterros sanitários.

Característica	Faixa	Valor Típico
Poder calorífico (kcal/m ³)	3100 - 5350	4450
CH ₄ (%)	35 - 58	50
CO ₂ (%)	40 - 55	45
N ₂ (%)	0 - 15	5
O ₂ (%)	0 - 2,5	< 1
Enxofre (ppmv H ₂ S)	1 - 700	21
Halogênios (ppmv Cl)	132	132
Compostos orgânicos não metânicos, NMOC's (ppmv)	237 - 14000	2700

Fonte: SANDELLI e SPIEGEL (1992).

Como é apresentado na tabela 4.3, o valor energético ideal para aterros sanitários varia entre 3100 e 5350 kcal/m³, possuindo um valor típico de 4450 kcal/m³.

O principal constituinte não metânico encontrado é o dióxido de carbono, com faixas de concentração variando entre 40 e 55% em volume, e com um valor típico de 45%.

Outros gases presentes são o nitrogênio e o oxigênio, e são indicativos da entrada de ar nos poços de extração de gás ou, mais freqüentemente, no perímetro dos mesmos. As concentrações de nitrogênio podem situar-se em valores máximos de 15%, mas os valores típicos ficam em torno de 5%, enquanto que, os valores de oxigênio são monitorados diariamente e mantidos em níveis baixos por questões de segurança (SANDELLI e SPIEGEL, 1992).

Segundo U.S. EPA (1991), os compostos orgânicos não metânicos (NMOCs) indicam um valor típico de 2.700 ppmv de hexano. Tais concentrações representam um parâmetro importante, pois estão relacionadas à capacidade total do sistema de pré-tratamento de gás. Por outro lado, as análises específicas dos componentes formadores da corrente gasosa, fornecem os dados necessários para se dimensionar os subcomponentes do sistema de pré-tratamento de gás (SANDELLI e SPIEGEL, 1992). Na tabela 4.4 são apresentados os compostos orgânicos não metânicos (NMOCs) encontrados no gás de aterro sanitário.

Os contaminantes indesejáveis, para a utilização das pilhas a combustível, e presentes na composição do gás de aterros sanitários são os compostos de enxofre e halogênios, principalmente compostos contendo cloro.

Para os compostos contendo enxofre, a concentração média está entre 1 e 700 ppmv, com um valor típico da ordem de 21 ppmv. Os halogênios encontram-se tipicamente na faixa de 132 ppmv, sendo que, tais concentrações sofrem variações de aterro para aterro e também para um determinado aterro ao longo do tempo, dependendo da estação climática e do teor de umidade (SANDELLI e SPIEGEL, 1992).

Tabela 4.4. Compostos orgânicos não metânicos (NMOC's) em aterros nos EUA.

TIPO DE CONTAMINANTE	PENROSE / CA (ppmv) *	ANOKA / MN (ppmv)
Total Hidrocarbonetos	1634	31
Butano C_4H_{10}		7
2 Butanona C_8H_8O , Etil metil cetona		16
Propano C_3H_8		8
Isobutano C_4H_{10}	95	
Isopentano C_5H_{12}	963	
n-Pentano C_5H_{12}	198	
Hexano C_6H_{14}	297	
Octano C_8H_{18}	81	
Total Aromáticos	72,5	173
Benzeno C_6H_6	2	1,1
Cloro benzeno C_6H_5Cl	1	
Eteno C_2H_4		37
Xileno C_8H_{10}	22	62
Etilbenzeno C_8H_{10}	13	37
Estireno C_8H_8	0,5	3
n-Heptano C_7H_{16}		2
Tolueno C_7H_8	35	31
Compostos de Enxofre	121,02	60
Ácido sulfídrico H_2S (Sulfeto de hidrogênio)	103	53
Metil mercaptano CH_3SH	5	2,1
Etil mercaptano C_2H_5SH	5	
Sulfeto de dimetila C_2H_6S	8	4,9
Dissulfeto de dimetila $C_2H_6S_2$	0,02	

TIPO DE CONTAMINANTE	PENROSE / CA (ppmv) *	ANOKA / MN (ppmv)
Hidrocarbonetos Halogenados	101	8,36
Dicloro eteno $C_2H_2Cl_2O$	3	
Dicloro benzeno $C_6H_4Cl_2$		1,5
Dicloro difluor metano (Freon 12) CCl_2F_2		1
Cis dicloro eteno $C_2H_2Cl_2$ Vinildeno	5	3
Dicloro metano CH_2Cl_2		0,35
Cloreto de metileno $C_2H_3ClO_2$	12	
Trifluor cloro etano $CClF_3$	0,6	
Tricloro etileno C_2HCl_3	70	
Tricloro fluoro metano (Freon 11) CCl_3F		0,1
Tricloro etano C_2HCl_3		0,71
Tetracloro etano C_2Cl_4	6	0,5
Tetracloro etileno C_2Cl_4	1,4	

Fonte: STEINFELD e SANDERSON (1998) e SANDELLI et al. (1994)*.

• Sistema ativo para captação de gases

O sistema ativo para captação de gases da URTR - Delta A do município de Campinas é como o proposto por HUTCHINGS (1996). Tal sistema consiste em um conjunto de poços, tubulações para interconexão dos poços, filtros, ventiladores ou bombas, dispositivos para monitoramento e, um sistema opcional para queima de gases e remoção dos condensados. Na figura 4.7 apresenta-se um esquema do sistema ativo.

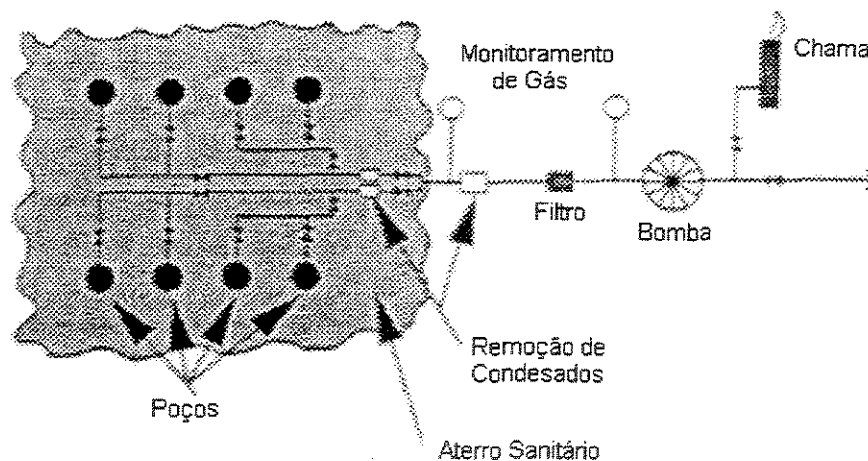


Figura 4.7. Sistema ativo para captação de gases (BROWN e MAUNDER, 1994).

Os detalhes de um poço para extração ativa de gases de um aterro sanitário podem ser visualizados na figura 4.8 e a distribuição dos poços na superfície do aterro sanitário nas figuras 2.5 e 4.9.

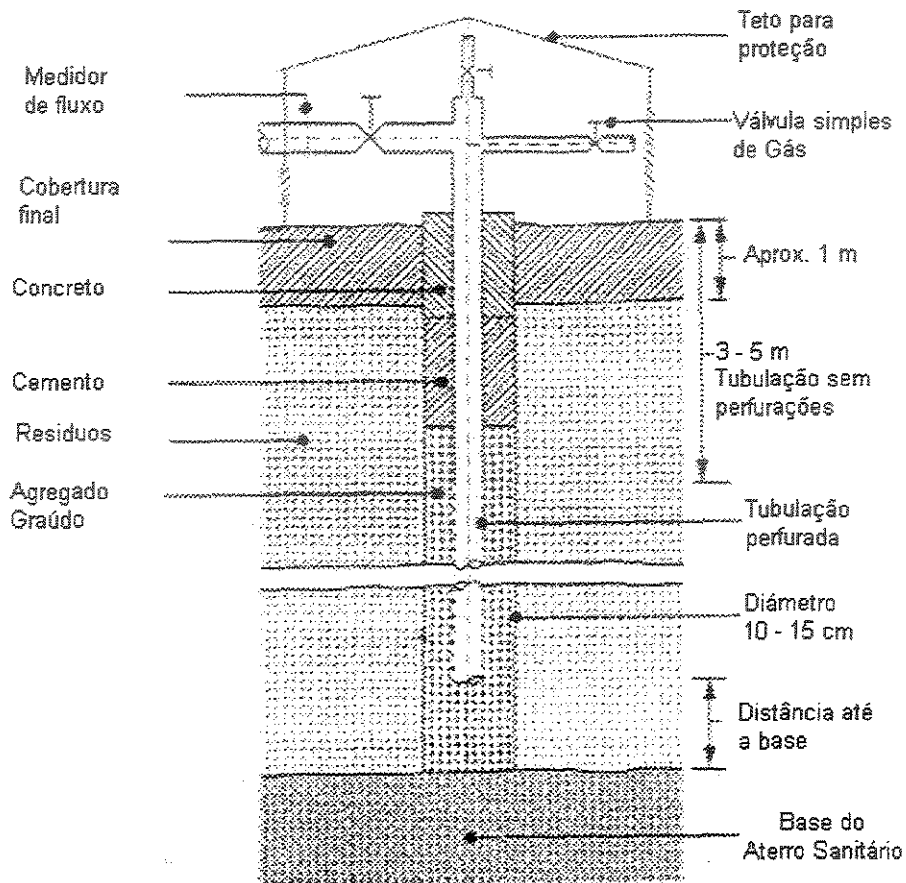


Figura 4.8. Esquema de um poço para captação de gases (DoE, 1991).

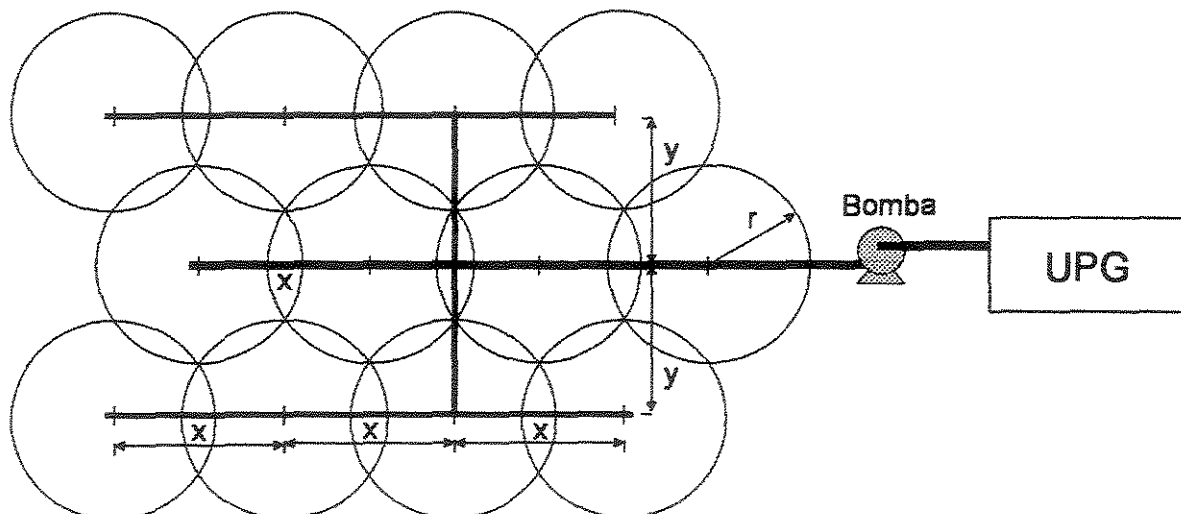


Figura 4.9. Distribuição das fileiras de poços de captação (KARSOTIS, 1981).

4.1.2. Unidade de Pré-tratamento de Gases (UPG)

Um sistema de pré-tratamento de gás emitido por um aterro sanitário, para aproveitamento energético usando uma pilha a combustível, deve ser projetado com a finalidade de levar o gás a uma concentração tão baixa de compostos indesejáveis que não cause danos à pilha. Além disso, esta unidade é projetada para fornecer gás tratado ao sistema de pilhas a combustível de maneira eficiente, econômica e ambientalmente correta (SANDELLI e SPIGEL, 1992).

O projeto da UPG deve ser independente das mudanças de concentração do gás de alimentação e consiste em três subsistemas principais:

- processo de purificação de gás;
- processo de regeneração das colunas de purificação e,
- processo de refrigeração.

O processo de operação da UPG baseia-se na remoção de gás sulfídrico (H_2S), à temperatura ambiente, seguido pelas etapas iniciais de refrigeração, condensação e secagem na camada seca. Em uma segunda etapa de refrigeração intensa, ocorre a remoção de hidrocarbonetos na camada de carbono ativado e por último, um processo de filtração.

A UPG gera uma quantidade mínima de sólidos residuais, apresenta uma alta eficiência térmica e uma baixa necessidade de energia elétrica, sendo esta usada somente para o bombeamento do gás e para as etapas de refrigeração. A eficiência térmica estimada é de 92%. O balanço de energia do processo envolve as etapas de regeneração, vaporização do condensado e incineração dos gases de refrigeração. Além disso, o sistema não apresenta liberação de efluentes líquidos, uma vez que todos os condensados são vaporizados e subsequentemente incinerados. A destruição de sólidos envolve a remoção dos materiais usados nas camadas regeneráveis.

A unidade de pré-tratamento é baseada em modificações de sistemas que já existem e utiliza componentes comercialmente disponíveis (SANDELLI e SPIEGEL, 1992). Na figura 4.10 é apresentado o esquema detalhado da unidade de pré-tratamento de gases UPG.

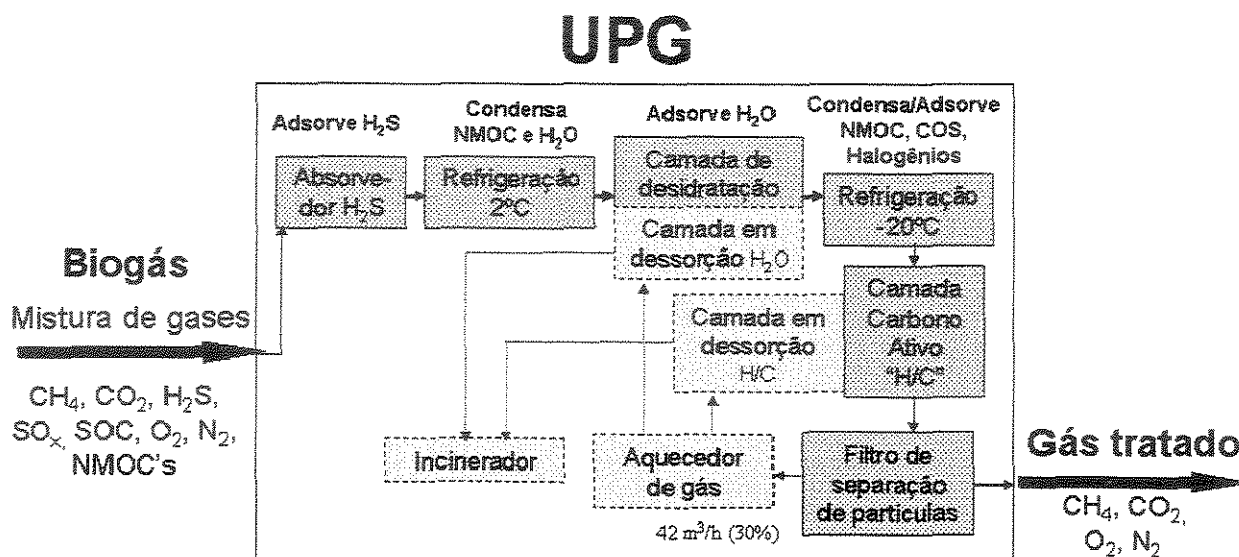


Figura 4.10. Diagrama da UPG (SPIEGEL et al., 1997).

Na camada inicial remove-se o H_2S juntamente com os vapores de água, realizando-se um refinamento final através de uma camada de carbono ativado. O processo é mantido a temperatura e umidade baixas, garantindo assim a remoção de traços de contaminantes, (SPEGEL et al., 1997). O processo nesta fase é formado por uma camada não regenerável e quando saturada, a eficiência de remoção de H_2S torna-se baixa (SPIEGEL et al., 1997).

Posteriormente, a primeira fase de arrefecimento do gás origina uma tolerância do sistema de pré-tratamento com relação à variação encontrada na composição dos compostos presentes no gás do aterro (SANDELLI e SPIEGEL, 1992). Esta primeira fase de arrefecimento remove os principais hidrocarbonetos pesados, além de reduzir significativamente o teor de água (SANDELLI et al., 1994).

O gás passa então para a camada de desidratação, que se localiza entre a primeira e a segunda etapa de refrigeração, justamente para prevenir o congelamento da água, antes de entrar na segunda etapa de arrefecimento. Esta unidade tem uma grande capacidade de absorção do vapor de água que permanece no gás do aterro sanitário e, é projetada para reduzir o ponto de orvalho do gás abaixo do ponto de congelamento da água. Nesta fase é removida toda a água remanescente, bem como alguns compostos que contêm enxofre e halogênios (SANDELLI et al., 1994). De acordo com SPIEGEL et al. (1997) enquanto uma camada está em operação a outra está sendo regenerada.

A segunda bateria de refrigeradores poderá condensar hidrocarbonetos pesados, se estes estiverem presentes em concentrações bastante altas (SPIEGEL et al., 1997). Remove também a mistura de aromáticos e hidrocarbonetos halogenados. Estes condensados são coletados e transferidos para um queimador isolado para decomposição térmica, caso estejam presentes em altas concentrações (SANDELLI et al., 1994).

De acordo com GRAHAM e RAMARATNAM (1993) o segundo estágio da refrigeração reduz a temperatura da camada de carbono ativado melhorando a eficiência desta no processo de absorção de hidrocarbonetos. A camada de carbono ativado remove todos os hidrocarbonetos pesados, contaminantes sulfurosos e halogenados remanescentes na composição do gás de aterro. Tal camada é formada por duas colunas iguais, uma operando na purificação e a outra está sendo regenerada (SPIEGEL et al., 1997).

Logo depois da unidade de absorção com carbono ativo, o gás passa através de um filtro para retenção de particulado e, é aquecido indiretamente pelo ar ambiente. Utiliza-se um trocador de calor para assegurar que a temperatura de entrada do combustível, gás do aterro tratado, esteja acima de 0°C, antes que seja alimentado à pilha a combustível (SPIEGEL et al., 1997). Na tabela 4.5 apresenta-se a composição aproximada dos gases na saída da UPG.

Tabela 4.5. Composição dos gases de saída da UPG.

Compostos	Concentração limite	Compostos	Concentração limite
CH ₄	50%	NMOC	~ 0
CO ₂	45%	Sulfurosos (H ₂ S)	< 0,05 ppmv
N ₂	5%	Halogenados (Cl)	< 0,05 ppmv
O ₂	< 1%	H ₂ O	~ 0

Fonte: Adaptada de SANDELLI e SPIEGEL (1992), SANDELLI et al. (1994) e SPIEGEL et al. (1997), SPIEGEL e PRESTON (2003).

O gás de aterro sanitário, para ser utilizado como alimentação nas pilhas a combustível, tem que ser essencialmente livre de todos os compostos que contenham enxofre e halogênios e deve apresentar uma mistura adequada de CH₄, CO₂, N₂ e O₂ segundo SPIEGEL et al. (1997).

A UPG deve limitar a emissão de compostos contendo enxofre e halogênios a uma concentração máxima de 0,05 ppmv. De acordo com SPIEGEL et al. (1997), nessa concentração os compostos podem ser removidos com sucesso pelo sistema interno de purificação da pilha a combustível. Os limites de impurezas permitidos nas pilhas de ácido fosfórico podem ser resumidos como apresentado na tabela 4.6.

Tabela 4.6. Limites de impurezas permitidos nas PAFC.

Composto	Concentração limite	Composto	Concentração limite
CH ₄	100 %	O ₂ (contínuo)	0,2 %
Etano	10 %	N ₂ (contínuo)	4 %
Propano	5 %	H ₂ S, COS	< 1ppm
Butano	1,25 %	Total de S	6 ppmv (Max 30)
Pentano	0,5 %	Cloro	0,05 ppm em massa
Hexano, C ₆ ⁺	0,5 %	NH ₃	< 1 ppmv
CO	< 1%	Fe, Cu	~ 0
H ₂ O	10-20%	---	---

Fonte: Adaptada de SPIEGEL et al. (1997) e TREVISAN (2004).

O processo de pré-tratamento termina com o sistema de regeneração da camada seca e da camada de carbono ativado. Dependendo da composição dos gás de entrada na UPG pode ser utilizado entre 8 e 30% do gás tratado para regeneração. Para um gás de aterro sanitário com alta concentração de contaminantes é necessário o valor máximo de retorno de gás tratado. Por exemplo, para um fluxo de gás de entrada de 135,3 m³/h a pressão de 152 kPa o fluxo de saída será 93,3 m³/h a pressão de 124 kPa.

O gás utilizado para a regeneração é enviado para um queimador, onde é combinado com os condensados vaporizados oriundos do processo de refrigeração. Somente então, esta mistura é queimada fornecendo assim 98% de destruição de NMOCs. O gás de exaustão do queimador é essencialmente CO₂ e água.

4.1.3. Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC PC25™C)

Para maximizar o aproveitamento da energia elétrica e da energia térmica geradas pela pilha a combustível e, baseados no trabalho de LUNGHI et al. (2004) é proposto o *Lay Out* do conjunto UPG/Reformador/PAFC apresentado na figura 4.11.

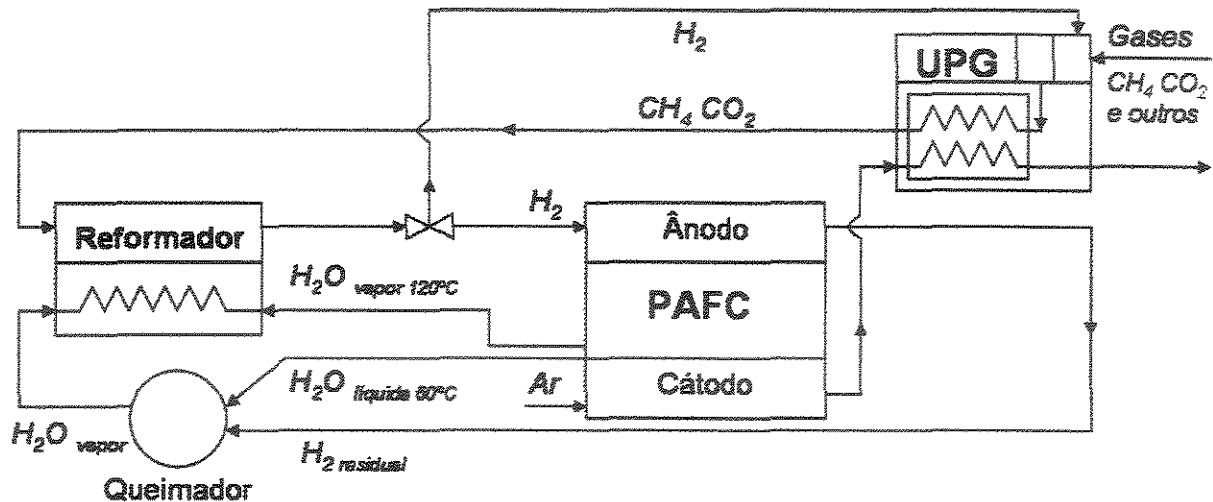


Figura 4.11. Diagrama UPG, REFORMADOR e PAFC.

