ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA ENERGIA DO BIOGÁS NA
INCINERAÇÃO DO CHORUME EM ATERROS
SANITÁRIOS – ELIMINAÇÃO SIMULTÂNEA DE DUAS
FONTES POLUENTES – GASOSA E LÍQUIDA

DEDALUS - Acervo - EESC

31100047204

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 06.10.2004

Ass: Leandro Corioli

Carlos Roberto Regattieri

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Josmar D. Pagliuso

São Carlos

2003

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CARLOS ROBERTO REGATTIERI**

Dissertação defendida e julgada em 08-12-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **JOSMAR DAVILSON PAGLIUSO** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Assoc. **VALDIR SCHALCH**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **WALDIR ANTONIO BIZZO**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À minha esposa Silvia.

Aos meus filhos Rafael, Felipe e
aos meus pais Mazinho e Lída.

Ao Prof. Dr. Josmar D. Pagliuso, amigo
e companheiro, muito obrigado pela orientação
e amizade dispensada ao longo deste trabalho.

A DEUS
A HONRA, A GLÓRIA E A FORÇA.

Agradeço:

A Prof^a Célia Regina Pereira de Souza Gabriel, pela compreensão, companheirismo e pela visão educadora que lhe é peculiar.

Aos Professores do NETeF, os quais acrescentaram conhecimentos a este trabalho.

Aos Colegas Marcelo, Keyll, Manoel, Julio, Valdir e Fábio pelo companheirismo e apoio durante este trabalho.

A Jorge Nicolau dos Santos e Hélio José Donizete Terbi, na contribuição para o desenvolvimento da sonda.

A colega Ms Ana Paula Duarte Seleglim pela contribuição para o desenvolvimento do trabalho experimental.

SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii

CAPÍTULO – 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Impactos no Ambiente	1.5
1.2 – Objetivos deste Trabalho	1.4
1.3 – Bibliografia	1.5

CAPÍTULO – 2

ESTADO DA ARTE

2.1 – Efeito Estufa Antropogênico	2.1
2.2 – A Produção de Resíduos Sólidos	2.5
2.3 – Biogás	2.5
2.4 – Metano (CH ₄)	2.6
2.4.1 – Fontes de Emissões de Metano	2.8
2.4.2 – Distribuição Global das Fontes de Metano	2.9
2.4.3 – Sumidouros de Metano	2.10
2.5 – Chorume	2.11
2.6 – Incineração	2.15
2.7 – Produtos da Combustão Incompleta - PCI	2.19
2.7.1 – CPAs (Compostos Policíclicos Aromáticos)	2.19
2.8 – Dioxinas e Furanos	2.21
2.8.1 – Características de Dioxinas e Furanos	2.22
2.8.2 – Fontes de Dioxinas e Furanos	2.23
2.9 – Recuperação de Energia na Incineração	2.25
2.10 – Limites de Emissões para a Incineração de Resíduos Sólidos	2.27

2.11 – Bibliografia	2.28
---------------------	------

CAPÍTULO – 3

EXPERIMENTAL

3.1 – Descrição Geral do Aterro Sanitário	3.1
3.1.1 – Localização e Acesso	3.2
3.1.2 – Tipo de Aterro	3.2
3.1.3 – Área	3.4
3.1.4 – Topografia	3.4
3.1.5 – Idade	3.4
3.1.6- Quantidade de Lixo Gerado	3.5
3.1.7 – Memorial Descritivo do Aterro Sanitário	3.5
3.1.7.1 – Instalações de Apoio	3.5
3.1.7.2 – Sistema de Drenagem de Líquidos Percolados	3.6
3.1.7.3 – Sistema de Tratamento de Líquidos Percolados	3.6
3.1.7.4 – Sistema de Drenagem de Gases	3.6
3.1.7.5 – Corte esquemático do Aterro Sanitário	3.7
3.2 – Metodologia	3.9
3.3 – Coleta de Amostras	3.9
3.4 – Vazão do Chorume	3.11
3.5 – Vazão do Biogás	3.12
3.5.1 – Calibração da Sonda para Medida da Vazão do Biogás	3.14
3.5.2 – Calibração da Sonda de Vazão	3.15
3.5.3 – Vazão Medida	3.16
3.6 – Propriedades do Chorume	3.16
3.6.1 - Poder Calorífico do Chorume	3.16
3.6.2 - Análise de Metais Pesados	3.17
3.6.2.1 – Resultados da Análise de Metais Pesados	3.18
3.6.3 – Presença de Elementos Formadores de Gases Ácidos e Cinzas	3.18
3.6.4 – Micro Filtração de Chorume	3.19
3.7 – Composição do Biogás	3.20
3.8 – Energia Disponível	3.21