De acordo com a figura 4.11, os gases provenientes do aterro sanitário são processados na UPG, utilizando H_2 na primeira etapa, onde é feita a eliminação catalítica de compostos de enxofre e, utiliza-se o calor para aquecer o gás na saída da segunda etapa de refrigeração. O H_2 é fornecido pelo sistema de reforma, enquanto o calor é obtido aproveitando o ar quente da saída do cátodo da pilha através de um trocador de calor.

Na etapa de reforma, o H_2 produzido é o combustível utilizado no compartimento anódico da pilha a combustível. Pelo fato da utilização do combustível não ser 100% eficiente, o gás de saída do ânodo ainda apresenta H_2 excedente, que é aproveitado em um queimador, para gerar vapor a partir da água quente produzida na pilha a combustível. Esse vapor juntamente com o vapor gerado na pilha é utilizado no sistema de reforma.

Como sistema de geração de energia elétrica e energia térmica, especificou-se uma pilha a combustível do tipo PAFC modelo PC25™C da empresa UTC cujas principais características são:

Vida útil: 20 anos

Pilha a combustível: formada por 319 células de 0,52 m² de área cada.

Produção elétrica teórica: 200 kW/ 235kVA

Tensão e Frequência: 480/277 V, 60 Hz, 3 fases, 4 fios. Opcional: configuração elétrica internacional de 400/230 V, 50 Hz, 3 fases.

Consumo combustível (CH₄): 55 - 60 m³/h (Poder calorífico 8.700 - 10.700 kcal/m³)

Gás de Aterro (60%CH₄): 90 - 135 m³/h (Poder calorífico 4.450 - 5.350 kcal/m³)

Pressão combustível: entre 1,0 e 3,5 kPa

Eficiência de geração teórica: elétrica 40 %, térmica 50%

Dimensões / peso: 5,5 x 3,0 x 3,0 m / 18,2 ton

Nível de ruído: 60 dBA a 10 m

Temperatura ambiente de operação: faixa de -30 até 43°C.

Produção térmica teórica: 205 kW, disponível na forma de água quente a até 60°C com fluxo de 5,7 m³/h. Opcional: Trocador de calor de alto grau que disponibiliza 102 kW na forma de água quente pressurizada a temperaturas próximas a 120°C, mais 102 kW de água quente a 60°C do trocador padrão.

Emissões: o resultado dos testes de fabrica das emissões das pilhas é apresentado na tabela 4.7.

Tabela 4.7. Exaustão da PAFC.

Composto	CH ₄ (ppmv)	Gás de Aterro* (ppmv)
NOx	1	<1
CO	5	<2
THC	1	---
SO ₂	~ 0	~ 0
Fumaça	~ 0	~ 0
Partículas	~ 0	~ 0

Carga: 200 kW, ppmv 15 % O₂ seco

Fonte: BRENSCHEIDT et al. (1998), * UTC.

Na figura 4.12 apresenta-se um esquema de uma PAFC PC25TMC com o sistema completo de reformador de combustível, células a combustível e inversor de corrente.

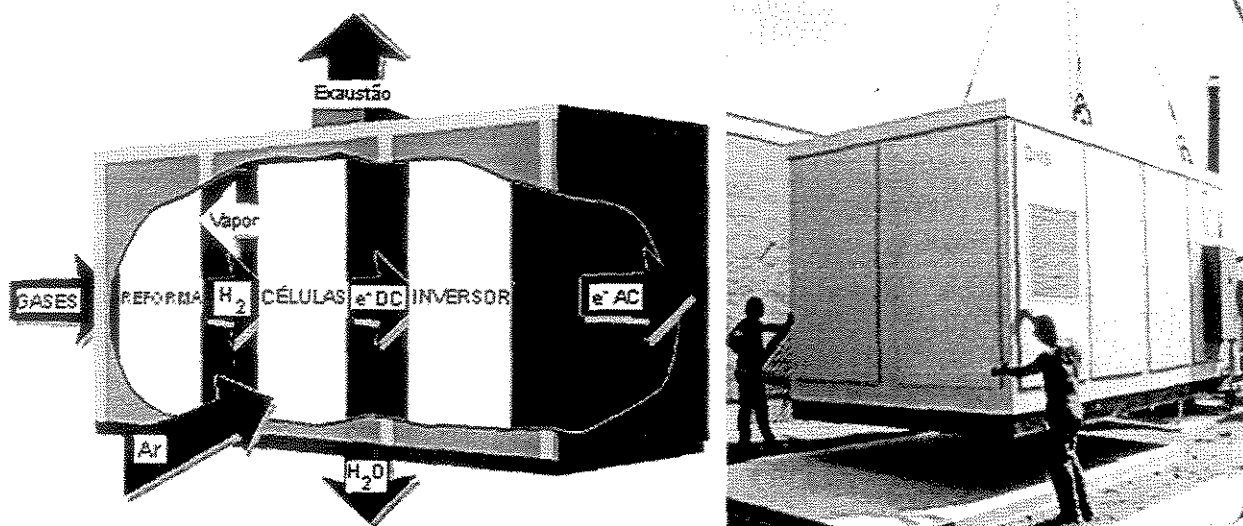


Figura 4.12. Pilha proposta: PAFC PC25TMC - UTC.

As plantas do tipo PC25TMC são projetadas para operarem automaticamente e não é necessária a presença de operadores no local. A interação com a planta pode ser feita diretamente pelo painel de controle localizado na própria planta ou distante dela por meio de um “modem”. O “modem” pode ser utilizado para verificar a eficiência da planta e diagnosticar a informação recebida.

No entanto, existem algumas diferenças para o caso de utilização de gás de aterro sanitário como combustível, tanto para o processo de reforma a vapor, quanto para a planta de pilha a combustível em relação ao processo convencional onde é utilizado gás natural:

- **Características de operação:** em uma planta química industrial de produção de hidrogênio, a carga de operação é estável e o reformador opera com carga constante. Por outro lado, em uma planta de pilhas a combustível, o regime de operação não é constante e a rápida resposta do reformador às variações de composição do gás e à demanda de energia é um ponto crítico a ser considerado;
- **Características do combustível:** o gás pré-tratado ainda pode apresentar alguns contaminantes prejudiciais para o processo de reforma a vapor e para a pilha a combustível. Conseqüentemente, requer-se um dispositivo adicional que garanta a limpeza final do gás antes de ser usado na planta de geração. O gás de aterro sanitário apresenta também uma alta percentagem de CO₂, entre 40 e 55 % da composição total, que diminui a sua capacidade calorífica e, portanto a eficiência do sistema de aproveitamento.

4.1.4. Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

A energia elétrica gerada pela PAFC e o CO_2 são utilizados respectivamente para abastecer a demanda energética da ETE e o sistema proposto de neutralização de esgoto alcalino. Os detalhes do sistema de neutralização de esgoto alcalino são apresentados a seguir:

- **Reator de neutralização de esgoto (RNEA)**

Uma das atividades das empresas de saneamento ambiental é o tratamento do esgoto proveniente do setor comercial e domiciliar, e em alguns casos do setor industrial. A neutralização do esgoto é um requisito mínimo e necessário tanto para a depuração das águas quanto para os tratamentos posteriores, como por exemplo, tratamentos biológicos.

Segundo SCHWARZLMÜLLER (2001), o RNEA está composto de várias tubulações onde é feita a reação de neutralização. O número de tubulações e o comprimento das mesmas dependem da quantidade de esgoto e da sua alcalinidade. Os outros componentes do RNEA são o sistema de compressão de gás, o dispositivo para separação líquido/gás e o sistema para controle automático de pH. O esquema do RNEA é apresentado na figura 4.13. Para o estudo definiu-se um RNEA de CO_2 dimensionado para $30 \text{ m}^3/\text{h}$ de esgoto e para uma eficiência máxima de neutralização de 23 kg/h de NaOH (100%).

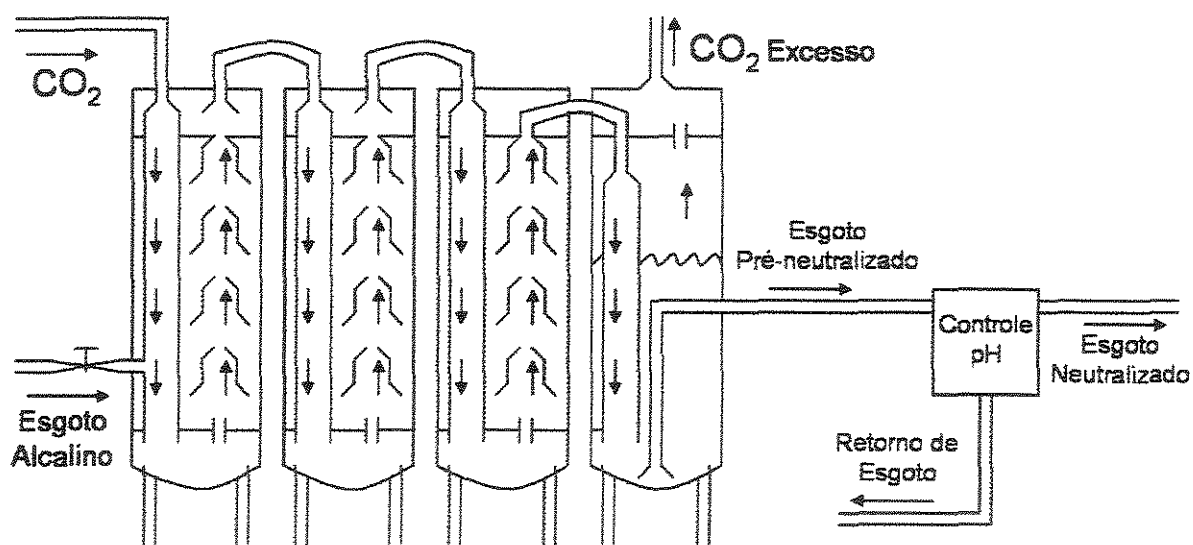


Figura 4.13. Reator de neutralização (SCHWARZLMÜLLER, 2001).

Conforme o mesmo autor, o processo de neutralização é feito quando o CO_2 comprimido é totalmente misturado com o esgoto nas tubulações do reator com ajuda de bocais de injeção de gás pressurizado. Depois de atingir o valor de pH desejado, o esgoto é separado e o CO_2 restante flui para a atmosfera.

A eficiência do processo de neutralização com CO_2 depende, principalmente, de quatro fatores:

- tamanho da superfície de contato entre o CO_2 e o esgoto;
- renovação constante de CO_2 na superfície de contato;
- balanço massa de CO_2 e alcalinidade do esgoto;
- tipo de compostos alcalinos do esgoto.

No caso de aproveitamento do gás de aterro sanitário no Sistema Integrado proposto, há uma outra variável que deve ser levada em consideração:

- a quantidade de CO_2 no fluxo do gás de saída da pilha a combustível.

Finalmente, o Sistema Integrado foi projetado para que futuramente os gases e os lodos gerados nos biodigestores sejam também aproveitados.

Em primeiro lugar, o biogás pode ser misturado ao gás de aterro sanitário obtendo-se as seguintes vantagens:

- aumento da quantidade de gás aproveitável e do potencial de energia elétrica e térmica a serem gerados;
- aumento da concentração de CH_4 levando a um incremento do poder calorífico do gás e da eficiência do sistema de aproveitamento;
- utilização do mesmo sistema de pré-tratamento de gases, como foi apresentado no trabalho de LANGNICKEL (2000);
- diminuição da concentração de todos os compostos a serem removidos aumentando-se a vida útil de todas as camadas de purificação de gás.

Em segundo lugar, encontrou-se uma solução para o problema da disposição final dos lodos gerados no processo de biodigestão da ETE, podendo-os aproveitar como cobertura diária dos resíduos do aterro sanitário. Conforme LEITE et al. (1997), a co-

disposição de lodo de esgoto, contendo 30% ou mais de sólidos, é favorável a redução do tempo de bioestabilização da matéria orgânica e, aumenta a taxa de produção de metano em um limite máximo quando são adicionados 20% de resíduos de lodo de esgoto (agente inoculado) aos resíduos sólidos domiciliares orgânicos (percentagem em massa). Na figura 4.14 apresenta-se o diagrama de fluxo proposto para a ETE Piçarrão do município de Campinas/SP visando a futura utilização dos gases dos biodigestores dentro do sistema de aproveitamento energético e os lodos como material de cobertura dos resíduos no aterro sanitário.

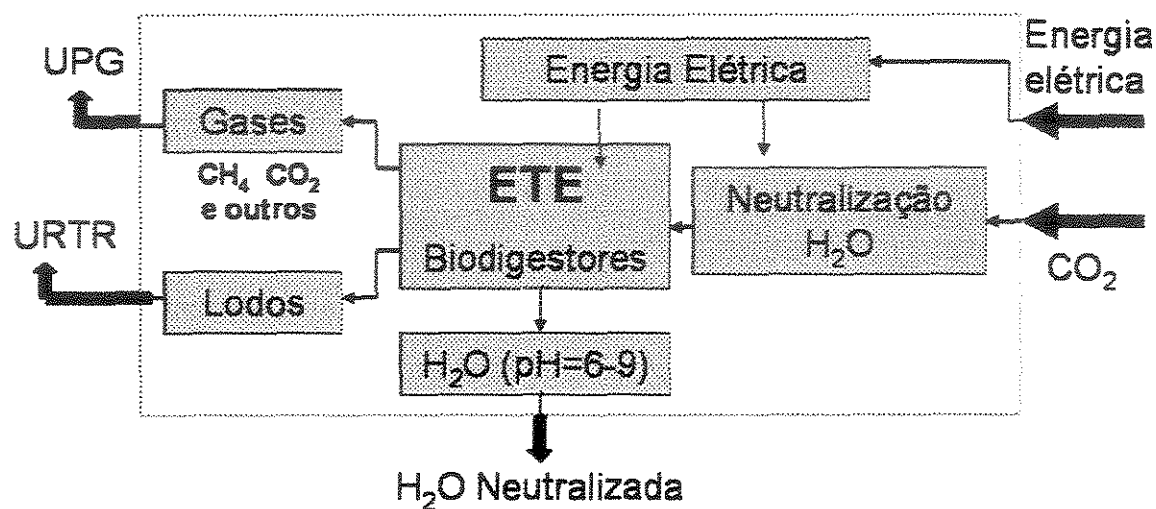


Figura 4.14. Diagrama de fluxo da ETE - Piçarrão.

4.2. Cálculos

Apresenta-se a seguir os cálculos técnicos e econômicos de acordo com as metodologias apresentadas no Capítulo III, incluindo-se a discussão dos resultados.

4.2.1. Cálculos técnicos

O foco dos cálculos técnicos é determinar a dimensão do sistema em termos de produção. Para isto são calculados a quantidade de resíduos depositados no Delta A, o potencial de produção de biogás dos mesmos e a distribuição de poços para captação. Finalmente são apresentados os cálculos do potencial de geração de energia elétrica e térmica e a capacidade total de neutralização de esgoto alcalino.

4.2.1.1. Resíduos depositados na URTR - Delta A

Conforme a CETESB (2001), o município de Campinas produz 666,3 ton/dia de resíduos para uma população de 951.824 habitantes, o que leva a uma média de 0,70 kg/dia de resíduos *per capita*. Esse valor coincide com os valores da Secretaria Estadual de Meio Ambiente, SMA/SP (1993). Segundo CUNHA (2002) é considerando que para o município de Campinas a coleta domiciliar atende 98% da população e são reciclados 20% do total de resíduos sólidos. Substituindo os valores na equação [3.1] tem-se a quantidade de resíduos sólidos que é depositada na URTR - Delta A:

$$Q_R = 951.824 \times 0,70 \times 0,98 \times 0,80 \times 0,001 \times 365$$

$$Q_R = 190.000 \text{ ton/ano (Total de resíduos que recebe a URTR)}$$

Para fazer os cálculos de geração total de gás do aterro sanitário, o valor calculado (Q_R) será considerado como a quantidade média anual de resíduos depositados na URTR - Delta A. A consideração anterior leva em conta que os valores da população, geração de resíduos *per capita*, percentagem de reciclagem e de coleta são variáveis com o tempo. Considerou-se que esses valores são inferiores aos atuais no início de operação do aterro e com tendência a ser superiores na data programada para fechamento do mesmo.

Com o valor calculado de (Q_R) e considerando 9 anos de operação do aterro sanitário tem-se a quantidade total de resíduos sólidos que foram depositados até hoje na URTR - Delta A:

$$Q_{TR} = 190.000 \times 9$$

$$Q_{TR} = 1.710.000 \text{ ton (Total de resíduos depositados no aterro)}$$

De acordo com o cálculo anterior, o valor total de resíduos depositados no aterro (Q_{TR}) é superior à quantidade mínima de resíduos com viabilidade passível de exploração, no aproveitamento energético, estimada pela U.S.EPA (1996) em 1 milhão de toneladas. Além disso, e de acordo com os dados coletados pode-se concluir que a URTR - Delta A apresenta as condições mínimas para geração de gás rico em CH_4 .

Conclui-se que existe a possibilidade de viabilizar economicamente um projeto para aproveitamento energético do gás gerado na URTR - Delta A do município de Campinas/SP, levando em conta que esta avaliação é aplicada quando são utilizados sistemas de geração de energia elétrica convencionais, tais como, motores a combustão interna e turbinas a gás.

4.2.1.2. Cálculo da produção de biogás por métodos teóricos

Análise termodinâmica

Método 1

Para realizar os cálculos termodinâmicos é necessário obter o valor da energia de combustão. No estudo será utilizado o valor médio dos valores encontrados na literatura que apresentam umidade média semelhante aos resíduos estudados.

$$\Delta H_r = (6.500 + 7.100) / 2$$

$$\Delta H_r = 6.800 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo o valor de energia de combustão dos resíduos na equação [3.5], que foi calculado como a média dos valores encontrados na literatura, obtém-se:

$$V_{CH_4} = 0,028 \times 6.800$$

$$V_{CH_4} = 190,4 \text{ L/kg (Litros de } CH_4 \text{ por quilograma de resíduo)}$$

Multiplicando o valor do volume gerado de CH₄ por quilograma de resíduo (V₁), pela quantidade anual de resíduos que recebe a URTR - Delta A tem-se o potencial total de produção de CH₄ ao ano (Q_{CH4}) .

$$Q_{CH4} = 190,4 \text{ L/kg} \times 190.000 \text{ ton/ano} \times 1000 \text{ kg/ton} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}$$

$$Q_{CH4} = 36,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

De acordo com a tabela 4.2. o valor típico de CH₄ presente no gás de aterro sanitário é 50%, assim pode-se calcular o valor total de biogás produzido pelo aterro:

$$Q_{T1} = 36,2 \times 10^6 \times 2$$

$$Q_{T1} = 72,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

Método 2

Utilizando a energia de combustão para os componentes individuais do resíduo, a composição dos resíduos da tabela 4.1 e substituindo na equação [3.6] obtem-se:

$$V_{CH4} = 0,028 \times (2.800 \times 0,55 + 13.800 \times 0,21 + 15.000 \times 0,15)$$

$$V_{CH4} = 187,3 \text{ L/kg}$$

Fazendo as mesmas operações do método 1 para calcular (Q_{CH4}) e (Q_T), tem-se:

$$Q_{CH4} = 187,3 \text{ L/kg} \times 190.000 \text{ ton/ano} \times 1000 \text{ kg/ton} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}$$

$$Q_{CH4} = 35,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$Q_{T2} = 35,6 \times 10^6 \times 2$$

$$Q_{T2} = 71,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

Substituindo na equação [3.6], do Método 2, somente os valores dos materiais biodegradáveis, obtem-se:

$$V_{CH4} = 0,028 \times (2.800 \times 0,55 + 13.800 \times 0,21 + 13.800 \times 0,01 + 15.000 \times 0,05)$$

$$V_{CH4} = 149,1 \text{ L/kg}$$

$$Q_{CH4} = 149,1 \text{ L/kg} \times 190.000 \text{ ton/ano} \times 1000 \text{ kg/ton} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}$$

$$Q_{CH4} = 28,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$Q_{T3} = 28,3 \times 10^6 \times 2$$

$$Q_{T3} = 56,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

Note-se que o resultado obtido, de produção de biogás ao ano (Q_{T3}), pela variação no Método 2, provavelmente é uma melhor aproximação à realidade, devido ao fato de que nesse cálculo somente é levado em conta as energias de combustão dos produtos biodegradáveis, enquanto que pelo Método 1, a energia de combustão total dos resíduos sólidos está influenciada pela elevada energia de combustão dos plásticos e outros materiais que são considerados não biodegradáveis ou lentamente biodegradáveis.

Análise química

Para realizar a análise química é necessário determinar o carbono biodegradável (C_1) presente no resíduo, por meio da equação [3.8] e dos valores apresentados na tabela 4.1. Também deve ser calculada a fração de carbono no material orgânico combustível seco (C_k), por meio da equação [3.9] e dos valores de cinzas apresentados na tabela 4.1. Os cálculos são apresentados a seguir:

$$\text{Cinzas} = 5,0 + 6,0 + 2,5 + 1,5$$

$$\text{Cinzas} = 15 \%$$

Substituindo esse valor na equação [3.9], obtem-se:

$$C_k = (100\% - 15\%) / 2,08$$

$$C_k = 40,9 \%$$

$$C_2 = 16,50 + 19,74 + 4,50 + 0,88$$

$$C_2 = 41,6 \%$$

$$B_1 = 55,0 + 21,0 + 5,0 + 1,1$$

$$B_1 = 82,1 \%$$

$$B_2 = 55,0 + 21,0 + 5,0 + 1,1 + 8,9$$

$$B_2 = 91,0 \%$$

Substituindo os valores anteriores na equação [3.8], obtem-se:

$$C_1 = 0,409 \times 0,416 \times (0,821 / 0,910)$$

$$C_1 = 15,4 \%$$

Substituindo o valor de carbono biodegradável (C_1) na equação [3.7], obtem-se:

$$V_{\text{Total}} = 1.868 \times 0,154$$

$$V_{\text{Total}} = 287,7 \text{ L/kg (Litros de biogás total por quilograma de resíduo)}$$

Multiplicando o valor do volume gerado de biogás por quilograma de resíduo (V_{Total}), pela quantidade anual de resíduos que recebe a URTR - Delta A tem-se o potencial total de produção ao ano (Q_T).

$$Q_T = 287,7 \text{ L/kg} \times 190.000 \text{ ton/ano} \times 1000 \text{ kg/ton} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}$$

$$Q_{T4} = 54,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

Note-se que o valor (Q_{T4}) é muito próximo ao valor calculado (Q_{T3}) obtido pela análise termodinâmica com a variação do método 2, já que na análise química também são levados em conta somente os materiais biodegradáveis. Comparando os valores (V_{CH_4}) obtidos pelos Métodos Termodinâmicos 1 e 2, com o valor (V_{Total}) obtido pela análise química, pode ser confirmado que a composição de CH_4 pode estar entre 50 e 65%, sendo que esses valores concordam com os dados da literatura. De acordo com os resultados anteriores pode ser calculado que a composição média de CH_4 da URTR Delta é de 59%.

Cinética de reação

Substituindo o valor de carbono biodegradável (C_1) e o valor de temperatura anual do município de Campinas, $T = 21,7^\circ\text{C}$, na equação [3.12], e assumindo que desde o início em 1996, o tempo total de produção de gás no Delta A é $t = 30$ anos, obtém-se:

$$V_{Total} = 1.868 \times 0,154 \times (0,014 \times 21,7 + 0,28) (1 - e^{-0,07 \times 30})$$

$$V_{Total} = 147,8 \text{ L/kg (Litros de biogás total por quilograma de resíduo)}$$

Também pode ser obtida a faixa de eficiência de biodegradação a partir dos valores médios de temperatura inferior e superior para o inverno e o verão respectivamente, do município de Campinas obtidos da figura 4.5.

$$Ef_{inf} = (0,014 \times 17,9 + 0,28) (1 - e^{-0,07 \times 30}) = 46,6$$

$$Ef_{sup} = (0,014 \times 25,1 + 0,28) (1 - e^{-0,07 \times 30}) = 55,4$$

O volume de gás total produzido (V_{Total}), levando em conta a cinética de reação, corresponde a 51,2% do valor obtido pela análise química, sendo o valor mais aproximado à produção real de gás na URTR, já que além de ser calculado com base ao carbono biodegradável, leva em conta os fatores que limitam diretamente a produção de gás.

De acordo com HAMADA (1997), a eficiência de degradação está entre 50 e 75%, pois, nem toda a matéria orgânica biodegradável está disponível para ser decomposta ou as condições de temperatura e umidade não são suficientes para sustentar as atividades biológicas.

Multiplcando o valor do volume de biogás gerado por quilograma de resíduo (V_{Total}), pela quantidade anual de resíduos que recebe a URTR - Delta A tem-se o potencial total de produção ao ano (Q_T).

$$Q_{T5} = 147,8 \text{ L/kg} \times 190.000 \text{ ton/ano} \times 1000 \text{ kg/ton} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ l}$$

$$Q_{T5} = 28,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

4.2.1.3. Cálculo da produção de biogás sob métodos experimentais

Metodologia HAMADA

Utilizando o valor $Q_R = 190.000 \text{ ton/ano}$ de resíduos que recebe a URTR e a tabela 3.1 que apresenta a taxa de geração de gás distribuída ao longo dos anos a partir do início da disposição de uma massa unitária de resíduo sob CNTP, temos os seguintes valores totais apresentados na tabela 4.8 e na figura 4.15:

Tabela 4.8. Volume de gás gerado na URTR - Delta A.

No.	Ano	m ³ /ano	No.	Ano	m ³ /ano	N.	Ano	m ³ /ano
1	1996	0	11	2006	50.920.000	21	2016	6.479.000
2	1997	9.386.000	12	2007	51.243.000	22	2017	3.515.000
3	1998	25.878.000	13	2008	51.490.000	23	2018	2.850.000
4	1999	37.867.000	14	2009	51.661.000	24	2019	2.261.000
5	2000	45.334.000	15	2010	51.775.000	25	2020	1.729.000
6	2001	48.298.000	16	2011	51.813.000	26	2021	1.273.000
7	2002	48.963.000	17	2012	51.813.000	27	2022	893.000
8	2003	49.552.000	18	2013	42.427.000	28	2023	570.000
9	2004	50.084.000	19	2014	25.935.000	29	2024	323.000
10	2005	50.540.000	20	2015	13.946.000	30	2025	152.000
TOTAL								829,0 x 10⁶
Media /ano								27,6 x 10⁶

Da tabela 4.8 o valor de produção total de biogás por ano será de:

$$Q_{T6} = 27,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

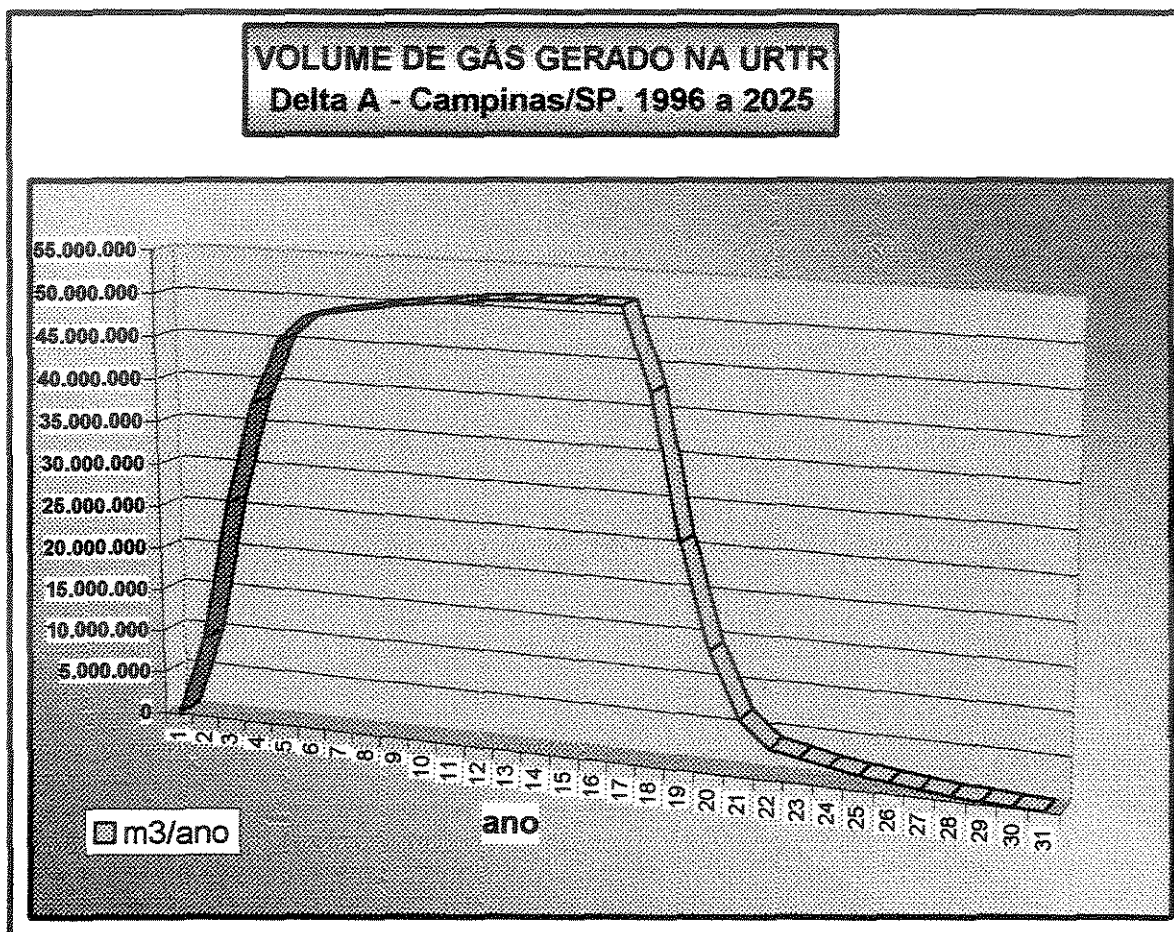


Figura 4.15. Curva de comportamento da geração de gás na URTR - Delta A.

Comparando o valor da geração de (Q_{T5}) com (Q_{T6}), podemos dizer que são muito próximos (diferença menor que 2%) e que em ambas metodologias de cálculo são levados em conta o material orgânico biodegradável e a eficiência da biodegradação.

Fazendo uma média entre o valor teórico e o valor experimental, tem-se a quantidade de biogás total produzido no aterro sanitário:

$$Q_{TOTAL} = (28,1 + 27,6) \times 10^6 / 2$$

$$Q_{TOTAL} = 27,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

Metodologia U.S. EPA

Substituindo o valor de Q_R na equação [3.15] obtem-se:

$$Q_T = 400 \times 190.000$$

$$Q_{T7} = 76,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \text{ (Total de biogás produzido)}$$

Comparando o valor de (Q_{T7}) com o valor (Q_{T1}) é observado que são valores muito próximos e de acordo com as discussões feitas anteriormente pode-se concluir que esta metodologia experimental não leva em conta a quantidade de material orgânico biodegradável e a eficiência da biodegradação. De acordo com U.S. EPA (1992) uma típica taxa de produção de gás por quilograma de resíduo sólido úmido (60-80% de umidade) é de aproximadamente 20 a 50 mL/kg/h. Calculando a geração de gás do aterro Delta A baseados nesses valores, obtém-se um total aproximado entre $35,0 \times 10^6$ e $85,0 \times 10^6$ m³/ano. Pode-se inferir que o valor $Q_{TOTAL} = 27,9 \times 10^6$ está associado a uma umidade próxima de 50% para o aterro sanitário Delta A. Na figura 4.16 pode ser visualizado o possível efeito da umidade sobre o comportamento de geração de gás.

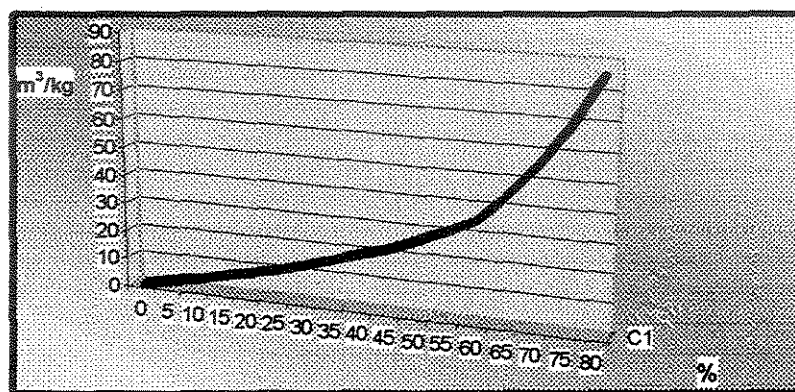


Figura 4.16. Efeito da umidade dos resíduos na geração de gás do aterro.

4.2.1.4. Projeto da distribuição de poços

Para o cálculo do raio de influência de cada poço foi adotado o valor de velocidade de extração de 5,60 m³/h por metro de profundidade (KARSITIS, 1981). Assumindo que a profundidade média do aterro sanitário Delta A é de 10 metros obtém-se:

$$Q_{\text{Pteórico}} = 5,60 \times 10 \times 24 \times 365$$

$$Q_{\text{Pteórico}} = 490.560 \text{ m}^3/\text{ano (Produção de biogás para cada poço)}$$

Assumindo uma eficiência de captação dos gases de 60% e substituindo o valor de Q_{TOTAL} e o valor da área total do aterro sanitário Delta A na equação [3.17], obtém-se:

$$R = (0,3183 A Q_P / Q_{TOTAL})^{1/2}$$

$$R = ((0,3183 \times 600.000 \times 0,49 \times 10^6) / (27,9 \times 10^6 \times 0,6))^{1/2}$$

$$R = 74,8 \text{ m (Raio de influência de cada poço)}$$

Substituindo o raio nas equações [3.18] e [3.19] obtém-se:

$$X = (3)^{1/2} \times 74,8$$

$$X = 129,6 \text{ m (Distância entre dois poços consecutivos em uma mesma fileira)}$$

$$Y = (7/4) \times 74,8$$

$$Y = 130,9 \text{ m (Distância entre fileiras)}$$

Assumindo que a superfície da URTR - Delta A corresponde a um quadrado, pode-se calcular o número de poços necessários para a extração da totalidade do gás assim:

$$L^2 = 600.000$$

$$L = (600.000)^{1/2}$$

$$L = 774,6 \text{ m}$$

$$\text{No. Poços} = (774,6/129,6) \times (774,6/130,9)$$

$$\text{No. Poços} = 36 \text{ (Número total de poços para captação total do gás)}$$

A produção de gás real para cada poço pode ser calculada a partir do valor total real de biogás produzido (Q_{TOTAL}) e o No. de poços. Assumindo que a capacidade de captação do gás é de 60% e a profundidade de cada poço é de 10 metros obtém-se:

$$Q_P = (27,9 \times 10^6 \times 0,60) / (36 \times 10 \times 24 \times 365)$$

$$Q_P = 5,3 \text{ m}^3/\text{h (por metro de profundidade de cada poço)}$$

Pode-se concluir que o valor calculado de produção de biogás para cada poço é muito próximo ao valor médio ótimo de velocidade de extração de $5,6 \text{ m}^3/\text{h}$ por metro de profundidade de cada poço determinado em estudos realizados nos EUA (KARSIOTIS, 1981). Tal valor foi projetado para atingir a produção de biogás máxima possível, de modo contínuo e com uma composição elevada e constante de metano. O nível ótimo de produção leva em conta que uma rápida extração pode gerar uma forte pressão negativa que ocasiona a entrada de ar dentro do aterro sanitário, diminuindo a proporção de metano e conseqüentemente sua utilidade. O valor anterior é inferior ao valor máximo permitido de $7,2 \text{ m}^3/\text{h}$ por metro de profundidade, segundo o reporte de STEINFELD e SANDERSON (1998).

4.2.1.5. Cálculo da produção de energia elétrica e térmica

- **Moto-gerador**

Para converter o valor de (Q_{TOTAL}) a (m^3/h) e assumindo que a capacidade de captação do gás é de 60% obtém-se:

$$Q_{TOTAL} = 27,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano} \times (1\text{ano}/365\text{dias}) \times (1\text{dia}/24\text{h}) \times 0,6$$

$$Q_{TOTAL} = 1.911 \text{ m}^3/\text{h}$$

Substituindo os valores na equação [3.20], tem-se a capacidade de potência a ser instalada na URTR quando é usando moto-gerador de 0,5 MW.

$$P = (1.911 / 335) \times 0,5$$

$$P = 2,85 \text{ MW}_e \text{ (Total Potência Instalada)}$$

Utilizando os equivalentes caloríficos do biogás, apresentados na revisão bibliográfica obtém-se:

$$P_{real} = 1.911 \times (0,001 \text{ MWh} / 1,2 \text{ m}^3 \text{ biogás } 60\% \text{ CH}_4)$$

$$P_{real} = 1,59 \text{ MW}_e \text{ (Total Potência Real)}$$

A diferença entre os valores de potência pode ser explicada, devido que a eficiência média de um moto-gerador é de 20% quando o combustível é biogás, porém conforme o trabalho de ALVES (2000), atualmente, os fornecedores desses sistemas garantem uma faixa de eficiência entre 30 e 35%.

De acordo com os cálculos e as explicações referidas anteriormente, pode ser concluído que a faixa de potência, utilizando um moto-gerador para aproveitamento do biogás gerado na URTR - Delta A do município de Campinas, está entre 1,59 e 2,85 MW, dependendo da tecnologia utilizada e da composição dos gases.

Utilizando a tecnologia de moto-gerador existe também a possibilidade de aproveitamento da energia térmica proveniente do sistema de resfriamento, porém não é um sistema muito utilizado pela baixa capacidade de recuperação que na maioria dos casos não torna viável o investimento adicional.

- **Pilha a Combustível**

Para poder comparar os resultados obtidos utilizando um moto-gerador com os resultados da PAFC, os cálculos serão feitos utilizando os valores teóricos de consumo e de geração de energia das pilhas. Assim, com o valor calculado de (Q_{TOTAL}), e substituindo os valores teóricos da pilha na equação [3.20] obtem-se:

$$P = (1.911 / 117,9) \times 0,200$$

$$\mathbf{P = 3,24 MW_e (Total Potência Instalada)}$$

Conhecendo que a percentagem calculada de CH_4 do biogás da URTR - Delta A (59%) é muito próxima à do aterro sanitário de Gronton EUA (57%), assumimos que a potência real da pilha a combustível é de 165 kW e que o consumo real de biogás é de $135 \text{ m}^3/\text{h}$, e substituindo na equação obtem-se:

$$P_{\text{real exp.}} = (1.911 / 135,6) \times 0,165$$

$$\mathbf{P_{\text{real exp.}} = 2,32 MW_e (Total Potência Real Experimental)}$$

De acordo com os cálculos e os valores apresentados anteriormente pode ser concluído que a faixa de potência, utilizando uma PAFC para aproveitamento do biogás gerado na URTR - Delta A do município de Campinas, está entre 2,32 e 3,24 MW, dependendo da composição dos gases.

Comparando os valores de potência obtidos tanto para moto-gerador quanto para PAFC tem-se que é maior a produção de energia elétrica quando utilizada a PAFC, sendo que a diferença de aumento na geração de energia está entre 15 e 45%, dependendo da eficiência do moto-gerador, que pode estar na faixa entre 20 e 35%. Também pode ser observado que a potência real experimental será atingida utilizando um total de 14 PAFC, sendo um número muito elevado devido ao custo de cada pilha.

Segundo SPIEGEL et al. (1999) a recuperação de calor projetada é de 208.000 kcal/h de água a 60°C , equivalentes a 240 kW_{th} . O potencial total de energia térmica pode ser calculado assim:

$$P_{\text{térmico}} = 208.000 \times 14$$

$$\mathbf{P_{\text{térmico}} = 2,91 \times 10^6 \text{ kcal/h (Equivalentes a } 3,36 \text{ MW}_{th})}$$

Atualmente, existe a possibilidade de utilizar PAFC de maior potência e futuramente poderão ser utilizadas outros tipos de pilhas a combustível que ainda não estão disponíveis comercialmente, tais como Carbonato Fundido (MCFC) e de Óxido Sólido (SOFC) que, além de apresentarem maior potência por unidade, apresentam menor sensibilidade aos contaminantes do biogás e utilizam o CO₂ no processo de reforma ou como combustível.

Conforme TREVISAN (2004), tem início agora uma nova etapa nesse processo, que se refere à ascensão das MCFC's como produtos comerciais, o que constitui a chamada segunda geração de pilhas a combustível. A entrada no mercado de plantas de MCFC empregando o gás natural como combustível está prevista para o ano de 2005 (LINARDI, 2004).

Essas novas pilhas apresentam uma temperatura de operação mais elevada que as PAFC, permitindo que se alcance maiores eficiências elétricas e térmicas. O aumento da eficiência térmica se dá pela geração de vapor para cogeração de energia, pelas aplicações de ciclo combinado e benefícios na reforma do combustível. Adicionalmente, esses sistemas toleram constituintes do gás reformado, como o monóxido de carbono, por exemplo, que no caso das PAFC é prejudicial para a pilha, pois provoca o envenenamento do catalisador.

Inicialmente, as plantas terão capacidade entre 500 KW e 3 MW, chegando a atingir valores entre 20 e 100 MW com o decorrer dos anos. A diversificação do combustível empregado nessas pilhas também requererá atenção especial das empresas para um futuro breve.

De acordo com TREVISAN (2004), para o ano de 2010 está previsto a entrada no mercado de sistemas híbridos que integrem pilhas a combustível e turbinas a gás. Estes sistemas, sendo empregados em geração estacionária de energia, apresentam potencial para que sejam atingidas eficiências acima de 80 %. Outra vantagem seria a redução das emissões de óxido de nitrogênio e monóxido de carbono abaixo de 2 ppm.

Em um sistema híbrido de pilha a combustível e turbina a gás, a energia térmica liberada pela pilha, juntamente com o combustível residual egresso do ânodo ou

cátodo alimentam uma turbina a gás, que por sua vez, produz eletricidade adicional para o sistema. As turbinas a gás desempenham esse papel com maior eficiência de conversão e menor custo, quando comparadas com as turbinas a vapor.

Estão previstos inicialmente sistemas híbridos de capacidade variando entre 1 a 10 MW, com eficiências de pelo menos 70 % na conversão de combustível fóssil em eletricidade de corrente alternada, tomando-se como base o poder calorífico inferior do combustível. Os custos de produção de eletricidade devem ser da ordem de 10 a 20 % menores que os obtidos pelas plantas atuais. Pilhas de temperatura elevada como as MCFC e as SOFC são ideais para operar em sistema híbridos.

Em um futuro um pouco mais distante, por volta do ano de 2015, está prevista a entrada no mercado das chamadas “21th Century Fuel Cell” ou pilhas a combustível do século 21, traduzindo-se do inglês. Esta pilha, na qual se pretende empregar diversas camadas de material cerâmico como eletrólito, representará um grande avanço em relação às atuais pilhas, tanto em termos de redução de custos quanto na melhoria da eficiência. Fatores como a seleção de materiais, integração do projeto e rápida fabricação são considerados juntamente com objetivos pré-estabelecidos de custo e eficiência. Na figura 4.17 apresenta-se a perspectiva de aumento da eficiência das plantas de pilhas a combustível com o decorrer dos anos e a disponibilidade de novos modelos de pilhas.