3.9 – Bibliografia	3.25
--------------------	------

CAPÍTULO – 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Vazão do Chorume	4.1
4.2 – Vazão do Biogás	4.3
4.2.2 – Vazão Medida	4.3
4.3 – Composição Química	4.4
4.3.1 – Composição Química do Chorume	4.4
4.3.2 – Composição Química do Biogás	4.5
4.4 – Outras Propriedades	4.6
4.4.1 – Poder Calorífico do Chorume Microfiltrado	4.7
4.4.2 – Valor do pH	4.8
4.4.3 – Umidade	4.8
4.5 – Disponibilidade de Energia	4.8
4.6 – Potencial de Emissões	4.12
4.6.1 – Cálculo da Emissão de Poluentes	4.12
4.6.2 – Limites de Emissões Legais	4.17
4.7 – Bibliografia	4.19

CAPÍTULO – 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões	5.1
5.2 – Sugestões	5.3

ANEXO I

ANEXO II

ANEXO III

RESUMO

Este trabalho foi realizado junto ao NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da EESC/USP e ao aterro Sanitário “Fazenda Guaporé” em São Carlos, e teve como objetivo a verificação da viabilidade energética e ambiental do tratamento do chorume através da sua incineração com o biogás produzido pelo aterro, eliminando-se desta forma também o metano, reconhecido como gás estufa. Determinou-se experimentalmente a composição do biogás e calculou-se e mediu-se a sua vazão. As propriedades físico-químicas e a vazão do chorume também foram quantificadas. A vazão de gás foi calculada com informações obtidas da literatura e medida experimentalmente com uma sonda especialmente desenvolvida neste trabalho. Para determinar a aplicabilidade do conceito fez-se um balanço energético para verificar a disponibilidade de energia e um balanço químico, para determinar o potencial de emissão de poluentes do ar. Os resultados indicaram que há mais energia presente no gás do que a energia requerida para incinerar o chorume, embora a diferença seja pequena e deva ser vista com cautela. O balanço químico mostrou em geral um potencial poluidor abaixo das emissões permitidas pela legislação, embora em alguns casos isto não tenha ocorrido.

PALAVRAS- CHAVE : chorume; aterro sanitário; biogás; efeito estufa.

ABSTRACT

This work was developed at the NETeF (Thermal Engineering and Fluids Group) at EESC/USP, Sao Carlos, SP, and the local landfill “Guapore Farm”. It was aimed to the treatment of the “chorume” through its incineration with the biogas produced in the landfill, this way eliminating also the methane, the second most important greenhouse gas according to IPCC. The composition and flow rate of the biogas were determined by calculations and experimentaly and the same was done with the chorume. The gas flowrate was calculated using data available in the literature and measured with a probe specially developed in this work. To evaluate the feasibility of the concept it was done a balance of energy to verify if the energy of the gas was enough to the chorume thermal destruction and a chemical balance to determinate the potential of emission of air pollutants. The results have shown that there is more energy available than it is required for that purpose but they should be considered with some caution given the small diference between the required and produced energy and the uncertainties in the measurements and evaluations. The chemical balance has shown that, in general, the potential for emissions was bellow the legally stablshed limits although in a few cases it was above.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO – 2

Figura 2.1 – Balanço energético da Terra	2.2
Figura 2.2 – Formação do metano em um aterro	2.7
Figura 2.3 – Vista das lagoas de chorume do aterro sanitário de São Carlos	2.14
Figura 2.4 – Processos de uma instalação de incineração	2.16
Figura 2.5 – Estrutura de dioxinas e furanos	2.22