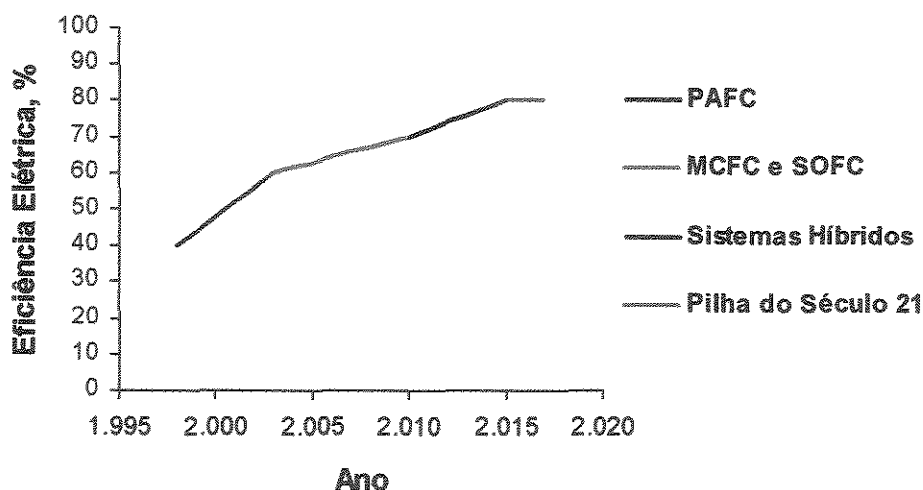


Figura 4.17. Evolução da eficiência das pilhas a combustível (TREVISAN,2004)

4.2.1.6. Capacidade de neutralização de esgoto alcalino

De acordo com as reações [3.21], [3.22], [3.23] e [3.24], assumindo que quantidade de NaOH a neutralizar é de 600.000 kg/ano e substituindo as massas moleculares dos reagentes tem-se para o caso de neutralização com HCl que:

$$Q_{\text{HCl}} = (600.000 \times 36,5) / 40,0$$

$$Q_{\text{HCl}} = 547.500 \text{ kg/ano (HCl 100\%)}$$

Comercialmente para este tipo de aplicações o HCl é fornecido em uma concentração de 30% em massa o qual aumenta o consumo para:

$$Q_{\text{HCL}} = 1.825.000 \text{ kg/ano (HCl 30\%)}$$

Para o caso de neutralização com H_2SO_4 obtem-se:

$$Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = (600.000 \times 98,0) / (2 \times 40,0)$$

$$Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 735.000 \text{ kg/ano (H}_2\text{SO}_4 \text{ 100\%)}$$

Comercialmente para este tipo de aplicações o H_2SO_4 é fornecido em uma concentração de 96% em massa o qual aumenta o consumo para:

$$Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 765.625 \text{ kg/ano (H}_2\text{SO}_4 \text{ 96\%)}$$

Para o caso de neutralização com CO_2 obtem-se:

$$Q_{\text{CO}_2} = (600.000 \times 44,0) / (2 \times 40,0)$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 330.000 \text{ kg/ano (CO}_2 \text{ 100\% Primeira reação)}$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = (600.000 \times 106,0) / (2 \times 40,0)$$

$$Q_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 795.000 \text{ kg/ano (Primeira reação)}$$

$$Q_{\text{CO}_2} = (795.000 \times 44,0) / 106,0$$

$$Q_{\text{CO}_2} = 330.000 \text{ kg/ano (CO}_2 \text{ 100\% Segunda reação)}$$

Somando as quantidades necessárias de CO₂ para a primeira e segunda reação obtém-se:

$$Q_{CO_2} = 660.000 \text{ kg/ano (CO}_2 \text{ 100\%)}$$

A produção total de CO₂ do aterro sanitário pode ser calculada, utilizando o valor médio da composição de 45% da tabela 4.2, o valor total de produção de biogás de $27,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e assumindo 60% de captação dos gases do aterro sanitário, tem-se que:

$$Q_{CO_2} = 27,9 \times 10^6 \times 0,60 \times 0,45$$

$$Q_{CO_2} = 7,53 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano (Total m}^3 \text{ por ano de CO}_2\text{)}$$

Conhecendo que a densidade do CO₂ é de 1,8868 m³/kg (1,013 bar e 15°C), tem-se que:

$$Q_{CO_2} = 7,53 \times 10^6 / 1,8868$$

$$Q_{CO_2} = 3.990.000 \text{ kg/ano (Total kg por ano de CO}_2\text{)}$$

Voltando à consideração inicial, pode-se calcular a capacidade total anual de neutralização de NaOH, assim:

$$Cap_{Neutralização} = (3.990.000 \times 600.000) / 660.000$$

$$Cap_{Neutralização} = 3.627.270 \text{ kg NaOH/ano}$$

4.2.2. Cálculos econômicos

O foco dos cálculos econômicos é determinar os custos preliminares do sistema e fazer uma avaliação da viabilidade econômica do mesmo, para instalação de uma PAFC.

4.2.2.1. Estimativa de custo do projeto

Metodologia ERC/DOE

Custos do sistema de captação e transporte de gases

Assumindo uma profundidade média do aterro sanitário Delta A de 10 m, uma eficiência de captação dos gases de 60% e substituindo o valor de Q_{TOTAL} nas equações [3.25], [3.26] e [3.27] respectivamente, obtém-se:

Custo dos poços para extração dos gases

$$C_{Poços} = 28,5 \times 10^6 \times 0,6 / 243$$

$$C_{Poços} = \text{US\$ } 70.370$$

Custo da interconexão dos poços e transporte dos gases

$$C_{Tubos} = (28,5 \times 10^6 \times 0,6) / (15 \times 10)$$

$$C_{Tubos} = \text{US\$ } 114.000$$

Bombas para extração dos gases e sistema de coleta do condensado

$$C_{Bombas} = 3,78 (28,5 \times 10^6 \times 0,6)^{0,6}$$

$$C_{Bombas} = \text{US\$ } 82.660$$

Custo de capital fixo, sistema de captação/transporte de gases

$$CAP_{fixo} = 70.370 + 114.000 + 82.660$$

$$CAP_{fixo} = 267.030 / 14$$

Assumindo que o capital fixo total pode ser distribuído em parcelas iguais para cada unidade de PAFC, tem-se que:

$$CAP_{fixo} = 267.030 / 14$$

$$CAP_{fixo} = \text{US\$ } 19.075$$

Custos operacionais do sistema de coleta de gases

$$C_{Op.Capt.Trans} = 267.030 \times 0.5$$

$$C_{Op.Coleta} = \text{US\$ } 133.515$$

Assumindo que o custo de operação é igual para cada unidade de PAFC, tem-se que:

$$C_{Op.Coleta} = 133.515 / 14$$

$$C_{Op.Coleta} = \text{US\$ } 9.540$$

Custos da UPG

Os aspectos levados em conta no trabalho de STEINFELD e SANDERSON (1998) para o cálculo do custo da UPG de US\$ 1.140.604, são similares com os aspectos levados em conta no livro de COULSON e RICHARDSON (1983) para cálculo do Custo Total da Instalação (PPC).

Assumindo que o PPC total pode ser distribuído em parcelas iguais para cada unidade de PAFC, tem-se que:

$$PPC = 1.140.604 / 14$$

$$PPC = \text{US\$ } 81.470$$

Custos operacionais da UPG

Segundo STEINFELD e SANDERSON (1998), o custo operacional é de US\$ 22.850. Na tabela 4.9 apresenta-se o detalhe do referido custo.

Assumindo que o custo de operação é igual para cada unidade de PAFC, tem-se que:

$$C_{Op.UPG} = 22.850 / 14$$

$$C_{Op.UPG} = 1.630$$

Tabela 4.9. Custos dos catalisadores e absorvedores da UPG.

Material	Categoria	Frequência de substituição (mês)	Custo Anual (US\$)
<i>Sulfatreat</i>	Material (Mão-de-obra)	9	2.272 (2.560)
Catalisador para hidrogenação	Material (Mão-de-obra)	60	1960 (384)
Guarda de cloro	Material (Mão-de-obra)	24	2.250 (960)
Oxido de zinco	Material (Mão-de-obra)	24	3.600 (2.160)
Catalisador para reforma	Material (Mão-de-obra)	24	3.600 (2.160)
Catalisador para processo <i>shift</i>	Material (Mão-de-obra)	60	560 (384)
Total Material			14.242
Total Mão-de-obra			(8.608)
Custo total operacional			22.850

Fonte: STEINFELD e SANDERSON (1998).

Sensibilidade do custo de capital da UPG

Substituindo os valores máximo e mínimo do custo da eletricidade e do poder calorífico do gás de aterro sanitário da tabela 4.3 na equação [3.28] e assumindo que as concentrações dos principais contaminantes do aterro de Anoka EUA são similares com a URTR - Delta A e pode ser obtida a faixa de variação do custo de capital da UPG.

A tarifa da eletricidade em Janeiro de 2004 da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL Paulista) foi 111 R\$/MWh (Tarifa A₄) e 305 R\$/MWh (Tarifa residencial) e o valor do dólar foi de US\$ 1,00 = R\$2,90.

$$C_{UPG} = \frac{[320,9 + 1,863 \times 0,0383 + (0,543 \times 40.000 + 2,064 \times 7.000 + 1,776 \times 9.000) / 1000]}{600}$$

$$C_{\text{mínimoUPG}} = \text{US\$ } 740.675$$

$$C_{UPG} = \frac{[320,9 + 1,863 \times 0,1052 + (0,543 \times 40.000 + 2,064 \times 7.000 + 1,776 \times 9.000) / 1000]}{350}$$

$$C_{\text{máximoUPG}} = \text{US\$ } 1.625.830$$

Custos da PAFC

Conforme a tabela 3.2 do trabalho de TREVISAN (2004) o custo de capital total da PAFC, levando em conta que US\$ 1,00 = R\$ 2,90 em Janeiro de 2004, é:

$$C_{PAFC} = \text{US\$ } 1.290.420$$

Custos operacionais da PAFC

Conforme TREVISAN (2004) os custos operacionais são:

$$\text{Vistoria anual} = \text{US \$ } 12.400/\text{ano}$$

$$\text{Troca Peças} = (171.800 \text{ (6o ano)} + 96.300 \text{ (13o ano)} - 9.700) / 20 \text{ anos}$$

$$\text{Troca de Peças} = \text{US\$ } 12.920/\text{ano}$$

$$C_{Op.PAFC} = 12.400 + 12.920$$

$$C_{Op.PAFC} = \text{US\$ } 25.320$$

Estimativa teórica**Investimento total no sistema de captação e transporte de gases****Capital fixo**

De acordo com os cálculos feitos com a Metodologia ERC/DOE tem-se que o capital fixo total (CAP_{fixo}) do sistema de captação e transporte de gases é de US\$ 19.075.

Capital Circulante

Assumindo que o processo em estudo não é um processo complexo de produção tem-se que o capital circulante corresponde a um 10% do Capital Fixo. Fazendo o cálculo obtem-se:

$$CAP_{circulante} = 19.075 \times 0,10$$

$$CAP_{circulante} = \text{US\$ } 1.910$$

Investimento total necessário

Substituindo CAP_{fixo} e $CAP_{circulante}$ na equação [3.30] obtem-se:

$$INV_{total} = 19.075 + 1.910$$

$$INV_{total} = \text{US\$ } 20.985$$

Investimento total na UPG**Capital fixo**

De acordo com os cálculos feitos com a Metodologia ERC/DOE tem-se que o custo total da instalação (PPC) da UPG é de US\$ 1.140.604. Substituindo esse valor na equação de capital fixo e utilizando o fator de custo indireto para um processo de fluidos de 1,45 da tabela 3.4, obtem-se:

$$CAP_{\text{fixo}} = 81.470 \times (1,45)$$

$$CAP_{\text{fixo}} = \text{US\$ } 118.130$$

Capital circulante

$$CAP_{\text{circulante}} = 1.653.875 \times 0,10$$

$$CAP_{\text{circulante}} = \text{US\$ } 11.810$$

Investimento total necessário

Substituindo CAP_{fixo} e $CAP_{\text{circulante}}$ na equação [3.30] obtem-se:

$$INV_{\text{total}} = 1.653.875 + 165.390$$

$$INV_{\text{total}} = \text{US\$ } 129.940$$

Investimento total na PAFC**Capital fixo**

Conforme TREVISAN (2004), o custo total da instalação (PPC) da PAFC é de US\$ 950.000, (Custo de US\$ 850.000 do equipamento e US\$ 100.000 da instalação). Substituindo esse valor na equação de capital fixo e com um fator de custo indireto de 1,45, obtem-se:

$$CAP_{\text{fixo}} = 950.000 \times (1,45)$$

$$CAP_{\text{fixo}} = \text{US\$ } 1.377.500$$

Capital circulante

$$CAP_{\text{circulante}} = 1.377.500 \times 0,10$$

$$CAP_{\text{circulante}} = \text{US\$ } 137.750$$

Investimento total necessário

Substituindo CAP_{fixo} e $CAP_{\text{circulante}}$ na equação [3.30] obtem-se:

$$INV_{\text{total}} = 1.377.500 + 137.750$$

$$INV_{\text{total}} = \text{US\$ } 1.515.250$$

Custos totais de operação do Sistema Integrado

De acordo com a tabela 3.4 tem-se o custo total de operação apresentado na tabela 4.10.

Tabela 4.10. Custos totais de operação do Sistema Integrado.

CUSTOS	Máximo (US\$)	Mínimo (US\$)
Custos variáveis (A)		
1. Matérias primas	~ 0	~ 0
2. Materiais diversos	$10\% \times 39.040 = 3.900$	$10\% \times 28.920 = 2.890$
3. Água, eletric., gás	~ 0	~ 0
4. Embalagem	~ 0	~ 0
Custos fixos (B)		
5. Manutenção	$10\% \times (19.075 + 118.130) + 25.320 =$ 39.040 **	$5\% \times (19.075 + 52.905) + 25.320 =$ 28.920 **
6. Mão-de-obra	$15\% \times (9.540 + 1.630 + 25.320) =$ 5.475	$10\% \times (9.540 + 1.630 + 22.850) =$ 3.400
7. Supervisão	$20\% \times 5.475 = 1.095$	$20\% \times 3.400 = 680$
8. Encargos gerais fab.	$50\% \times 5.475 = 2.740$	$50\% \times 3.400 = 1.700$
9. Encargos de capital	~ 0 *	~ 0 *
10. Seguro	$1\% \times 1.514.700 = 15.150$	$1\% \times 1.449.480 = 14.495$
11. Impostos	$2\% \times 1.514.700 = 30.300$	$2\% \times 1.449.480 = 28.990$
12. Patentes	$1\% \times 1.514.700 = 15.150$	$1\% \times 1.449.480 = 14.495$
Custos Diretos	112.850	95.570
Custos Indiretos (C)		
13. Despesas com vendas	$30\% \times 112.850 =$ 33.855	$20\% \times 95.570 =$ 19.115
14. Encargos gerais		
15. Pesquisa		
Custo anual de produção (CAP)	146.705	114.685
Custo de produção / kW _e	$146.705 / (165 \times 24 \times 365) =$ 0,102 US\$/kW_eh	$114.685 / (165 \times 24 \times 365) =$ 0,079 US\$/kW_eh

* Pagamento a vista

** Para o cálculo do custo anual de manutenção desconsidera-se o custo fixo das PAFC. Isto devido que as PAFC apresentam um valor pré-estabelecido para este item.

4.2.2.2. Avaliação econômica

Investimento necessário para projetar a instalação

Conforme COULSON e RICHARDSON (1983) a estimativa preliminar tem um custo de 0,1 % sobre o capital fixo total, que para o caso de estudo seria de US\$1.515 sendo que este valor será desconsiderado devido ao fato de que os cálculos feitos neste trabalho são equivalentes a uma estimativa preliminar.

De acordo com os mesmos autores uma estimativa pormenorizada teria um custo de 2% sobre o capital fixo total, que para o caso seria:

$$\text{Projeção} = 1.514.705 \times 0,02$$

$$\text{Projeção} = \text{US\$ } 30.300$$

Investimento total da instalação e custos operacionais

Para calcular o custo do projeto utilizou-se a metodologia ERC/DOE e efetuou-se também uma estimativa teórica preliminar para comparação. Na tabela 4.11 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos para o investimento total e na tabela 4.12 para os custos operacionais totais.

Tabela 4.11. Estimativa preliminar de investimento total.

INVESTIMENTO TOTAL						
Sistema	Método ERC/DOE		Estimativa Teórica			
	Capital		Capital fixo total		Investimento total	
	(US\$)	(US\$/kW _e instalado)	(US\$)	(US\$/kW _e instalado)	(US\$)	(US\$/kW _e instalado)
Coleta	19.075	115	19.075	115	20.985	125
UPG	81.470 **	495	118.130	715	129.940	790
PAFC	1.290.420	7.820	1.377.500	8.350	1.515.250	9.190
Total	1.390.965	8.430	1.514.705	9.180	1.666.175	10.105

** Capital Máximo = US\$ 116.130 e Capital Mínimo = US\$ 52.900

Tabela 4.12. Estimativa preliminar de custos operacionais totais.

CUSTO TOTAL DE OPERAÇÃO						
Sistema	Método ERC/DOE		Estimativa Teórica			
	Custo MO/Manutenção/Peças		Custo MO/Manutenção/Peças		Custo total de operação	
	(US\$)	(US\$/kW _e h produzido)	(US\$)	(US\$/kW _e h produzido)	(US\$)	(US\$/kW _e h produzido)
Coleta	9.540	0,007	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
UPG	1.630	0,001	48.415	0,033	146.705	0,102
PAFC	25.320	0,017	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo
Total	36.490	0,025	35.210	0,024	114.685	0,079

Incentivos

Por meio do programa de “Créditos de Carbono” a Holanda paga €\$ 3,00 por tonelada de CO₂. O incentivo pode ser calculado com os valores de Q_{TOTAL} = 27,9x10⁶ m³/ano e a composição de CH₄ = 59%. Também é necessário levar em consideração que a eficiência teórica de coleta de gases é de 60% e que o gás captado será aproveitado para fins energéticos ou, em último caso, queimado. De acordo com os valores anteriores tem-se que:

$$\text{Incentivo} = (27,9 \times 10^6 \times 0,60 \times 0,59 \times (1/1.886,8^*) \times 3 \times 1,28^{**}) / (165 \times 24 \times 365)$$

$$\text{Incentivo} = 0,014 \text{ US$/kW}_e\text{h}$$

* Densidade do CO₂ = 1.886,8 m³/ton (1,013 bar e 15°C)

** (€\$1,00 = US\$1,22 Janeiro de 2004)

Renda

De acordo com os valores dos custos operacionais e levando em conta o incentivo pode-se calcular o custo final de operação:

$$C_{\text{Op. Tot. Max.}} = 0,102 - 0,014$$

$$C_{\text{Op. Tot. Max.}} = 0,088 \text{ US$/kW}_e\text{h}$$

$$C_{\text{Op. Tot. Min.}} = 0,079 - 0,014$$

$$C_{\text{Op. Tot. Min.}} = 0,065 \text{ US$/kW}_e\text{h}$$

As tarifas da eletricidade em Janeiro de 2004 da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL Paulista) foram de 111 R\$/MWh (Tarifa A₄) e de 305 R\$/MWh (Tarifa residencial) e o valor do dólar foi de US\$ 1,00 = R\$2,90. De acordo com os referidos valores pode-se calcular a tarifa em dólares da energia elétrica que para o caso da avaliação econômica será considerado o preço de venda:

$$\text{Tarifa A}_4 = 0,038 \text{ US\$/kW}_e\text{h}$$

$$\text{Tarifa Residencial} = 0,105 \text{ US\$/kW}_e\text{h}$$

Comparando os valores de custo total de operação com os preços de venda (Tarifas) da energia elétrica, pode-se concluir que com a tarifa industrial A₄ não se teria renda na operação do sistema tornando o projeto inviável. Já com a tarifa residencial e levando em conta que a potencia real experimental é de 2,32 MW_e, a operação do sistema apresentaria a seguinte renda:

$$\text{Renda}_{\text{Max.}} = (0,105 - 0,065) 2,32 \times 1000 \times 24 \times 365$$

$$\text{Renda}_{\text{Max.}} = 812.930 \text{ US\$/ano}$$

$$\text{Renda}_{\text{Min.}} = (0,105 - 0,088) 2,32 \times 1000 \times 24 \times 365$$

$$\text{Renda}_{\text{Min.}} = 345.500 \text{ US\$/ano}$$

Tempo de reembolso e lucro total

Conhecendo que o investimento total calculado é de US\$ 1.666.175 e que o tempo total previsto para o final do projeto é de 20 anos pode-se calcular o tempo de reembolso e o lucro total assim:

$$\text{Reembolso}_{\text{Tempo Min.}} = 1.666.175 / 812.930$$

$$\text{Reembolso}_{\text{Tempo Min.}} = 2 \text{ anos e } 1 \text{ mês}$$

$$\text{Lucro}_{\text{Max.}} = (20 - 2,05) \times 812.930$$

$$\text{Lucro}_{\text{Max.}} = \text{US\$ } 14.590.000$$

$$\text{Reembolso}_{\text{Tempo Max.}} = 1.666.175 / 345.500$$

$$\text{Reembolso}_{\text{Tempo Min.}} = 4 \text{ anos e } 10 \text{ meses}$$

$$\text{Lucro}_{\text{Min.}} = (20 - 4,82) \times 345.500$$

$$\text{Lucro}_{\text{Min.}} = \text{US\$ } 5.245.000$$

Análise de viabilidade econômica

O pagamento das plantas pode ser feito à vista ou por meio de empréstimo bancário, sendo que o segundo método é o mais aplicado para grandes investimentos:

Pagamento à vista:

De acordo com a estimativa preliminar, o projeto tornaria-se viável com este tipo de pagamento, apresentando um retorno do investimento (reembolso) a médio prazo de 2 a 5 anos aproximadamente e um lucro total entre US\$ 5,2 e 14,6 milhões.

Empréstimo:

No caso de empréstimo, tem-se que levar em conta os custos de encargos de capital que, de acordo com a tabela 3.4 item 9, são de 15% do capital fixo e devem ser somados no custo de operação anual:

$$C_{Op. Tot. Max.} = 0,088 + [(1.514.705 \times 0,15) / (165 \times 24 \times 365)]$$

$$C_{Op. Tot. Max.} = 0,245 \text{ US\$/kW}_e\text{h}$$

$$C_{Op. Tot. Min.} = 0,065 + [(1.514.705 \times 0,15) / (165 \times 24 \times 365)]$$

$$C_{Op. Tot. Min.} = 0,222 \text{ US\$/kW}_e\text{h}$$

Comparando o novo valor de custo operacional obtido com os valores das tarifas, conclui-se que um empréstimo tornaria inviável o projeto porque não se teria renda de operação.

De acordo com TREVISAN (2004), o custo de encargo de capital pode ser ainda maior no Brasil. Segundo o mesmo autor os empréstimos podem ser efetuados em bancos nacionais ou estrangeiros.

No caso do empréstimo efetuado no Brasil, a possibilidade mais atraente é a do BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. O total dos juros cobrados engloba a taxa de juros de longo prazo (TJLP), o *spread* básico e de risco ou do agente, e os valores têm variado entre 10 e 15 % ao ano.

Contudo, no momento não são permitidos recursos para compra de equipamentos importados.

Para o caso de empréstimo no exterior, por exemplo nos EUA, os juros acabam ficando entre valores próximos a 25 % ao ano, incluindo os juros cobrados nos EUA, a inflação brasileira, o risco do país, o imposto de renda e as taxas do Brasil. Ao valor dos juros, para qualquer que seja a origem do empréstimo, deve-se também acrescentar uma parcela para cobrir o pagamento do capital referente ao valor da quantia solicitada.

Resumindo, a forma de pagamento da planta através de empréstimo pode ser:

- Pagamento considerando empréstimo junto ao BNDES, com a taxa de juros mais pagamento do capital variando entre 10 e 20 % ao ano (sobre o valor do empréstimo).
- Pagamento considerando empréstimo de bancos americanos, com a taxa de juros mais pagamento do capital variando entre 25 e 30 % ao ano (sobre o valor do empréstimo).

Espera-se que o valor das pilhas a combustível diminua consideravelmente nos próximos 10 anos. Conforme TREVISAN (2004), o objetivo das empresas manufactureiras é produzir plantas que atinjam 40.000 horas de vida útil, reduzindo o custo de capital para a faixa entre 1.000 e 1.500 US\$/kW. O referido custo será posteriormente reduzido ainda mais com o aumento do volume de produção.

Para as pilhas a combustível do século 21 está previsto atingir um custo de fabricação e montagem da ordem de 100 US\$/kW e custo do sistema de 400 US\$/kW, eficiências acima de 80 % e, por fim, emissões quase nulas. Na figura 4.18 apresenta-se as perspectivas de redução de custo para plantas instaladas de pilhas a combustível ao longo dos próximos anos, considerando os novos modelos que entrarão no mercado.

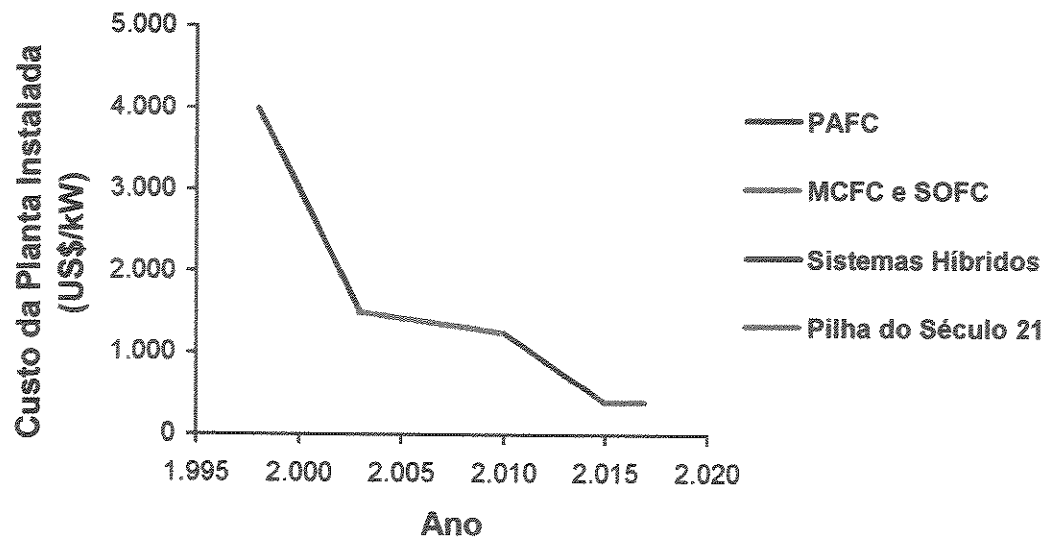


Figura 4.18. Perspectivas de redução de custos das pilhas a combustível(TREVISAN,2004)

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao objetivo principal do trabalho, pode-se destacar que o Projeto Conceitual apresentado mostra a viabilidade técnica do aproveitamento do gás gerado na URTR Delta A do município de Campinas /SP, utilizando as PAFC's para geração de energia elétrica.

Ressalta-se que a utilização de uma PAFC no presente estudo deve-se a disponibilidade comercial das mesmas na atualidade. Entretanto, as pilhas do tipo MCFC teoricamente seriam as mais indicadas para utilização de gás de aterro sanitário já que diminuiria-se o custo do sistema de pré-tratamento de gases, aumentaria-se a eficiência de aproveitamento dos mesmos e apresentaria-se uma clara possibilidade de co-geração de energia a partir do aproveitamento do calor.

O projeto inclui ainda, uma proposta de um Sistema Integrado, URTR/PAFC/ETE, que permite a maximização do aproveitamento de todos os recursos disponíveis ou gerados tais como, gás do aterro (CH_4 e CO_2), energia elétrica e térmica. Outras possibilidades não detalhadas neste projeto, incluem o aproveitamento de outros recursos, tais como, os lodos e os gases dos biodigestores.

5.1. Conclusões do ponto de vista técnico

Foi possível verificar a influência da temperatura, do tempo e da umidade na geração de gases no aterro sanitário. Os resultados mostraram que com a temperatura média do município de Campinas de $21,5^\circ\text{C}$ e o tempo de exploração do aterro de 30 anos, a eficiência das reações de biodegradação para o caso da URTR Delta A é de 51,2% em média. Tal índice é considerado baixo quando comparado com as eficiências relatadas na literatura que ficam em torno de 70 a 90%.

Considerando a temperatura e o tempo como constantes, pode-se concluir que o aumento da eficiência de produção de gás no aterro ficaria na dependência do aumento da umidade. Para a URTR Delta A, o teor de umidade médio de 50% em massa é baixo quando

comparado com os valores de umidade de 60 a 80% que favorecem os processos de biodegradação.

De acordo com as conclusões anteriores, a utilização dos lodos dos biodigestores como material de cobertura dos resíduos apresenta-se como uma alternativa interessante na operação da URTR Delta A que, de acordo com os dados teóricos aumentaria em 20% a eficiência de produção de CH_4 , devido principalmente a seu alto teor de umidade.

Visando um aumento na capacidade de captação, foi definido um sistema ativo de extração de gases determinando-se o raio de influência para cada poço e sua distribuição. Atualmente a capacidade de captação está próxima a 60%, na melhor das hipóteses. A baixa percentagem deve-se ao fato de que o sistema atual de captação foi projetado somente para queimar os gases em “poços de monitoramento”.

A quantidade de gás gerado na URTR Delta A, de $16,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, é suficiente para alimentar 14 PAFC's durante 20 anos. Além disso, a composição calculada de CH_4 (59%), caracteriza um gás de alto valor energético que aumenta a eficiência do sistema de aproveitamento. Cabe enfatizar que a quantidade de gás foi calculada utilizando métodos teóricos e experimentais obtendo valores muito próximos entre si.

Quanto à geração de energia elétrica, foi determinado um potencial energético real de 2,32 MW_e. De acordo com o projeto, a energia elétrica gerada será utilizada para suprir a demanda energética do sistema de captação, da ETE, da UPG e do RNEA. Além disso, a geração de $2,91 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ de energia térmica (água a 120°C e 60°C) será destinada para alimentação do reformador de combustível.

Finalmente, com base em projetos existentes determinou-se o *Lay Out* para cada etapa do Sistema Integrado (URTR, UPG, PAFC e ETE), mostrando os principais detalhes dos equipamentos necessários para utilização da tecnologia de PAFC.

5.2. Conclusões do ponto de vista econômico

Os resultados da avaliação preliminar mostram que o projeto é viável economicamente para o caso do pagamento à vista dos equipamentos com um retorno do investimento a médio prazo de 2 a 5 anos e um lucro total entre US\$ 5,2 e 14,6 milhões. Certamente este tipo de pagamento dificilmente será possível no Brasil. Para o caso de empréstimo bancário, atualmente o projeto é inviável.

Este projeto pode-se tornar viável economicamente a médio prazo com a diminuição do valor das pilhas a combustível, e o aumento do custo da energia elétrica obtida por métodos convencionais. Além disso, os governos atualmente procuram implantar mecanismos que incentivem a utilização de fontes de energia renováveis e de baixo impacto ambiental. Dentre tais mecanismos pode-se citar a isenção de impostos e os incentivos econômicos pela diminuição da contaminação.

5.3. Sugestões de trabalhos futuros

Fazer um estudo técnico-econômico para utilização de pilhas a combustível do tipo MCFC ou de sistemas híbridos visando a diminuição do investimento inicial e dos custos de operação e propiciando um aproveitamento de recursos mais efetivo.

Fazer medições da quantidade de gás produzido no aterro sanitário e a caracterização do mesmo, para verificar a precisão dos métodos teóricos e experimentais propostos.

Fazer uma estimativa econômica detalhada, levando em conta todas as possibilidades de diminuição de custos e de geração de renda em cada etapa do Sistema Integrado de acordo com o *Lay Out* proposto.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10.000: **Resíduos sólidos - Classificação**. São Paulo, 1987.

AITANI, A. M. . Process to enhance refinery-hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**. v.21, p. 267 – 271, 1996.

AL-QAHTANI, H. . Effect of ageing on a steam reforming catalyst. **Chemical Engineering Journal**. v.66, p. 51 – 56, 1997.

ALVES, J. W. . **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 142 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Instituto de Física, Faculdade de Economia e Administração e Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ATTEWELL, P. . **Ground Pollution**. E&FN Spon, London, s.n.,1993.

BALDERRAMA L. M. B. . **Estudo de impacto ambiental causado por aterro sanitário via migração de gases**. Campinas/SP, s.n., 1993.

BARRY, D. L. . **Hazards from methane (and Carbon Dioxide)**. In: Cairney, T. (ed). **Reclaiming**, 1987.

BELL J. . **Characteristics of municipal refuse**. National conference on solid wastes research. APWA Chicago/EUA, 1963.

- BRANDFORD, M. C. J.; VANNICE, M. A. . CO₂ reforming of CH₄ over supported Pt catalysts. **Journal of Catalysis**. v.173, p.157 – 171, 1998.
- BRANDFORD, M. C. J.; VANNICE, M. A. . CO₂ reforming of CH₄ over supported Ru catalysts. **Journal of Catalysis**. v.183, p.67 – 75, 1999.
- BRENSCHEIDT, TH., JANOWITZ, K., SALGE, H.J., WENDT, H., BRAMMER, F. Performance of ONSI PC25 PAFC cogeneration plant. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 23, n. 1, p. 53-56, 1998.
- BROWN, K. A.; MAUNDER, D.H. . **Exploitation of landfill gas: A UK perspective**. Water, Science And Technology. v.30, n.12, p. 143-151, 1994.
- CAMPBELL, D. J. V. **Landfill gas migration – Monitoring and controls**. Harwell: UK Atomic Energy Authority. s.n.,1987.
- CAMPINAS. **Usina de processamento e de tratamento integrado de resíduos sólidos urbanos**. Temo de referência; projeto conceitual. Campinas: Prefeitura Municipal de Campinas. Secretaria de Serviços Públicos. Departamento de Limpeza Urbana. 1994, p.223 (Texto técnico)
- CAMPINAS. **Plano Director**. Campinas: Prefeitura Municipal de Campinas. 1995, p.43 (Texto técnico)
- CAMPINAS. **Campinas: a gestão dos resíduos sólidos urbanos**. Campinas: Secretaria de Serviços Públicos. Secretaria da Administração. 1996, p.224. (Texto Técnico)
- CARLSON, J. A. . **Recovery of landfill gas at mountain view, engineering site study**. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste Management Programs. EPA/530/SW. p. 587, 1977.

- CARRA, J. S.; COSSU, R. . **Sanitary landfilling: Process, technology and environmental impact**. In: CHRISTENSEN, T.W.; COSSU, R. and STEGMANN, R. (eds.). Academic Pres, 1991.
- CETESB. Companhia Estadual de Tecnologia em Saneamento Ambiental (2001). **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares de 2000**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 22 fevereiro 2003.
- CHAN, S. H.; WANG, H. M. . Effect of natural gas composition on auto thermal fuel reforming products. **Fuel Processing Technology**. v.64, p.221-239, 2000.
- CHANG, J.; PARK, S.; YOO, J. W.; PARK, J. . Catalysts Behaviour of supported KNiCa catalysts and mechanistic consideration for carbon dioxide reforming of methane. **Journal of Catalysis**. v.195, p.1-11, 2000.
- CHODHARY, V. R.; UPHADE, B. S.; MAMMAN, A. S. . Simultaneous steam and CO₂ reforming of methane to syngas over NiO/MgO/SA-5205 in presence and absence of oxygen. **Applied Catalysis**. v.168, p.33-46, 1998.
- CLARKE, S. H.; DICKS, A.L.; POINTON, K.; SMITH, T. A.; SWANN, A. Catalytic aspects of the steam reforming of hydrocarbons in internal reforming fuel cells. **Catalysis Today**. v.38, p.411-423, 1997.
- COSSU, R. **Role of landfilling in solid waste management**. In: CHRISTENSEN, T.W.; COSSU, R. and STEGMANN, R. (eds.). Academic Pres, 1989.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. . **Chemical engineering: An introduction to chemical engineering design**. EUA: Pergamon Press Ltd., v. 6, 1983. p.213-249.
- CUNHA, M.E.G. . **Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: “O caso do município de Campinas – SP”**, 2002, p.135. Dissertação (Mestrado em Eng. Mca.) – Departamento de Energia, Faculdade de

Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2002.

DoE. **Waste Management Paper – Landfill Wastes**. Department of the Environment UK. HMSO. No 26. London, 1986.

DoE. **Waste Management Paper – Landfill Wastes**. Department of the Environment UK. HMSO. 2nd Ed. No 27. London, 1991.

DoE. **Waste Management Paper – A Review of Options**. Department of the Environment UK. HMSO. No 1. London, 1992.

DoE. **Understanding Landfill Gas: Practical advice arising from Landfill Gas Research**. Department of the Environment UK. CWM/040/92.. London, 1992.

DoE. **Waste Management Paper – Landfill Design, Construction and Operation Practice**. Department of the Environment UK. HMSO. No 26B. London, 1995.

EDEN, R. **The combustion of low calorific value landfill gas**. UPKS Flares. Sales Brochure. UK PS, Coventry, 1995.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2004). **Banco de dados climáticos do Brasil**. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/> Acesso em: 02 de janeiro de 2004.

EMPLASA. Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. Município de Campinas e Região Agrícola: Dados Climáticos Mensais - Temperatura Média, Chuva e Balanço Hídrico. **Boletins "O Agrônomo"**. Instituto Agrônomo de Campinas. v.51(1) e v.51(2/3), 2002.

FARQUHAR, G. F.; ROVERS, F. A. . Gas production during refuse decomposition. **Water, Air and Soil Pollution**. v.2, p.483-495, 1973.

- FERRUCCIO, R. S. . **Comparação da aplicação da remediação em áreas degradadas e da implantação de sistemas integrados nas cidades de Campinas/SP, Americana/SP, Porto Alegre (RS) e Caxias do Sul (RS).** Campinas, s.n, 1997.
- FRANÇA, A.V.; JORDÃO, E.; COBO, A. J. G. . **Efeito das condições de preparação de catalisadores mássicos AlNiCu na reação do gás de síntese.** Anais do 9º Congresso Brasileiro de Catálise. Instituto Brasileiro de Petróleo. Águas de Lindóia, v.1, 1997.
- GRAHAM, J. R.; RAMARATNAM, M. . **Chemical Engineering.** 1993, p.310.
- HAGERY, D. J.; PAVONI, J.L.; HEER Jr., J. E. . **Solid Waste Management.** Van Nostrand Reinhold, New York, 1973.
- HAMADA, J. **Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. v.19, Foz de Iguaçu, 1997. Trabalhos Técnicos digital 97. 9p. CD-ROM.
- EG&G SERVICES; PARSONS, INC.; Science Applications International Corporation. **FUEL CELL HANDBOOK.** 15. ed. West Virginia: EUA, 2000, 12-4 p.
- HEINEMANN, H. A. **A brief history of industrial catalysis.** In: Catalysis: Science and Technology. BOUDRAT, M.; ANDERSON, J. R. (eds.) Elsevier. v.4, New York, 1981.
- HUTCHINGS, H. . **Options for the management of low-methane landfill gas.** 1996, p.117. Report (MSc degree Chem. Eng.) – Centre of Environmental Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London UK, 1996.
- IBAM & ELETROBRÁS. Instituto Brasileiro de Administração Municipal & Centrais Elétricas Brasileiras - **Guia Técnico de Eficiência Energética nos Serviços de Saneamento.** Rio de Janeiro, p. 76, 1998.

- IPT/CEMPRE. Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Centro Empresarial de Compromisso à Reciclagem. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. São Paulo, p.370, 2000.
- KARSIOTIS, N. **A financial feasibility study of methane extraction from the Liosia landfill site**. 1981. Report (MSc degree Chem. Eng.) Centre of Environmental Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London. London UK, 1981.
- KING, J.M.; McDONALD B. . **Handbook of Fuel Cells: Fundamentals Technology and Applications**. Part 5: Experience with 200 KW PC25 fuel cell power plant. Jhon Wiley & Sons Ltd.. v. 4, 2003, p.832-844.
- KUMAR, R.; VAN SLOUN, J. K. . Adsorption process for producing methane from landfill gas. **Alternative Energy Sources VIII. Research and development 2**. Florida. v. 2, p. 481-499, 1989.
- LANGNICKEL, U. First European fuel cell application using digester gas. **Fuel Cells Bulletin**. n. 2, p. 10-12, 2000.
- LEITE, V. D.; POVINELLI, J.; VAZQUZ, V. R. C. . **Modelos de bioconversão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos inoculados com lodo de esgoto sanitário**. In: Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental. v.19, Foz de Iguaçu, 1997. Trabalhos Técnicos digital 97. 9p. CD-ROM.
- LI, Y.; CHEN, J.; QIN, Y.; CHANG, L. . Simultaneous production of hydrogen and nanocarbon from decomposition of methane on a nickel-based catalyst. **Energy & Fuels**. v.14, p.1188-1194, 2000.
- LIMA, L. M. Q. . **Lixo – Tratamento e Biorremediação**. v.3, 1995.
- LINARDI, M. **Futuro das Células a Combustível de Carbonato Fundido**. IPEN jan. 2004. Entrevista concedida a Pablo Cadavid.

- LOUWMAN, D. **Papel de los vertederos en un sistema integrado de gestión de residuos.** In: 6° Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos. Madrid, 1992.
- LUNGHI, P.; BOVE, R.; DESIDERI, U. Life-cycle-assessment of fuel-cells-based landfill-gas energy conversion technologies. **Journal of Power Sources.** v. 131, p. 120-126, 2004.
- LUTTON, R. J.; REGAN, G. L.; JONES, L. W. . **Design and construction of covers for solid waste landfill.** EPA 600/2-76-165. Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati, U.S., 1979.
- Mc. BEAN, E. A.; FARQUHAR, G. J. . An examination of temporal/spatial variations in landfill-generated methane gas. **Waste, Air and Soil Pollution.** v.13, p.157-172, 1980.
- Mc. BEAN, E. A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G. J. . **Solid Waste Landfill Engineering and Design.** London: Prentice Hall. 1995, p.291.
- MELDONIAN, N. L. . **Alguns aspectos do lixo urbano no Estado de São Paulo e considerações sobre a reciclagem do alumínio e do papel.** Campinas/SP, s.n., 1998.
- MOK, K. B.; ROSS, J. H. H.; SAMBROOK, R. M. . **Thermal and mechanically stable catalysts for steam reforming and methanation. A new concept in catalyst design.** In: Preparation of Catalysts III. DELMON, B.; GRANGE, P.; JACOBS, P. A.; PONCELET, G. (eds.), Elsevier. Amsterdam, 1983. p.291.
- MOTTA, F. S. . **Produza sua energia – biogestores anaeróbicos.** Recife: Gráfica Editora, 1986. p. 144.
- MUÑOZ, E.; MARTINEZ, R. . **El problema de la basura en medios urbanos.** Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas, Dpto. Ing. Mec. Chile, 2001, p. 30.

- NILSSON, P.; EDNER, S. **Test cell study of methane production by controlled waste deposition.** In: Proceeding of the international landfill symposium. v. 3, 1991.
- NUNES, C. R. . **Proposta de metodologia para elaboração de projetos de aterros sanitários celulares.** Campinas/SP, s.n., 1994.
- OGATA, M. G. . **Os resíduos sólidos na organização do espaço e na qualidade do ambiente urbano: Uma contribuição geográfica ao estudo do problema na cidade de São Paulo.** 1983, p.89. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.
- OSAKI, T.; MORI, T. . **Role of potassium in carbon-free CO₂ reforming of methane on K-promoted Ni/Al₂O₃ catalysts.** *Journal of catalysis.* v.204, p.89-97 , 2001
- PARERA, J. M.; FÍGOLI, N. S. **Chemistry and processing of petroleum.** In: Catalytic Naphtha Reforming: Science and Technology. ANTOS, G. J.; AITANI, A. M.; PARERA, J. M. (eds.), Chemical Industries (Serial) Marcel Dekker. New York, 1995. p. 12.
- PEÑA, M. A.; GÓMEZ, J. P.; FIERRO, J. L. G. . **New catalytic routes for syngas and hydrogen production.** *Applied Catalysis: A General.* v. 144, p 7-57, 1996.
- PINTO, M. S. **A coleta e disposição do lixo no Brasil.** Fundação Getúlio Vargas/CONSULTEC, 1ª ed. 1979.
- POIRIER, M.G.; SAPUNDZHIEV, C. . **Catalytic decomposition of natural gas to hydrogen for fuel cell applications.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 22, n. 4, p. 429-433. 1997.
- POUSTCHI, E. B. M.; GNYP, A. W.; St. PIERRE, C. C. . **Odour threshold modelling: Assessing the impact of odorous emission from municipal waste landfill sites on the surrounding community.** In: CHEREMISINOFF, P. N. Encyclopedia of environmental control technology. GPG, v.2, Houston, 1989.