CAPÍTULO – 3

Figura 3.1 – Vista geral do aterro sanitário	3.1
Figura 3.2 – Área em planta dos sub-aterro AS-1 e AS-2	3.3
Figura 3.3 – Queimador de biogás	3.7
Figura 3.4 – Corte esquemático de um Aterro Sanitário	3.8
Figura 3.5 – Detalhe da lagoa de chorume, utilizada para coleta de amostras	3.10
Figura 3.6 – Captação do biogás para análise e composição química	3.11
Figura 3.7 – Detalhe da Sonda	3.12
Figura 3.8 – Detalhe da Sonda – fio de níquel cromo	3.13
Figura 3.9 – Vista da Sonda	3.13
Figura 3.10 – Esquema da bancada de calibragem da Sonda	3.15
Figura 3.11 – Valores obtidos na calibração da sonda para as placas de orifício.	3.16
Figura 3.12 - Calorímetro C 5000 – IKA Labortechnik (IKA – labortechnik C 5000 control)	3.17
Figura 3.13 - Esquema geral do processo de micro-filtração	3.19
Figura 3.14 - Escoamento de mistura com sólido em suspensão no tubo poroso.	3.20
Figura 3.15 – Esquema do volume de controle para o cálculo do balanço de energia	3.21

CAPÍTULO – 4

Figura 4.1 – Vazão de chorume no período de Janeiro a Agosto de 2002	4.3
--	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO – 2

Tabela 2.1 – Percentual de contribuição para o forçamento radioativo de alguns gases presentes na atmosfera	2.3
Tabela 2.2 - Valores do potencial de aquecimento global (PAG) – IPCC, 2001	2.4
Tabela 2.3 – Porcentagens dos componentes do biogás no interior e superfície do aterro sanitário	2.6
Tabela 2.4 – Fontes globais de emissão de CH ₄ para a atmosfera	2.9
Tabela 2.5 - Ions que podem ser encontrados no chorume	2.12
Tabela 2.6 - Quantidades de contaminantes normalmente encontrados no chorume provenientes de aterros sanitários	2.13
Tabela 2.7 – Exemplos de CPA	2.20
Tabela 2.8 – Fatores de equivalência de toxicidade para dioxinas e furanos, relativos ao 2,3,7,8 – TCDD	2.23
Tabela 2.9 – Limite legais de emissões estabelecidos pela CETESB para instalações de incineração.	2.27

CAPÍTULO – 3

Tabela 3.1 – Capacidade volumétrica e vida útil do aterro sanitário	3.4
Tabela 3.2 – Porcentagens da mistura chorume etanol	3.17

CAPÍTULO – 4

Tabela 4.1 – Vazão do chorume de Janeiro a Agosto do ano de 2002 (m³/hora)	4.2
Tabela 4.2 – Valores encontrados na leitura dos queimadores	4.3
Tabela 4.3 – Principais elementos químicos e cinzas encontrados nas amostras de chorume	4.5
Tabela 4.4 - Teores de metano, dióxido de carbono e nitrogênio do biogás produzido no aterro e na lagoa de chorume	4.6
Tabela 4.5 – Poder calorífico do etanol	4.7
Tabela 4.6 – Poder calorífico de misturas de chorume e etanol (kJ/kg)	4.7
Tabela 4.7 – Resultados da microfiltração do chorume (kJ/kg)	4.8
Tabela 4.8 – Entalpias de formação e correções para os reagentes a 25 °C e 0,1 Mpa.	4.9
Tabela 4.9 – Entalpias de formação e correções para os produtos a 900 °C e 0,1 Mpa.	4.10
Tabela 4.10 – Comparação dos valores encontrados com a legislação	4.18

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1 – Impactos no Ambiente

Vivemos numa sociedade que estimula o consumo e a produção em grande escala. A filosofia do descartável e do excesso de embalagens predomina em diversos setores do mercado o que significa diretamente mais rejeitos. O Brasil produz aproximadamente 240 mil toneladas de lixo por dia, com um crescimento anual em torno de 5%, na quantidade de lixo gerado o que significa que, mantida a taxa, este volume dobra a cada 14 anos. Grande parte do lixo ainda não é coletado, permanecendo junto às residências. A produção de lixo “per capita” hoje é aproximadamente 1kg/hab/dia [2] e há poucos aterros controlados no Brasil. Este valor tende a crescer, tornando a problemática do lixo de difícil manejo e legitimando a necessidade de buscar alternativas eficazes e custo-efetivas.