- ROBINSON, W. D.; CANTER, L.; O' LEARLY, P. R. . **Land Disposal**. In: The solid waste handbook a practical guide. J. Wiley, New York, 1986.
- ROSS, J. R. H.; KEULEN, A. N. J.; HEGARTY, M. E. S.; SESHAN, K. The catalytic conversion of natural gas to useful products. **Catalysis Today**. v.30, p.193-199, 1996.
- ROSTRUP, J. R. . **Catalytic steam reforming**. In: Catalysis: Science and Technology. New York, Elsevier, v.5, p.1-12, 1984.
- ROSTRUP-NIELSEN, J. R.; ALSTRUP, L. B. . Innovation and science in the process. Industry steam reforming and hydrogenolysis. **Catalysis Today**. v.53, p. 311-316, 1999.
- SANDELLI, G. J.; SPIEGEL, R. J. . Fuel cell energy recovery from landfill gas. **Journal of Power Sources**. v. 37, n. 2, p. 255-264, 1992.
- SANDELLI, G. J.; TROCCIOLA, J.C.; SPIEGEL, R. J. . Landfill gas pretreatment for fuel cell applications. **Journal of Power Sources**. v. 49, n. 3, p. 143-149, 1994.
- SANDELLI, Gregory J.; SPIEGEL, Ronald J.; SEDERQUIST, Richard A.; TROCCIOLA, John C.; HEALY, Herbert C.; LISIEUR, Roger R.; all of conn. **Landfill gas treatment system**. US005451249A, 19 Sep. 1995, 14 Jun. 1994. Patente!
- SCHWARZLMÜLLER, A. . **Neutralización de aguas residuales con CO₂. Aspectos para la neutralización anticontaminante y económica de aguas residuales alcalinas en el acabamiento textil y otros**. EUROTEx G&S, GmbH & Co, 2001. p61-64.
- SCHWARZLMÜLLER, A. . **Proyecto de instalación de un reactor de neutralización de aguas residuales alcalinas, utilizando el CO₂ de las calderas**. EUROTEx G&S, GmbH & Co, 2001. p1-24.

- SCOTT, P. E. . The IEA's work in harmonising sampling and analytical protocols related to MSW conversion to energy. **Biomass and Bioenergy**. v. 9, n. 1-5, p.415-439, 1995.
- SENAGA, M.; EGYDIO R. . **Sistema de crédito de carbono pode trazer benefícios a aterros sanitários**. Brasil Salomão e Matthes Advocacia. Ribeirão Preto/SP, 2004. p1-3.
- SILVA, E. P. . **Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio**. Unicamp, Campinas, 1991. p. 204.
- SINFELT, J. H. . **Catalytic reforming of hydrocarbons**. In: *Catalysis: Science and Technology*. BOUDART, M.; ANDERSON, J. R. (eds.), v.1, 1981. p. 257.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE SÃO PAULO (ESTADO), SMA/SP. **Série Seminários e Debates**. In: **Resíduos sólidos e o meio ambiente**, São Paulo, 1993.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE SÃO PAULO (ESTADO), SMA/SP. **A cidade e o lixo**, São Paulo, 1998a.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE SÃO PAULO (ESTADO), SMA/SP. **Documentos Ambientais**. In: **Propostas de políticas estaduais de resíduos sólidos**, São Paulo, 1998b.
- SODRÉ, M. G. **Consumo, Lixo e Meio Ambiente**. In: *Consumo e Globalização*. São Paulo: Edição Especial Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 1997.
- SPIEGEL, Ronald J.; TROCCIOLA, J.C.; PRESTON, J. L. . Test results for fuel cell operation on landfill gas. **Energy**. v. 22, n. 8, p. 777-786, 1997.
- SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L; TROCCIOLA, J.C. . Fuel cell operation on landfill gas at Penrose Power Station. **Energy**. v. 24, p. 723-742, 1999.

- SPIEGEL, R. J.; THORNELOE, S.A.; TROCCIOLA, J.C.; PRESTON, J. L. . Fuel cell operation on anaerobic digester gas: conceptual design and assessment. **Waste Management**. v. 19, p. 389-399. 1999.
- SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L. . Technical assessment of fuel cell operation on anaerobic digester gas at the Yonkers, NY, waste treatment plant. **Waste Management**. s.n.. p. 1-9. 2003.
- SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L. . Technical assessment of fuel cell operation on landfill gas at the Gronton, CT, landfill. **Energy**. v. 28, p. 397-409, 2003.
- SRINIVASAN, S.; DAVÉ, B. B.; MURUGESAMOORTHY, K. A. . **Fuel Cell Systems**. New York: PARTHASARATHY, A.; APPLEBY, A. J. . In: BLOMEN, J. M. J.; MUGERWA, M. N. (eds.). Plenum Press, 1993. 535 p.
- STAGG, S. M.; ROMEO, E.; PADRO; et al. Effect of promotion with on support Pt catalysis for CO₂ reforming of CH₄. **Journal of Catalysis**. v.178, p.137-145, 1998.
- STAGG, S. M.; NORONHA, F. B.; FENDLEY, G.; et al. CO₂ reforming of CH₄ over Pt/ZrO₂ catalysis promoted with La and Ce oxides. **Journal of Catalysis**. v.194, p.240-249, 2000.
- STEGMANN, R. **Principles of landfilling – the current approach. Sanitary landfilling: Process, technology and environmental impact**. In: CHRISTENSEN, T.W.; COSSU, R. and STEGMANN, R. (eds.). Academic Pres. 1991, p.91.
- STEINFELD, G.; SANDERSON, R. . **Landfill gas cleanup for Carbonate Fuel Cell power generation**. Final Report by Energy Research Corporation. Contract No: DE-FC 21-95MC31184, U.S.,1998. p.57.
- TABASARAN, O. . Ueberlegungen zum problem. **Deponiegas Müll und Abfall**. v.7, p.29-36, 1976.

- TCHOBANOGLIOUS, G.; THIESSEN, H.; ELIASSEN, R. . **Solid waste engineering principles and management issues**. New York: McGraw-Hill Book Co. 1977, p.82.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THIESSEN, H.; ELIASSEN, R. . **Integrated solid waste management**. New York: McGraw-Hill Book Co. 1993, p.48.
- TEIXEIRA, E. N.. **Efeito inibidor da recirculação direta do chorume na decomposição anaeróbica dos resíduos sólidos**. 1993, p.122. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- TEMKIN, M. L. . The kinetics of some industrial heterogeneous catalytic reactions. **Advances in Catalysis**. v.82, p.173, 1979.
- THAMPAN, T.; MALHOTRA, S.; ZHANG, J.; DATTAS, R.. PEM fuel cell as a membrane reactor. **Catalyst Today**. v.47, p.15-32, 2001.
- THOMAS, S., ZALBOWITZ, M. **Fuel Cells – Green Power**. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1999. 36 p.
- TREVISAN, E. A. O. . **Contribuição ao estudo da implementação de pilhas a combustível no Hospital das Clínicas da Unicamp**. 2004. Tese (Doutorado) - Departamento de Tecnologia de Polímeros, Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas.
- U.S. EPA. **Methane emissions and opportunities for control**. United States Environmental Protection Agency. Office of air and radiation, editors: Mark Orlic and Tom Kerr, 1990, p.50.
- U.S. EPA. **Air emissions from municipal solid landfill – Background information for proposed standards and guidelines**. United States Environmental Protection Agency, 450/3-90-001a, NTIS PB91-197061. 1991, p.3-30.

- U.S. EPA. **Requirements for hazardous waste landfill design, construction and closure.** United States Environmental Protection Agency. 1992, p.41
- U.S. EPA. **A guide for methane mitigation projects – Gas to energy at landfills and open dumps.** United States Environmental Protection Agency. Office of air and radiation, editors: Mark Orlic and Tom Kerr. 1996, p.67.
- U.S. EPA. United States Environmental Protection Agency. **Landfill Methane Outreach Program** (2001). Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop>. Acesso em: 30 outubro 2003.
- VON SPAKOUSKY, M. R.; OLMMER, B. . Fuel cell systems and system modelling and analysis perspectives for fuel cell development. **Energy Conversion and Management.** v.43, p. 249-257, 2002.
- WILLUMSEN, H.C. **Estado da Arte de Desenvolvimento de Gás de Aterro sanitário em EU e Mundo Largo.** Joule-Thermie Seminário Internacional em Gás de Aterro Sanitário Instituto de Energia lituano. Kaunas. 1999.
- WILLUMSEN, H.C. **Relatório final para Projeto de Demonstração BM/741/83 para a Comunidade Econômica europeia, Diretório XVII Geral. Recuperação de Gás de Aterro sanitário.** Escritório para Publicações Oficiais das Comunidades europeias, ISBN 92-826-0817-4. 1988.
- WHITAKER, R. Investment in volume building: the ‘virtuous cycle’ in PAFC. **Journal of Power Sources.** v. 71, p. 71-74, 1998.
- YAACOB, Z.; LWIN, Y.; DAUD, W. R.; MOHAMAD, A. B. . Hydrogen reduction from steam-methanol reforming: thermodynamic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy.** v.25, p.47-53, 2000.

ANEXOS

Anexo 1. Metodologia experimental Hamada - Tabela de cálculo

Rapidamente biodegradável						Lentamente biodegradável						Total Resíduos		METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE HAMADA PARA CÁLCULO DE PRODUÇÃO TOTAL DE BIOGÁS POR ANO																		TOTAL GÁS UTRIL DELTA A																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Taxa geração ao final do ano		Gases gerados no ano		Taxa geração ao final do ano		Gases gerados no ano		Taxa geração ao final do ano		Gases gerados no ano																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
m³/Kg ano		m³/Kg		m³/Kg ano		m³/Kg		m³/Kg ano		m³/Kg																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
ANO																																1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	m³/ano		ANO																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
2	0,0980	0,0430	0,0007	0,0004	0,0867	0,0494	9.386.000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	9.386.000	2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3	0,0735	0,0657	0,0015	0,0011	0,0750	0,6868	16.492.000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	26.878.000	3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
4	0,0490	0,0612	0,0022	0,0018	0,0512	0,6631	11.989.000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	37.867.000	4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
5	0,0245	0,0367	0,0030	0,0026	0,0275	0,6193	7.467.000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	45.334.000	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
6	0	0,0122	0,0097	0,0033	0,0037	0,6196	2.964.000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	48.288.000	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
7	---	---	0,0033	0,0035	0,0033	0,6036	665.000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	48.963.000	7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
8	---	---	0,0030	0,0031	0,0030	0,6031	589.000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	49.852.000	8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
9	---	---	0,0026	0,0028	0,0026	0,6028	532.000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	50.084.000	9																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
10	---	---	0,0022	0,0024	0,0022	0,6024	456.000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	60.849.000	10																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
11	---	---	0,0018	0,0020	0,0018	0,6020	380.000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	60.928.000	11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
12	---	---	0,0015	0,0017	0,0015	0,6017	323.000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.243.000	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
13	---	---	0,0011	0,0013	0,0011	0,6013	247.000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.490.000	13																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
14	---	---	0,0007	0,0009	0,0007	0,6009	171.000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.661.000	14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
15	---	---	0,0004	0,0006	0,0004	0,6006	114.000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.776.000	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
16	---	---	0	0,0002	0	0,6002	38.000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total	0,246		0,0277		0,2727		---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	17																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
																																---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
																																---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
																																---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
																																---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
																																---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	22																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
																																---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	23																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
																																---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	24																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	25																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	27																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	29																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61.813.000	30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
																																---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	38000	114000	171000	247000	323000	380000	456000	532000	589000	665000	2964000	7467000	11989000	16492000	9386000	0	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---</

APÊNDICES



XV COBEEQ

A Engenharia existe
• • Crescimento
Sustentável

XX Congresso Brasileiro
de Termodinâmica
Aplicada - CATEMA

26 a 28 de setembro de 2004

USO DE PILHAS A COMBUSTÍVEL PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO GÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS

P. C. Cadavid¹, W. S. Oliveira²

1,2- Ciência e Tecnologia dos Materiais - Engenharia Química – UNICAMP - Cidade Universitária
Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 500 - Barão Geraldo – CEP: 13083-970 – Campinas – SP – Brasil
Telefone: (0-55-19) 3788-3939 – Fax: (0-55-19) 3788-3938 – E-mail: oliveira@feq.unicamp.br

RESUMO – Devido às crises no mundo pela dependência do petróleo, tem-se buscado diversificar as fontes primárias energéticas. Atualmente, há um interesse crescente no aproveitamento do gás de aterros sanitários (55% CH₄, 40% CO₂ e 5% outros). Assim, o objetivo desta pesquisa é apresentar o projeto técnico conceitual para o aproveitamento desses gases, utilizando pilhas a combustível na produção de energia elétrica e térmica, reduzindo a poluição atmosférica. O projeto apresenta uma idéia inovadora que consiste em um SISTEMA INTEGRADO (Aterro Sanitário do Município de Campinas/S.P., Pilha a Combustível e Estação de Tratamento de Esgoto). A pilha trata-se de um sistema eletroquímico que faz com que a energia das ligações químicas do H₂ (proveniente do CH₄) seja convertida em energia elétrica e água ao reagir com O₂ (do ar). Para conhecer o potencial energético do sistema foi calculada a quantidade de gás aproveitável, utilizando diferentes metodologias teóricas e experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: aterro sanitário, gás de aterro sanitário, gás do lixo, pilha a combustível, célula a combustível, PAFC.

ABSTRACT – Due to the crises for the dependence of petroleum, many researches have been done in order to diversify the energy primary sources. Now there is an interest for use the landfill gas (55% CH₄, 40% CO₂ and 5% other). The objective of this research is to present the conceptual technical project for use those gases, using fuel cell in the electric and thermal energy production, reducing the atmospheric pollution. This project presents an innovative idea that consists of an INTEGRATED SYSTEM (Municipal Landfill of Campinas S.P./Brazil, Fuel Cell and Waste Water Plant Treatment). The fuel cell is a electrochemical system that converts the energy of the chemical H₂ bond (originating from CH₄) in electric power and water when reacting with O₂ (of the air). In order to evaluate the energetic potential of this system, the amount of profitable gas was calculated, using different theoretical and experimental methodologies.

1. INTRODUÇÃO

Sendo o petróleo uma das principais fontes de energia e também por ser um recurso não renovável, têm-se buscado reduzir esta dependência por meio da diversificação dos recursos energéticos primários. Atualmente, há também uma grande preocupação que essas

alternativas energéticas tenham como prioridade o meio ambiente. Hoje, existem várias opções tais como, energia solar, eólica, hidráulica, biomassa, entre outras. Porém todas essas alternativas encontram-se ainda em desenvolvimento e, em muitos casos, não são



competitivas com as tecnologias tradicionais para geração de energia e, além disso, devem superar muitos obstáculos, tais como, pressão de alguns interesses econômicos, legislação inadequada, falta de credibilidade e de apoio econômico.

Apesar disso, o Brasil tem-se destacado no cenário mundial, apresentando importantes avanços científicos e tecnológicos, tais como, produção de álcool combustível para veículos à combustão, além de estudos importantes sobre outras fontes de energia renovável.

O desafio hoje é encontrar alternativas energéticas ao petróleo, concentrando-se esforços para superar os obstáculos mencionados anteriormente. Neste sentido, a viabilidade técnico-econômica do aproveitamento de outras fontes de energia apresenta-se como um fator fundamental.

Em países como o Brasil, por exemplo, pode-se recorrer a fontes energéticas tais como biogás, onde há um grande potencial de produção a partir do desperdício da indústria de cana de açúcar, dos biodigestores das plantas de tratamento de esgoto e dos aterros sanitários.

No caso dos aterros sanitários é uma prática comum a construção de dutos de escape, onde na melhor das hipóteses, os gases são queimados sem qualquer tipo de aproveitamento energético. Vale salientar que o lixo disponível no Brasil é classificado como lixo rico, pela alta percentagem de resíduos orgânicos presentes, o que contribui muito para formação de grandes quantidades de CH_4 aproveitável.

Do ponto de vista ambiental, as emissões gasosas, provenientes de aterros sanitários, contribuem de uma maneira significativa para a contaminação atmosférica e para o aquecimento global do planeta.

Para minimizar o impacto dessas emissões no ambiente e outros efeitos de risco, na década de setenta, foi testada uma primeira

alternativa de captação e queima direta dos gases. Posteriormente, durante as décadas seguintes, outras técnicas tiveram como objetivo não só agir sobre as emissões gasosas, atenuando seus efeitos contaminantes, mas também aproveitar a energia que potencialmente apresentam. Dentre essas alternativas pode-se destacar o uso das termoeletricas e dos motores de combustão acoplados a geradores de eletricidade. Embora essas novas técnicas aproveitem o CH_4 para a geração de energia elétrica, apresentam baixa eficiência média de transformação de energia, no máximo 25%, e não conseguem a diminuição desejada da poluição atmosférica.

Diante deste cenário, a utilização de Pilhas a Combustível surge como uma alternativa para geração de energia elétrica com uma eficiência média de 40%, além de produzir energia térmica e reduzir, de modo significativo, as emissões.

Denomina-se pilha a combustível, o conjunto de várias células a combustível, que operam “empilhadas” e conjuntamente gerando energia elétrica. Uma célula a combustível é um dispositivo eletroquímico unitário, cujos principais componentes são o ânodo, o cátodo e o eletrólito, todos apropriadamente alojados e em contato. Esse conjunto faz com que a energia das ligações químicas do hidrogênio, no caso proveniente do CH_4 , seja convertida diretamente, por meio de reações eletroquímicas, em energia elétrica, energia térmica e água ao reagir com o oxigênio, proveniente do ar, quando alimentado no compartimento catódico.

Diante desse contexto, o presente trabalho apresenta-se como uma abordagem no sentido do aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários, visando sua aplicação no setor de saneamento ambiental, mais especificamente na utilização da energia elétrica gerada utilizando uma pilha a combustível, para abastecimento de uma estação de tratamento de esgoto.



2. MÉTODOS DE CÁLCULO

2.1. Quantidade de Resíduos

Depositados no Aterro Sanitário

A quantidade de resíduos (Q_R) pode ser calculada a partir da produção de lixo por habitante do município de Campinas de 0,70 kg, a população de 951.824 habitantes, a percentagem de coleta de 98% e a percentagem de reciclagem de 20%, sendo que todos os dados são do ano 1999, segundo Cunha (2002).

2.2. Produção de Biogás

Análise termodinâmica: De acordo com Karsiotis (1981), para determinar a máxima quantidade de CH_4 que pode ser produzido por quilograma de resíduo, considera-se que todo o material orgânico é biodegradável, sendo razoável essa consideração quando a quantidade de material plástico e de metais é baixa em relação aos outros resíduos.

As equações 1 e 2 descrevem os processos de queima e fermentação e servem como base para fazer os cálculos de geração de CH_4 :

Queima



Fermentação



onde,

$$m = x + y, n = 2y$$

Fazendo a subtração das Equações 1 e 2 e considerado ΔH_2 desprezível quando comparado com ΔH_1 , obtém-se a Equação 3 para calcular a quantidade de CH_4 gerado:

$$V_{CH_4} = 0,028 \Delta H_r \quad (3)$$

onde,

V_{CH_4} = volume de CH_4 / kg de resíduo (L/kg);

ΔH_r = poder calorífico do resíduo (kJ/kg).

O volume de CH_4 também pode ser apresentado pela Equação 4, a partir dos valores individuais de poder calorífico de cada substância presente no resíduo (alimentos, papel, madeira, têxteis, plásticos, etc.):

$$V_{CH_4} = 0,028(a_1\Delta H_1 + a_2\Delta H_2 + \dots a_i\Delta H_i) \quad (4)$$

Conforme Karsiotis (1981), a Tabela 1 apresenta os valores de energia de combustão para alguns resíduos sólidos presentes em um aterro sanitário.

Tabela 1 – Poder calorífico dos resíduos.

Resíduo	Poder calorífico (kJ/kg)
Restos de alimento	2.800
Papel e papelão	13.800
Madeira	13.800
Têxteis	15.000
Papelão, madeira, têxteis e plásticos	15.000
Resíduos sólidos *	6.500

* Umidade média de 55%.

Análise química: Segundo Karsiotis (1981), baseado nas reações de biodegradação aeróbica e anaeróbica, pode-se determinar quimicamente a quantidade de gás produzido por quilograma de resíduo, considerando que um mol de carbono presente no resíduo pode gerar um mol de gás, CO_2 ou CH_4 . Conforme Karsiotis (1981), por meio da Equação 5 tem-se o volume total de gás gerado:

$$V_{Total} = 1.868 C_1 \quad (5)$$

onde,

V_{Total} = volume de gás total/kg de resíduo;

C_1 = fração em peso de carbono biodegradável presente no resíduo.



O método para determinar C_1 é dado pela Equação 6:

$$C_1 = C_k C_2 (B_1/B_2) \quad (6)$$

onde,

C_k = fração de carbono no material orgânico combustível seco;

C_2 = fração de material orgânico combustível seco presente no resíduo;

B_1 = fração de substâncias biodegradáveis presentes no resíduo;

B_2 = fração de substâncias combustíveis presentes no resíduo.

A fração C_k pode ser calculada utilizando a Equação experimental 7:

$$C_k = (100\% - \text{Cinzas}) / 2,08 \quad (7)$$

onde,

Cinzas = % de cinzas presentes no material orgânico biodegradável seco.

Os cálculos foram feitos utilizando os valores do trabalho de Cunha (2002), apresentados na Tabela 2, que correspondem aos valores detalhados da composição dos resíduos de municípios de porte médio do Estado de São Paulo.

Cinética de reação: A temperatura afeta o local onde a degradação vai acontecer e a velocidade com a qual a substância é decomposta. Segundo Karsiotis (1981), a influência da variação da temperatura na geração dos gases é dada pela Equação Experimental 8 e a velocidade de produção de gás pela Equação 9:

$$C_e = C_o (0,014 T + 0,28) \quad (8)$$

$$C_e = C_o (1 - e^{-0,07t}) \quad (9)$$

onde,

C_o = carbono total que pode ser biodegradado para produzir gás;

C_e = carbono que pode ser biodegradado com temperatura para produzir gás;

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

t = tempo (anos).

Das equações 8 e 9 obtém-se a Equação 10 para calcular a eficiência de produção de gás levando em conta a temperatura e o tempo de biodegradação:

$$Ef = (0,014 T + 0,28) (1 - e^{-0,07t}) \quad (10)$$

onde,

Ef = Eficiência de produção de gás.

Segundo Cunha (2002), a temperatura média do município de Campinas é de $21,7^{\circ}\text{C}$ durante o ano de 1999 e $21,6^{\circ}\text{C}$ durante os anos de 1960 e 1990.

Tabela 2- Detalhamento qualitativo de resíduos.