Problemas sérios causados pela precária disposição final do lixo são a disseminação de doenças, a contaminação do solo e das águas subterrâneas por percolado (chorume), a poluição do ar pelo gás metano (efeito estufa) e por outros gases de forte odor, como o sulfeto de hidrogênio e as mercaptanas e a falta de espaço para o armazenamento do resíduo.

O resíduo urbano é rico em matéria orgânica, que em contato com o ar começa a sofrer um processo de oxidação, iniciando a degradação progressiva do material. Esse processo é agilizado pela presença de bactérias anaeróbias nas camadas internas do depósito que ajudam na deterioração do material.

A decomposição dos resíduos resulta na produção de gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e outros gases traços que produzem um forte e desagradável odor. Destes gases, o CH_4 e o CO_2 são os mais preocupantes, pois são gases estufa, isto é, gases capazes de absorver energia eletromagnética na mesma faixa

do infra-vermelho em que a Terra emite energia para o espaço para manter seu equilíbrio térmico (“janela de emissão”).

Ao contrário do que ocorre nas emissões de veículos e de fontes estacionárias que queimam combustíveis fósseis e onde predomina o efeito do CO_2 , nos gases dos aterros o CH_4 tem uma contribuição muito mais significativa. Isto se dá tanto em razão de, molécula por molécula, este gás ter um efeito estufa cerca de vinte vezes maior do que o do CO_2 como em razão de sua maior fração no biogás. A combustão do biogás em “flares”, as vezes feita nos aterros, não é suficiente para eliminar o problema, pois é uma queima sem controle e portanto pouco eficiente. Além disso há vazamentos pela superfície do aterro e nas lagoas de chorume.

Note-se que CH_4 , CO_2 , N_2O e outros gases absorvedores no infra-vermelho - dos quais o mais importante é o próprio vapor de água - existem na atmosfera do planeta há milhões de anos e de fato produzem uma temperatura média (15°C) muito mais amena do que seria possível na sua ausência. Um cálculo simples mostra que se a Terra fosse um corpo negro desprovido desta camada gasosa, sua temperatura média seria cerca de vinte graus mais baixa do que realmente é. Ocorre porém que nos últimos duzentos anos a concentração de CO_2 e CH_4 e outros gases vem sendo alterada de maneira significativa pelas emissões humanas.

O IPCC mostra em seu relatório de 2001 uma elevação da temperatura média em $0,6^\circ\text{C}$ no últimos cem anos. Para colocar este número em perspectiva, pode-se compará-lo com a diferença entre a temperatura do período interglacial atual e a de um período glacial pleno quando o gelo permanente cobre a maior parte da Europa e da América do Norte, que é de cerca de 6°C . A utilização da energia contida nos gases originados nos processos de tratamento de resíduos tais como lixo, esgoto e outros é factível [1] e deve, na medida do possível, ser implementada para reduzir a contribuição destes gases para a mudança climática.

Aterros sanitários produzem ainda um efluente líquido, o chorume, que é definido pela ABNT como: “líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO; se constitui numa mistura de substâncias inorgânicas, compostos em solução e em estado coloidal, metais e diversas espécies de microorganismos”. Este efluente pode contaminar o solo, as águas subterrâneas e os seres vivos que com ele tiverem contato.

Projetos de educação ambiental desenvolvidos pelos Órgãos Governamentais aplicados na Rede Estadual de Educação, demonstram resultado positivo na conscientização da sociedade para reduzir a produção de resíduos sólidos. A criação de medidas tais como, incrementar a assessoria aos municípios oferecendo alternativas tecnológicas mais adequadas, auxiliar na escolha de áreas, simplificar o licenciamento ambiental e trabalhos na formulação e implementação da Política Estadual do Meio Ambiente, devem também vir acompanhadas de iniciativa de educação ambiental de modo a conscientizarem a população em geral sobre a importância de tais ações.