Resíduo	T i p o	Massa úmida (%)	Umidade típica (%)	Massa seca (%)	Cinzas
Restos de Alimentos	R	55,0	70,0	16,50	5,0
Papel e papelão	R	21,0	6,0	19,74	6,0
Têxteis	L	5,0	10,0	4,50	2,5
Madeira	L	1,1	20,0	0,88	1,5
Plástico	N	8,9	2,0	8,72	10,0
Vidro	N	2,6	2,0	2,55	---
Metais	N	5,4	2,0	5,29	---
Outros	N	1,0	5,0	0,95	---
Total		100		59,13	

R = Rapidamente biodegradável

L = Lentamente biodegradável

N = Não biodegradável (difícilmente biodegradável)



Metodologia experimental: Conforme Hamada (1997), a quantidade de gás gerado em um aterro sanitário sempre será menor que a quantidade teórica de gases produzidos sob condições ótimas de degradação, pois nem toda a matéria orgânica biodegradável está disponível para decomposição ou não apresenta a temperatura e a umidade ideais para sustentarem as atividades biológicas.

Levando em conta essas considerações, os valores típicos de eficiência de degradação estão na faixa entre 50 e 75% e a geração de gás pela degradação de uma massa unitária de resíduo pode ser determinada pela Tabela 3.

Tabela 3 - Taxa de geração de gás.

Ano	Rapidamente Biodegradável	Lentamente Biodegradável	Total
	m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg
1	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0490	0,0004	0,0494
3	0,0857	0,0011	0,0868
4	0,0612	0,0018	0,0631
5	0,0367	0,0026	0,0393
6	0,0122	0,0033	0,0156
7		0,0035	0,0035
8		0,0031	0,0031
9		0,0028	0,0028
10		0,0024	0,0024
11		0,0020	0,0020
12		0,0017	0,0017
13		0,0013	0,0013
14		0,0009	0,0009
15		0,0006	0,0006
16		0,0002	0,0002
Total	0,2450	0,0277	0,2727

2.3. Potencial Elétrico

O potencial elétrico do sistema é calculado utilizando a Equação 11:

$$P = (Q_T / C) \times P_G \quad (11)$$

onde,

Q_T = Total de gás disponível (m³/h);

C = Consumo de gás do gerador (m³/h);

P_G = Potência do gerador (MW).

De acordo com os trabalhos apresentados por Spiegel et al. (1997) e Spiegel e Preston (2003), uma pilha a combustível de ácido fosfórico, em inglês, "Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC", pode apresentar diferenças significativas na produção de energia elétrica, dependendo da composição média do CH₄ dentro do gás de aterro sanitário.

Os referidos autores mostraram que uma PAFC de 200 kW instalada no aterro sanitário de Penrose-EUA, e que apresenta uma composição média do biogás de 43,9% CH₄, 40,1% CO₂, 15,6% N₂ e 0,4% O₂, pode produzir 137 kW com uma eficiência real de 37%.

Uma outra PAFC de 200 kW instalada no aterro sanitário de Gronton-EUA, apresentando uma composição média do biogás de 57,0% CH₄, 41,3% CO₂, 1,3% N₂, 0,4% O₂, pode produzir 165 kW, com uma eficiência real de 38%. Segundo Spiegel et al. (1999) a recuperação de calor é de 195.000 kcal/h de água a 60°C, equivalentes a 225 kW.

De acordo com os resultados obtidos nos testes das PAFCs nos dois aterros dos EUA o consumo médio de gás é de 135,6 m³/h com um poder calorífico de 4.500 kcal/m³.

2.4. Custo do sistema

Uma aproximação preliminar ao custo do sistema para instalação de uma PAFC de 200 kW foi feita a partir da estimativa de custo do sistema de captação e pré-tratamento de gases de US\$ 350.000, baseada no trabalho de Steinfeld e Sanderson (1998), e do valor comercial da PAFC de US\$ 850.000, Trevisan (2002).

Os cálculos foram feitos sem incluir os custos de importação e fretes e para uma taxa de câmbio do dólar de R\$ 2,50 no segundo semestre de 2002.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resíduos depositados no Delta A

Conforme com os valores apresentados, a produção de resíduos é $Q_R = 190.000$ ton/ano. O valor corresponde ao total de resíduos depositados no aterro sanitário Delta A no ano de 1999.

3.2. Produção de Biogás

Fazendo-se a análise termodinâmica, tem-se o volume de CH_4 , $V_{CH_4} = 149,0$ l/kg, com ΔH dos componentes biodegradáveis. Pela análise das reações de biodegradação, tem-se $V_{CH_4} = 143,9$ l/kg e o volume total de gás, $V_{Total} = 287,7$ l/kg.

Comparando-se V_{Total} com V_{CH_4} , tem-se que a composição de CH_4 está na faixa entre 50 e 52%, que correspondem aos valores encontrados na literatura que se situam entre 35 e 58%, conforme pode ser observado na Tabela 4 de Sandelli e Spiegel (1992).

Tabela 4 - Composição do gás emitido por Aterros Sanitários.

Característica	Faixa	Valor Típico
Poder calorífico (kcal/m ³)	3000-5500	4500
CH ₄ (%)	35 - 58	55
CO ₂ (%)	40 - 55	40
N ₂ (%)	0 - 15	5
O ₂ (%)	0 - 2.5	< 1%
Enxofre (ppmv H ₂ S)	1 - 700	21
Halogênios (ppmv Cl)	132	132
Compostos orgânicos não metânicos, NMOCs (ppmv)	237-14000	2700

Pela análise da cinética das reações e considerando-se 30 anos de produção de gás a partir do ano 1996, obtém-se um fator de

eficiência de 51,2% que corresponde aos valores mencionados por Hamada (1997).

Multiplicando-se Q_R pelo valor de V_{Total} e pelo fator de eficiência, e assumido-se que a percentagem de captação dos gases é de 60%, obtém-se que o potencial total de gás aproveitável no aterro Delta A é $Q_{T1} = 16,8$ milhões m³/ano.

Utilizando-se a método experimental, obtém-se o valor de $Q_{T2} = 16,6$ milhões m³/ano e o gráfico de comportamento da produção de gás durante 30 anos, apresentado na Figura 1.

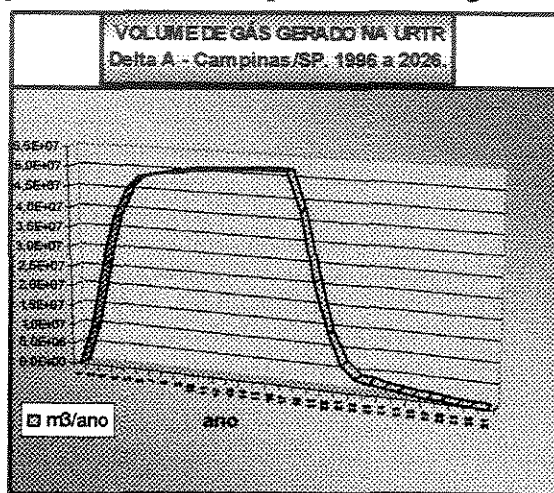


Figura 1 - Geração de gases no aterro Delta A.

O SISTEMA INTEGRADO proposto, apresentado na Figura 2, está constituído pelo Aterro Sanitário Delta A e a Estação de Tratamento de Esgoto, ETE Piçarrão, do Município de Campinas/SP, a Unidade de Pré-tratamento de Gases, UPG desenvolvida e patenteada em EUA por Sandelli et al. (1994) e a Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico, PAFC PC-25™ da ONSI Corporation, constituída por um reformador a vapor, as células a combustível e o conversor de corrente.

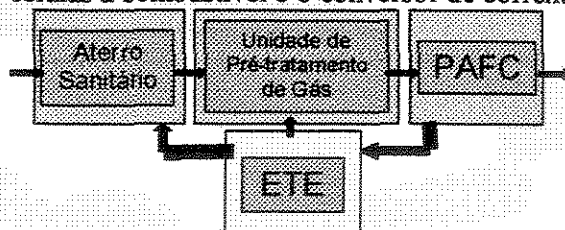


Figura 2 - SISTEMA INTEGRADO.

O gás do aterro sanitário para ser utilizado como combustível da PAFC, tem que ser essencialmente livre dos compostos que contenham hidrocarbonetos pesados, enxofre e halogênios, sendo necessário a instalação de uma unidade de pré-tratamento de gases. De acordo com SPIEGEL et al. (1997), as etapas de pré-tratamento da unidade para o projeto são apresentadas na Figura 3.

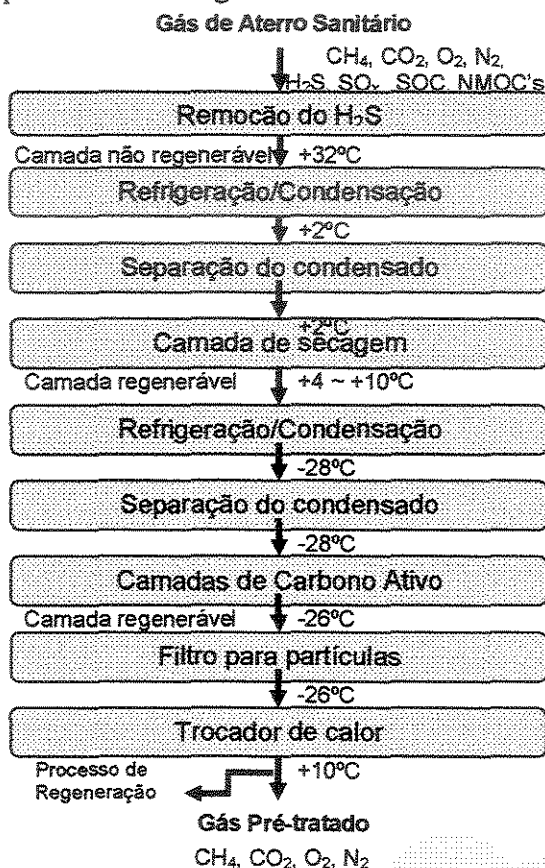


Figura 3 – Etapas de Pré-tratamento do Gás.

Conforme SPIEGEL et al. (1997) e Spiegel e Preston (2003), a eficiência de remoção da Unidade de Pré-tratamento de Gases, UPG, é de 99,8% dos compostos orgânicos não metânicos, NMOC, 99,9% do H_2S e 99,9% HX .

O potencial elétrico total do aterro é de 2,1 MW, calculado a partir do valor médio de $Q_T = 16,5$ milhões m^3 /ano e o do valor médio da energia gerada pela PAFC nos aterros de Penrose e Gronton, $P_G = 151$ kW. Essa última

consideração é justificável porque a percentagem de CH_4 do aterro Delta A é aproximadamente a média da percentagem de CH_4 dos aterros de Penrose e Gronton.

Comparando-se os valores de Q_{T1} e Q_{T2} pode-se concluir que existe uma concordância entre os valores teóricos e experimentais, sendo que ambos os resultados poderiam ser bastante próximos à quantidade real de gás gerado no aterro sanitário Delta A, porque levam em conta os principais aspectos que influenciam a biodegradação.

Finalmente, o custo do sistema é de 15.000 R\$/kW instalado, considerado alto quando comparado com o custo médio para motor de combustão de 2.800 R\$/kW, do trabalho de Cunha (2002). Isso porque a tecnologia das PAFC ainda encontra-se em desenvolvimento e atualmente, não tem produção em grande escala.

4. CONCLUSÕES

Definiu-se o projeto conceitual, baseado em cálculos feitos com metodologias e dados teóricos e experimentais disponíveis a partir de várias fontes, focado em analisar a viabilidade técnica da instalação de pilhas a combustível em aterros sanitários, estudando-se deste modo a possibilidade de se produzir energia elétrica e energia térmica e diminuir-se a intensidade da poluição atmosférica.

As metodologias utilizadas para o cálculo de produção de gás foram consistentes para os resultados obtidos e permitem fazer uma estimativa do potencial energético de um aterro sanitário a partir do conhecimento da composição dos resíduos levando em conta os principais aspectos de biodegradação.

Do SISTEMA INTEGRADO proposto podem-se destacar as seguintes características:

- a geração de energia elétrica através do uso da pilha a combustível para abastecer a planta de tratamento de esgoto;



- além de usar uma tecnologia “recente” na geração de energia, aporta-se um novo estudo na procura de combustíveis alternativos ao petróleo;

- atenuação do impacto ambiental devido à diminuição das emissões de CH_4 e gases tóxicos;

- diminuição das emissões de gases próprios do sistema, devido ao aproveitamento energético mais eficaz, no caso do uso das pilhas a combustível, quando comparados com termoeletricas, motores de combustão e turbinas a gás;

- solução do problema de disposição de lodos gerados na ETE, visando o aumento da quantidade do CH_4 do aterro.

Desde o ponto de vista econômico, apesar de que atualmente o custo do sistema é alto, pode-se esperar que com a diminuição do preço das pilhas a combustível e o aumento do custo da energia elétrica, futuramente o sistema torne-se uma alternativa interessante na geração de energia elétrica.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento da pesquisa e ao centro de tecnologia ambiental do *Imperial College of Science, Technology and Medicine-University of London*, pelo estágio, pelas informações e pelo apoio.

6. BIBLIOGRAFIA

CUNHA, M. **Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: “O caso do município de Campinas – SP”**. 2002. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas.

HAMADA, J. Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1997 Foz de Iguaçu. **Trabalhos Técnicos digital 97**. v.19, 9p. CD-ROM.

KARSIOTIS, N. **A financial feasibility study of methane extraction from the Liosia landfill site**. 1981. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Centre of Environmental Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London UK.

SANDELLI, G. J.; SPIEGEL, R. J. Fuel cell energy recovery from landfill gas. *Journal of Power Sources*, Lausanne, v. 37, n. 2, p. 255-264, Jan. 1992.

SANDELLI, Gregory; SPIEGEL, Ronald; SEDERQUIST, Richard; TROCCIOLA, John; HEALY, Herbert; LISIEUR, Roger; all of conn. **Landfill gas treatment system**. US005451249A. 14 Jun. 1994, 19 Sep. 1995. United States Patent, South Windsor, p. 8.

SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L. Technical assessment of fuel cell operation on landfill gas at the Gronton, CT, landfill. *Energy*, California, v. 28, p. 397-409, Apr. 2003.

SPIEGEL, R. J.; PRESTON, J. L.; TROCCIOLA, J. C. Fuel cell operation on landfill gas at Penrose Power Station. *Energy*, California, v. 24, p. 723-742, Aug. 1999.

SPIEGEL, R. J.; TROCCIOLA, J. C.; PRESTON, J. L. Test results for fuel cell operation on landfill gas. *Energy*, California, v. 22, n. 8, p. 777-786, Aug. 1997.

TREVISAN, E. **Estudo da implementação de pilhas de combustível no Hospital das Clínicas, Unicamp**. 2004. 140 f. Tese (Doutorado) – Ciência e Tecnologia de Materiais, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas.

SISTEMA INTEGRADO PARA APROVEITAMENTO DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO PILHAS A COMBUSTÍVEL

PABLO C. CADAVID P.², WAGNER OLIVEIRA³

Resumo

O crescimento da demanda mundial de energia tem chamado a atenção para o seu impacto sobre os recursos naturais. Adicionalmente, na atualidade existe uma maior preocupação com a contaminação atmosférica decorrente do uso de combustíveis fósseis. Nesse cenário, tem-se estimulado a diversificação das fontes primárias energéticas não poluentes. Uma alternativa é o aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários. Porém, no Brasil, a falta de planejamento faz com que o gás seja liberado diretamente no ambiente ou, na melhor das hipóteses, queimado. Do ponto de vista ambiental, as emissões dos aterros contribuem, além de outros riscos, para o aquecimento global. Assim, o objetivo desta pesquisa é apresentar o Projeto Conceitual Técnico para o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários. O projeto apresenta uma idéia inovadora que consiste em um SISTEMA INTEGRADO da Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR), Unidade de Pré-tratamento de Gases (UPG), Pilha a combustível de Ácido Fosfórico (PAFC) e Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O sistema possibilita o aproveitamento dos gases da URTR e da ETE através da utilização de uma PAFC de 200 kW que apresenta um consumo de 1,1 milhões m³/ano de biogás, sendo que a geração total média do aterro é de 16,4 milhões m³/ano. O total de biogás gerado foi calculado a partir de análises das reações de fermentação, combustão e biodegradação dos resíduos e de metodologias experimentais. Finalmente, concluiu-se que o potencial energético total é de 2,1 MW e 1,95 kcal/h.

Palavras-chave: Biogás, aterro sanitário, pilha a combustível, célula a combustível.

^{2,3} MSc. Pablo C. Cadavid P. e Prof. Dr. Wagner Oliveira. Laboratório de Reatores Eletroquímicos, DTP, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP. Campinas S.P./Brasil xxx 55(19) 3788-3939
pablo@feq.unicamp.br oliveira@feq.unicamp.br

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma revisão geral do Projeto Conceitual Técnico para aproveitamento do biogás gerado na Unidade Receptora e de Tratamento de Resíduos (URTR) Delta A, do Município de Campinas/SP, visando a produção de energia elétrica e a diminuição da poluição atmosférica.

Apresenta-se uma idéia inovadora que consiste em um SISTEMA INTEGRADO da URTR com a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Piçarrão, do mesmo Município. O referido sistema possibilita o aproveitamento do CH_4 através da utilização de uma Pilha a combustível de Ácido Fosfórico, em inglês, *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC) para geração de energia elétrica e térmica e bem como o aproveitamento do CO_2 para neutralização do esgoto alcalino.

Denomina-se pilha a combustível o conjunto de várias células a combustível, que operam “empilhadas” e conjuntamente gerando energia elétrica. Uma célula a combustível é um dispositivo eletroquímico unitário, cujos principais componentes são: ânodo, cátodo e eletrólito. Esse conjunto faz com que a energia das ligações químicas do hidrogênio, no caso proveniente do CH_4 , seja convertida diretamente, por meio de reações eletroquímicas, em energia elétrica, energia térmica e água ao reagir com O_2 , proveniente do ar, quando alimentado no compartimento catódico. No caso das PAFC o eletrólito é ácido fosfórico. Na Figura 1 apresenta-se o esquema da estrutura básica e o mecanismo de funcionamento geral de uma PAFC.

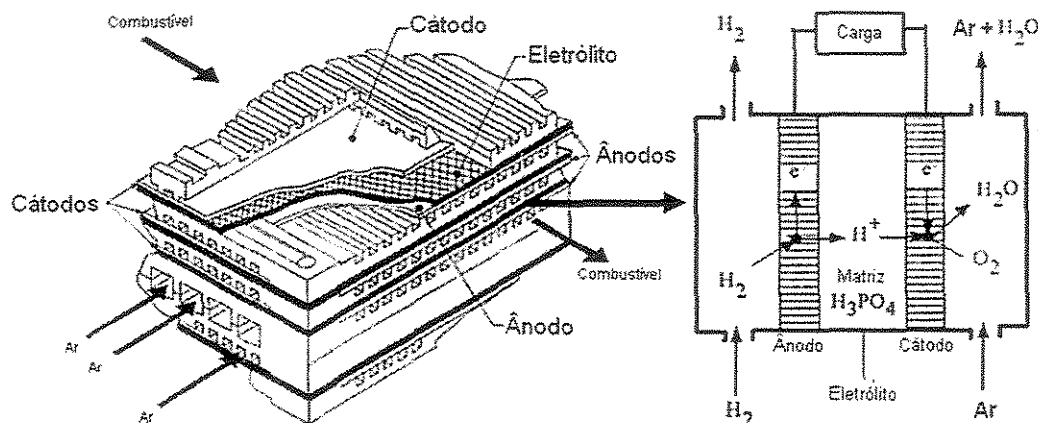


Figura 1 – Esquema da estrutura básica e de funcionamento de uma PAFC.

De acordo com os trabalhos apresentados por Spiegel et al. (1997), Spiegel et al. (1999) e Spiegel e Preston (2003), uma PAFC pode apresentar diferenças significativas na produção de energia elétrica, dependendo da composição média do CH_4 dentro do gás de aterro sanitário. Por exemplo, a PAFC de 200 kW instalada no aterro sanitário de Penrose-EUA, onde o biogás apresenta uma composição média em volume de 43,9% de CH_4 , 40,1% de CO_2 , 15,6% de N_2 e 0,4% de O_2 , produz 137 kW_e/h com eficiência real de 37%. Uma outra PAFC de 200 kW instalada no aterro sanitário de Gronton-EUA, com uma composição média em volume do biogás de 57,0% de CH_4 , 41,3% de CO_2 , 1,3% de N_2 , 0,4% de O_2 , produz 165 kW_e/h , com eficiência real de 38%. Em ambos os casos a recuperação de calor é de 195.000 kcal/h de água a 60°C, equivalentes a 225 kW_t/h e o consumo médio de biogás é de 135,6 m^3/h com um poder calorífico médio de 4.500 kcal/ m^3 .

2. MÉTODOS

2.1. Quantidade de Resíduos Depositados na URTR

A quantidade de resíduos (Q_R) pode ser calculada a partir da produção de resíduos por habitante. No caso do município de Campinas a geração de resíduos por habitante/dia é de 0,70 kg. A população do município é de 951.824 habitantes, a percentagem de coleta de 98% e a percentagem de reciclagem de 20%, sendo que todos os dados são relacionados ao ano de 1999, segundo Cunha (2002).

2.2. Produção de Biogás

2.2.1. Análise termodinâmica

De acordo com Karsiotis (1981), para determinar a máxima quantidade de CH_4 que pode ser produzido por quilograma de resíduo, considera-se que todo o material orgânico é biodegradável, sendo razoável essa consideração quando a quantidade de material plástico e de metais é baixa em relação a outros resíduos. Fazendo-se a subtração das reações de queima e fermentação, considerando-se $\Delta H_{\text{fermentação}}$ desprezível quando comparado com ΔH_{queima} , e levando-se em conta os valores individuais de poder calorífico de cada tipo de resíduo tem-se a Equação [1]:

$$V_{CH_4} = 0,028 (a_1\Delta H_1 + a_2\Delta H_2 + \dots a_i\Delta H_i) \quad [1]$$

onde, V_{CH_4} = volume de CH_4 / kg de resíduo (l/kg);

ΔH_i = poder calorífico de cada tipo de resíduo (kJ/kg).

Conforme Karsiotis (1981), os valores de poder calorífico para alguns resíduos sólidos são: Restos de alimento de 2.800 kJ/kg; papel e papelão de 13.800 kJ/kg; madeira de 13.800 kJ/kg; têxteis de 15.000 kJ/kg; papelão, madeira, têxteis e plásticos juntos de 15.000 kJ/kg, e resíduos sólidos com umidade média de 55% de 6.500 kJ/kg.