A conjugação de esforços entre a iniciativa privada, o meio acadêmico e o governo pode promover o aproveitamento energético do metano gerado pela decomposição dos resíduos, contribuindo para reduzir a emissão deste gás que contribui para a mudança do clima e viabilizando o emprego desta energia renovável para a eliminação de uma outra fonte de poluentes, o chorume.

1.2 – Objetivos deste Trabalho

Este trabalho realizado junto ao NETeF – Núcleo de Engenharia Térmica e de Fluidos da EESC/USP em São Carlos e ao aterro sanitário da cidade, tem como objetivo avaliar a possibilidade e estabelecer os meios para o tratamento do chorume através de sua incineração limpa, utilizando como fonte energética o metano do biogás produzido pelo aterro sanitário. Busca-se desta forma a eliminação simultânea de duas fortes fontes de poluentes.

Isto inclui:

- Determinação da vazão de chorume e de sua sazonalidade;
- Realização do balanço energético metano/chorume;
- Estimativa do potencial poluidor dos produtos da incineração do chorume;
- Desenvolvimento de uma sonda capaz de medir a vazão de biogás sem interferir no processo;
- Estimativa da vazão de biogás.

1.3 – Bibliografia

[1] PAGLIUSO, J.D.; PASSIG, F.H.; VILLELA, L.C.H. Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants. In: TALLER Y SYMPOSIUM LATINO AMERICANO SOBRE DIGESTION ANAEROBIA, 7., 2002, Mérida ,México. *Proceedings...* México: IWA, 2002. p.96-110.

[2] PACEY, J.G. (1986). The Factors influencing landfill gas production. In: ENERGY FROM LANDFILL GAS CONFERENCE, 1986., Solihull. *Proceedings...* England: Elsevier. p.51-59.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE

2.1 – Efeito Estufa Antropogênico

A temperatura média próxima à superfície da Terra seria cerca de 17°C abaixo de zero, em função do processo natural de seu balanço energético com o sol, a atmosfera e o espaço, caso não houvesse na atmosfera certos gases, destacando-se entre eles o CO₂. A presença na atmosfera de gases com característica “estufa”, à radiações solares mas absorvedores da radiação térmica emitida pela Terra, em todas as direções, aquece o planeta, levando a temperatura média da atmosfera próxima à superfície terrestre a cerca de 15°C.

Está comprovado o constante aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera do planeta. Uma indicação deste constante aumento, está no aumento das concentrações do dióxido de carbono nas geleiras das calotas polares nos últimos dois séculos.

A presença do dióxido de carbono de uma forma acentuada, intensifica o efeito estufa e como consequência modifica as condições climáticas do planeta. O aumento simultâneo da emissão de gases com característica estufa provenientes de atividades humanas, convencionou-se chamar de efeito estufa antropogênico. [4]

Os gases de efeito estufa (GEE) são caracterizados pelo fato de que suas moléculas possuem modos de vibração capazes de serem excitados pela absorção de fótons de ondas eletromagnéticas da radiação térmica emitida no infra vermelho, onde concentra-se praticamente a totalidade da radiação emitida pela Terra e terem longevidade na atmosfera. Por outro lado, na sua maioria eles não absorvem fótons de comprimentos de ondas mais curtos onde concentra-se a energia da luz solar. O ozônio (O₃) é um dos poucos gases que absorvem tanto no ultra violeta como no infra vermelho.

A Figura 2.1, demonstra o balanço de energia da Terra incluindo a radiação solar incidente e refletida e a emissão e absorção no infra-vermelho que mantém constante a temperatura do planeta.[5]

Figura 2.1 – Balanço energético da Terra [5]

Os gases estufa, além de suas concentrações diferentes na atmosfera diferem quanto a seus potenciais de aquecimento global (PAG) – definido como a capacidade de absorção e redistribuição da energia térmica emitida pela Terra, em função da vida média de cada gás, tendo sido tomado como a unidade o CO₂. [3]

Tabela 2.1 – Percentual de contribuição para o forçamento radioativo de alguns gases presentes na atmosfera

Gases	%
CO ₂	50
CH ₄	11
O ₃	09
N ₂ O	07
CFCs	13

Nota-se que o CO₂ possui o maior potencial comparado ao demais gases apresentados.