2.2.2. Análise química

Segundo Karsiotis (1981), baseando-se nas reações de biodegradação aeróbica e anaeróbica, pode-se determinar quimicamente pela Equação [2] a quantidade total de gás produzida por quilograma de resíduo, considerando-se que um mol de carbono presente no resíduo pode gerar um mol de gás CO_2 ou CH_4 :

$$V_{\text{Total}} = 1.868 C_1 \quad [2]$$

onde, V_{Total} = volume de gás total/kg de resíduo;

C_1 = fração em peso de carbono biodegradável presente no resíduo.

O método para determinar (C_1) é dado pela Equação [3]:

$$C_1 = C_k C_2 (B_1/B_2) \quad [3]$$

onde, C_k = fração de carbono no material orgânico combustível seco;

C_2 = fração de material orgânico combustível seco presente no resíduo;

B_1 = fração de substâncias biodegradáveis presentes no resíduo;

B_2 = fração de substâncias combustíveis presentes no resíduo.

A fração (C_k) pode ser calculada utilizando-se a Equação experimental [4]:

$$C_k = (100\% - \text{Cinzas}) / 2,08 \quad [4]$$

onde, Cinzas = % de cinzas no material orgânico biodegradável seco.

Os cálculos foram feitos utilizando-se os valores do trabalho de Cunha (2002), apresentados na Tabela 1 que correspondem aos valores detalhados da composição dos resíduos de municípios de porte médio do Estado de São Paulo.

Tabela 1- Detalhamento qualitativo de resíduos.

Resíduo	Velocidade de degradação	Massa úmida (%)	Umidade típica (%)	Massa seca (%)	Cinzas
Restos Alimentos	Rápida	55,0	70,0	16,50	5,0
Papel e papelão	Rápida	21,0	6,0	19,74	6,0
Têxteis	Lenta	5,0	10,0	4,50	2,5
Madeira	Lenta	1,1	20,0	0,88	1,5
Plástico	Muito lenta	8,9	2,0	8,72	10,0
Vidro	Muito lenta	2,6	2,0	2,55	---
Metais	Muito lenta	5,4	2,0	5,29	---
Outros	Muito lenta	1,0	5,0	0,95	---

2.2.3. Cinética de reação

A temperatura afeta o local onde a degradação vai ocorrer e a velocidade com a qual a substância é decomposta. Segundo Karsiotis (1981), a influência da variação da temperatura na geração dos gases e a velocidade de produção de gás estão dadas pelas Equações experimentais [5] e [6] respectivamente:

$$C_e = C_o (0,014 T + 0,28) \quad [5]$$

$$C_e = C_o (1 - e^{-0,07 t}) \quad [6]$$

onde, C_o = carbono total que pode ser biodegradado para produzir gás;

C_e = carbono que pode ser biodegradado com temperatura para produzir gás;

T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

t = tempo (anos).

Das Equações [5] e [6] obtém-se a eficiência de produção de gás levando-se em conta a temperatura e o tempo de biodegradação. Segundo Cunha (2002), a temperatura média do município de Campinas entre 1960 e 1990 foi de $21,7^{\circ}\text{C}$.

2.2.4. Metodologia experimental

Conforme Hamada (1997), a quantidade de gás gerado em um aterro sanitário sempre será menor que a quantidade teórica de gases produzidos sob condições ótimas de degradação, pois nem toda a matéria orgânica biodegradável está disponível para decomposição ou não apresenta a temperatura e a umidade ideais para sustentarem as atividades biológicas.

Fazendo-se tais considerações, os valores típicos de eficiência de degradação ficam estabelecidos entre 50 e 75% e a geração de gás pela degradação de uma massa unitária de resíduo pode ser determinada pela Tabela 2.

Tabela 2 - Taxa de geração de gás.

Ano	Biodegradação		Total m ³ /kg	Ano	Biodegradação		Total m ³ /kg
	Rápida m ³ /kg	Lenta m ³ /kg			Rápida m ³ /kg	Lenta m ³ /kg	
1	0,0000	0,0000	0,0000	9	—	0,0028	0,0028
2	0,0490	0,0004	0,0494	10	—	0,0024	0,0024
3	0,0857	0,0011	0,0868	11	—	0,0020	0,0020
4	0,0612	0,0018	0,0631	12	—	0,0017	0,0017
5	0,0367	0,0026	0,0393	13	—	0,0013	0,0013
6	0,0122	0,0033	0,0156	14	—	0,0009	0,0009
7	—	0,0035	0,0035	15	—	0,0006	0,0006
8	—	0,0031	0,0031	16	—	0,0002	0,0002
—	—	—	—	Total	0,2450	0,0277	0,2727

2.3. Potencial Elétrico

O potencial elétrico do sistema é calculado utilizando-se a Equação [7]:

$$P = (Q_T/C) \times P_G$$

[7]

onde, Q_T = Total de gás disponível (m³/h);

C = Consumo de gás do gerador (m³/h);

P_G = Potência do gerador (MW).

3. RESULTADOS

3.1. Resíduos Depositados no Delta A

Conforme com os valores apresentados, a quantidade de resíduos sólidos (Q_R) depositados na URTR Delta A no ano de 1999 foi de 190.000 ton.

3.2. Produção de Biogás

Utilizando-se a Equação [1], tem-se que o volume de CH₄ (V_{CH_4}) é de 149,0 l/kg, com ΔH dos componentes biodegradáveis. Através da Equação [2], tem-se o volume total de gás (V_{Total}) igual a 287,7 l/kg. Utilizando-se as Equações [3] e [4] e, considerando-se 30 anos de produção de gás a partir do ano 1996, obtem-se um fator de eficiência de 51,2%.

Multiplicando-se Q_R pelo valor de V_{Total} e pelo fator de eficiência, e assumido-se que a percentagem de captação dos gases é de 60%, obtem-se que o potencial total de gás aproveitável no aterro Delta A (Q_{T1}) representa 16,8 milhões m³/ano. Utilizando-se a método experimental, tem-se o valor de (Q_{T2}) de 16,6 milhões m³/ano e o gráfico de produção de gás durante 30 anos, apresentado na Figura 2.

3.3. Produção de Energia Elétrica e Térmica

O potencial elétrico total do aterro é de 2,1 MW, calculado a partir do valor médio de Q_T = 16,7 milhões m³/ano e o do valor médio da energia gerada pela PAFC nos aterros de Penrose e Gronton. Tal consideração é justificável porque a percentagem de CH₄ do aterro Delta A aproxima-se aos valores médios da percentagem de CH₄ dos aterros de Penrose e Gronton.

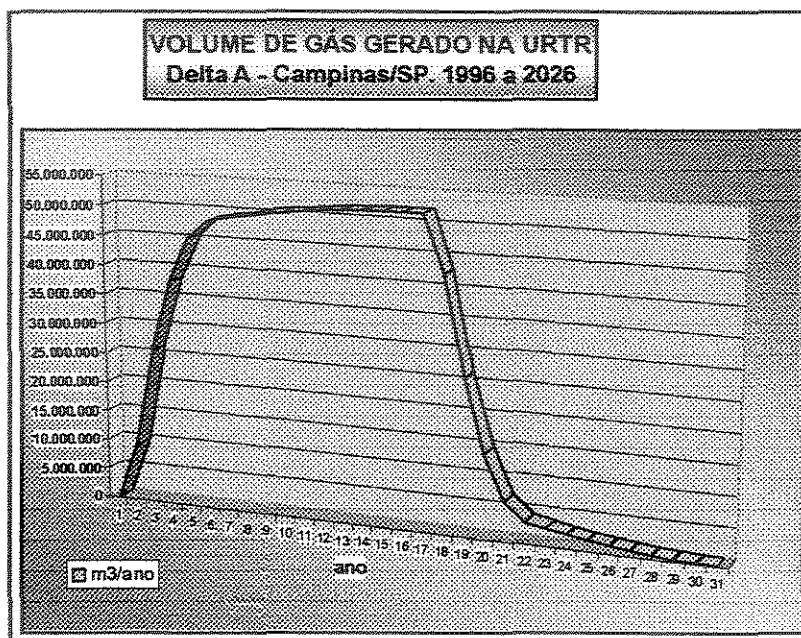


Figura 2 – Geração de gases no aterro Delta A.

3.4. Sistema Integrado

A idealização e a concepção do Sistema Integrado proposto neste trabalho começaram a partir da idéia de aproveitamento energético do gás de aterro sanitário utilizando a tecnologia de pilhas a combustível, apresentando todos os detalhes técnicos para tal propósito.

Além do aspecto puramente técnico, a premissa anterior foi desenvolvida levando-se em conta outros dois aspectos importantes: Primeiro, o aspecto econômico, visando maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis em cada uma das etapas, diminuir o custo de operação e aumentar os benefícios do sistema. Segundo, o aspecto ambiental, buscando minimizar o impacto do sistema como um todo.

Chama-se de Sistema Integrado à utilização do gás gerado na URTR, tanto para geração de energia elétrica, no caso do CH_4 , quanto para a neutralização de esgoto alcalino, no caso do CO_2 , sendo ambos os produtos aproveitados no abastecimento da ETE. Além disso, a integração permite também que, futuramente, os gases e os lodos gerados nos biodigestores da ETE sejam aproveitados dentro do mesmo sistema. Na Figura 3 apresenta-se um diagrama do Sistema Integrado.

A utilização de PAFC faz com que seja necessária a instalação de uma UPG, devido à existência na composição do gás de aterro de produtos que podem desativar os catalisadores do sistema de reforma e das células a combustível ou ainda, apresentar forte potencial corrosivo diminuindo a vida útil dos equipamentos. A UPG desenvolvida e patenteada em EUA por Sandelli et al. (1994) é apresentada na Figura 4.

Para maximizar o aproveitamento da energia elétrica e da energia térmica geradas pela pilha a combustível e, baseados no trabalho de LUNGHI et al. (2004) é proposto o *Lay Out* do conjunto UPG/Reformador/PAFC apresentado na Figura 5.

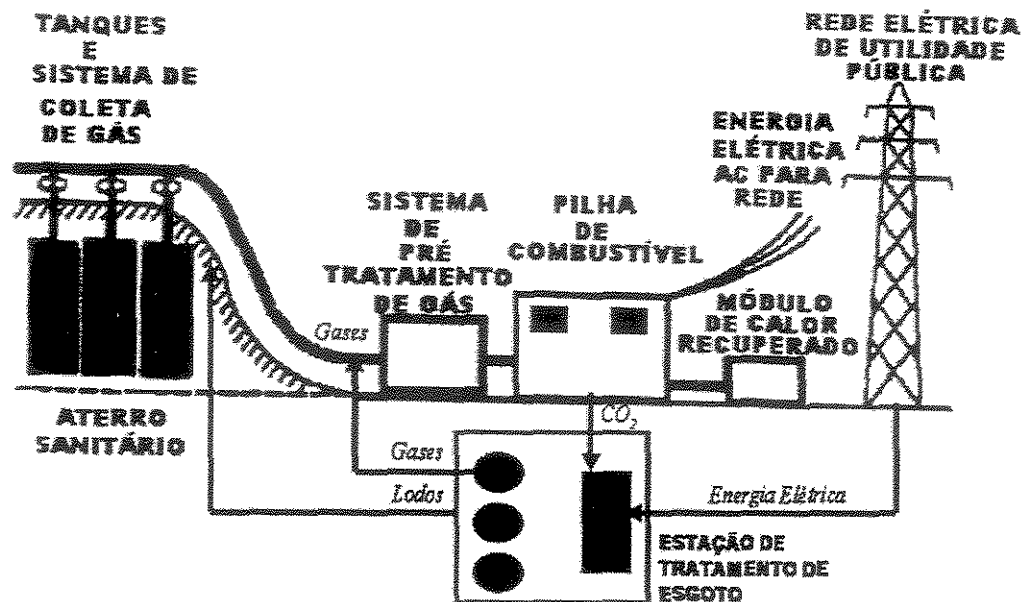


Figura 3 - Esquema geral do Sistema Integrado.

UPG

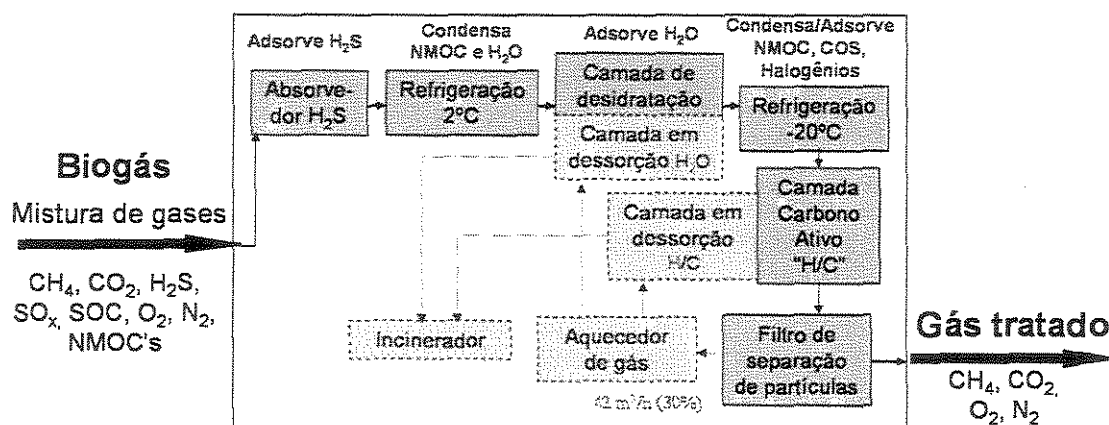


Figura 4 - Diagrama da UPG

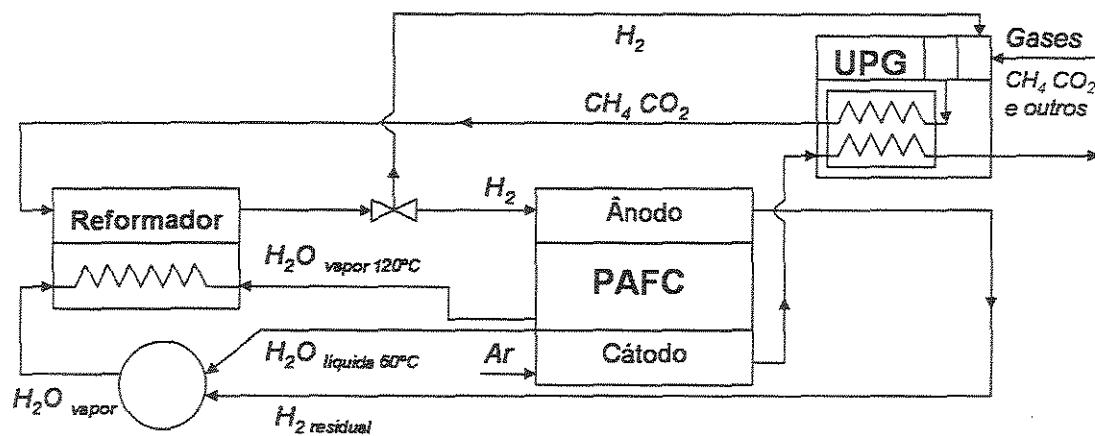


Figura 5 - Diagrama UPG, Reformador e PAFC

Finalmente, na ETE será necessária a instalação de um Reator de Neutralização de Esgoto Alcalino (RNEA) para aproveitamento do CO_2 , definido conforme o trabalho de SCHWARZLMÜLLER (2001) e apresentado na Figura 6.

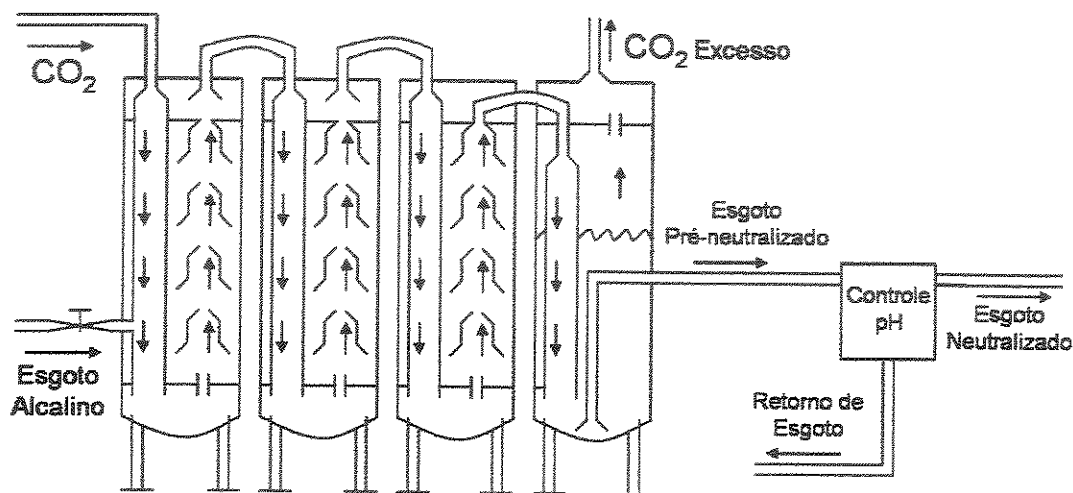


Figura 6 - Reator de neutralização

4. DISCUSSÃO

Comparando-se V_{Total} com V_{CH_4} , tem-se que a composição de CH_4 é 51,8%, que corresponde aos valores encontrados na literatura que se situam entre 35 e 58%. O fator de eficiência de biodegradação calculado de 51,2% corresponde aos valores mencionados por Hamada (1997) situam-se entre 50 e 75%.

Comparando-se os valores de Q_{T1} e Q_{T2} pode-se concluir que existe uma concordância entre os valores teóricos e experimentais, sendo que ambos os resultados são próximos à quantidade real de gás gerado na URTR Delta A, já que as duas metodologias levam em conta os principais aspectos que influenciam os processos de biodegradação e produção de biogás.

Do SISTEMA INTEGRADO proposto pode-se destacar as seguintes características:

- a geração de energia elétrica através do uso da pilha a combustível para abastecer a planta de tratamento de esgoto;
- constitui uma tecnologia "recente" na geração de energia, aporta-se um novo estudo na procura de combustíveis alternativos ao petróleo;
- diminuição das emissões de gases próprios do sistema, devido ao aproveitamento energético mais eficaz, no caso do uso das pilhas a combustível, quando comparados com termoeletrônicas, motores de combustão e turbinas a gás;
- solução do problema de disposição de lodos gerados na ETE, visando o aumento da quantidade do CH_4 do aterro.

Do ponto de vista ambiental, apresenta-se uma atenuação significativa das emissões responsáveis pelo efeito estufa devido ao aproveitamento do CH_4 e parte do CO_2 . Além disso, a eficiência de remoção da UPG é de 99,8% dos compostos orgânicos não metânicos, NMOC, 99,9% do H_2S e 99,9% HX, diminuindo significativamente a emissão de gases tóxicos.

5. CONCLUSÕES

Definiu-se o projeto conceitual, baseado em cálculos feitos com metodologias e dados teóricos e experimentais disponíveis. Tendo como enfoque, a análise dos aspectos técnicos da instalação de pilhas a combustível em aterros sanitários. A relevância deste projeto está na possibilidade de se produzir energia elétrica e energia térmica e diminuir-se a intensidade da poluição atmosférica.

As metodologias utilizadas para o cálculo de produção de gás foram consistentes e a coerência dos resultados obtidos mostrou ser possível fazer-se uma estimativa do potencial energético de um aterro sanitário a partir do conhecimento da composição dos resíduos, levando em conta os principais aspectos de biodegradação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento da pesquisa, ao centro de tecnologia ambiental do *Imperial College of Science, Technology and Medicine-University of London*, pelo estágio, informações e apoio e à empresa EUROTEx Colômbia S.A. pelas informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CUNHA, M. Análise do setor de saneamento ambiental no aproveitamento energético de resíduos: "O caso do município de Campinas – SP". 2002. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas.
- HAMADA, J. Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1997 Foz de Iguaçu. Trabalhos Técnicos digital 97. v.19, 9p. CD-ROM.
- KARSITIS, N. A financial feasibility study of methane extraction from the Liosia landfill site. 1981. 144 f. Report (MSc degree) – Centre of Environmental Technology, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London UK.
- LUNGHI, P.; BOVE, R.; DESIDERI, U. Life-cycle-assessment of fuel-cells-based landfill-gas energy conversion technologies. *Journal of Power Sources*, Perugia, v. 131, p. 120-126, Mar. 2004.
- SANDELLI, Gregory; SPIEGEL, Ronald; SEDERQUIST, Richard; TROCCIOLA, John; HEALY, Herbert; LISIEUR, Roger, all of conn. Landfill gas treatment system. US005451249A. 14 Jun. 1994, 19 Sep. 1995. United States Patent, South Windsor, p. 8.
- SCHWARZLMÜLLER, A. . Neutralización de aguas residuales con CO₂. Aspectos para la neutralización anticontaminante y económica de aguas residuales alcalinas en el acabamiento textil y otros. EUROTEx Colombia S.A. G&S, GmbH & Co, n.1, p.61-64. 2001.

SPIEGEL, R. J; PRESTON, J. L. Technical assessment of fuel cell operation on landfill gas at the Gronton, CT, landfill. Energy, California, v. 28, p. 397-409, Apr. 2003.

SPIEGEL, R. J; PRESTON, J. L; TROCCIOLA, J. C. Fuel cell operation on landfill gas at Penrose Power Station. Energy, California, v. 24, p. 723-742, Aug. 1999.

SPIEGEL, R. J; TROCCIOLA, J. C; PRESTON, J. L. Test results for fuel cell operation on landfill gas. Energy, California, v. 22, n. 8, p. 777-786, Aug. 1997.

Abstract

The world increase of the energy demand has been getting the attention for the impact on the natural resources. Additionally, today there is a concern with the atmospheric contamination due to the use of fossil fuels. In this scenery, the diversification of the energy primary sources no pollutant has been stimulating. An alternative is the energy use of the landfill gas. However, in Brazil, the gas is liberated directly in the atmosphere or, in the best of the hypothesis, burned. From the environmental point, the emissions of the landfill contribute, besides other risks, for the global warming. Like this, the objective of this research is to present the Conceptual and Technical Project for energetic use of landfill gas. This project presents an innovative idea that consists of an INTEGRATED SYSTEM of the Landfill (LF), Gas Cleanup System (GCS), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) and Waste Water Treatment (WWT). This system makes possible to recovery the landfill gases and digester gases by PAFC technology. The PAFC requires $1,1 \times 10^6$ m³/year of gas. The total landfill gas generation is $16,4 \times 10^6$ m³/year. The total gas generated was calculated by analysis of fermentation and combustion reactions, analysis of biodegradation and experimental methodologies. Finally, it was concluded that the total potential energy is about 2,1 MW and 1,95 kcal/h.

Key Words: landfill, landfill gas, fuel cell, PAFC.