Se for levado em conta não a contribuição total de massa de um determinado gás, mas sim o efeito relativo de uma única molécula tomando como unidade o CO₂, chega-se aos valores apresentados na Tabela 2.2

Tabela 2.2 - Valores do potencial de aquecimento global (PAG) – IPCC, 2001

Espécies	Fórmula Química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global (horizonte de tempo)		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12	62	23	7
Óxido Nitroso	N ₂ O	114	275	296	156
Ozônio	O ₃	0,1 – 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
HFC-23	CHF ₃	260	9.400	12.000	10.000
HFC-32	CH ₂ F ₂	5	1.800	550	170
HFC-41	CH ₃ F	2,6	330	97	30
HFC-43-10	C ₅ H ₂ F ₁₀	17,1	3.000	1.300	400
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	5.900	3.400	1100
HFC-143	CHF ₂ CH ₂ F	3,4	1.000	330	100
HFC-143a	CF ₃ CH ₃	52	5.500	4.300	1.600
HFC-227	CF ₃ CHFCF ₃	33	5.600	3.500	1100
HFC-236	CF ₃ CH ₂ CF ₃	220	7.500	9.400	7.100
HFC-145	C ₃ H ₃ F ₆	6,6	1.800	560	170
Hexafluorido de Enxofre	SF ₆	3200	15.100	22.200	32.400
Perfluorometano	CF ₄	50.000	3.900	5.700	8.900
Perfluorooctano	C ₂ F ₆	10.000	8.000	11.900	18.000
Perfluoropropano	C ₃ F ₈	2.600	5.900	8.6000	12.400
Perfluorociclobutano	c-C ₄ F ₈	3.200	6.800	10.000	14.500
Perfluoropentano	C ₅ F ₁₂	4.100	6.000	8.900	13.200
Perfluorohexano	C ₆ F ₁₄	3.200	6.100	9.000	13.200

É importante notar na Tabela 2.2 que o metano (CH₄), que é emitido entre outras fontes, pela fermentação dos resíduos sólidos em locais para disposição final tem PAG bastante maior que o do CO₂, variável com o horizonte de tempo considerado. Em um horizonte de 20 anos, este potencial é 56 vezes maior (mesma massa para os dois gases), decrescendo para 21 aos 100 anos e 6,5 aos 500 anos

2.2 – A Produção de Resíduos Sólidos

De acordo com USEPA (United States Environmental Protection Agency)[6], são quatro as principais formas de relação entre os resíduos sólidos urbanos – lixo – e o efeito estufa:

- emissão de dióxido de carbono decorrente do consumo de energia para extração e produção de bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados);
- emissão de dióxido de carbono oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção de bens;
- emissão de metano dos aterros sanitários em que os materiais acima e os restos de alimentos são depositados (o CO₂ emitido pela fermentação do lixo não é contabilizado como GEE pelo IPCC) e se decompõem;
- fixação de carbono das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários.

2.3 – Biogás

A matéria orgânica presente em um aterro sanitário municipal é decomposta por um processo anaeróbio, que produz um gás denominado biogás ou “gás de aterro”. Os principais constituintes do biogás são: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e em baixas concentrações, nitrogênio e o oxigênio, além de gases traços.[7] [8]

Quando da formação do biogás, devido ao processo anaeróbio, um estado de alta pressão ocorre no interior do aterro sanitário, fazendo com que o biogás escape através da superfície do aterro causando graves riscos ambientais.[9] [10]

Um estudo no aterro sanitário de La Zoreda (Astúrias, Espanha), identificou as porcentagens dos componentes do biogás, encontrados em amostras colhidas no interior e na superfície do aterro, comparando os resultados, demonstrando a presença do oxigênio no biogás, quando em contato com o ar atmosférico, conforme demonstra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Porcentagens dos componentes do biogás no interior e superfície do aterro sanitário [10]

Componentes	% dos componentes	
	Biogás no interior do Aterro	Biogás na superfície do Aterro
CH ₄	50-70	49,0
CO ₂	20-50	32,7
N ₂	4-20	15,4
O ₂	-----	2,90

2.4 – Metano (CH₄)

O metano (CH₄) é produzido pelas bactérias acetotróficas, a partir da redução de ácido acético, ou pelas bactérias hidrogenotróficas, a partir da redução de dióxido de carbono. É um gás combustível que responde por cerca de 11% das emissões antropogênicas de gases efeito estufa (GEE). Depois do dióxido de carbono (CO₂), que contribui com 50% destes gases na atmosfera, considera-se que o metano seja o mais significativo dentre os gases secundários, devido ao seu potencial para aquecimento global (Potencial de Aquecimento Global– PAG) ser 21 vezes maior do que o dióxido de carbono (CO₂) em um horizonte de 100 anos, além se seu volume ser maior no balanço dos gases efeito estufa do que os outros gases não carbônicos.[3]

A Figura 2.2 ilustra uma importante interação em um aterro sanitário anaeróbio entre um grupo de bactérias, o substrato, e o produto intermediário, para a formação do metano.

Figura 2.2 – Formação do metano em um aterro [11]

2.4.1 – Fontes de Emissões de Metano

Embora as fontes de metano não possam ser identificadas com precisão absoluta, o metano natural está associado a processos de decomposição em áreas úmidas, que contribuem com cerca de 20% do total destas emissões, conforme medições a partir de isótopos radioativos. As atividades humanas (contribuições antropogênicas) respondem pelos restantes 80%, distribuídos de forma desigual nas diferentes regiões. Destes, 20% são oriundos da produção e uso de combustíveis fósseis. [3]

As fontes de emissões de metano possuem características diferentes em países desenvolvidos. A agricultura, a fermentação entérica e os dejetos de animais são importantes fontes de metano em países de intensa atividade agrícola. Nos países industrializados, a produção e o uso de combustíveis (carvão mineral, gás natural e indústria petroquímica) tem peso maior, refletindo sobre o balanço global de metano na atmosfera.[3]

Entre as principais fontes de metano para a atmosfera no Brasil, destacam-se três de especial importância para as regiões tropicais:

- As áreas alagadas, principalmente durante a época das chuvas (sobretudo a região amazônica e o Pantanal Mato-grossense);
- A queima de combustíveis fósseis e os depósitos de lixo urbano;
- A queima de biomassa (matéria vegetal), especialmente durante a época seca, como as queimadas que ocorrem na região do cerrado, no Brasil central, e em algumas áreas da região amazônica.

A redução da emissão de metano relativa a atividades urbanas pode representar contribuição significativa para melhorar o balanço nacional de GEEs.[12]

O total das emissões de metano no Brasil oriundas de aterros e resíduos líquidos domésticos e industriais está estimado entre 50 e 80 milhões de toneladas [12].

Nos Estados Unidos, os aterros sanitários respondem por quase 40% das emissões de metano a cada ano.

A emissão de metano na região da Nova Inglaterra – EUA, é calculada em 91 milhões de toneladas por ano, com pântanos e aterros sanitários dominando sobre todos os outros tipos de superfícies. Nas terras alagadas é estimada uma produção de 55 milhões de toneladas por ano, dos quais 74% provenientes da região de Maine. Aterros em atividade emitem 28 milhões de toneladas por ano. Outra fonte de magnitude moderada incluem animais ruminantes (5 milhões de toneladas por ano) e queima de lixo doméstico (3 milhões de toneladas por ano).[13]

2.4.2 – Distribuição Global das Fontes de Metano

O potencial para geração de metano por resíduos no Brasil está estimado em 1,9 milhões de toneladas por ano, variando em volume e composição de acordo com a região. Dos resíduos produzidos, 76% são jogados em vazadouros a céu aberto, sem qualquer tratamento, 3% em aterros controlados, 10% em aterros sanitários, 0,9% em usinas de compostagem e 0,1% são incinerados.[12]

A Tabela 2.4 traz a porcentagem global do planeta das fontes de metano.

Tabela 2.4 – Fontes globais de emissão de CH₄ para a atmosfera. [13]

Fontes de Metano	Porcentagem
Carvão mineral, gás natural e indústria petroquímica	28%
Fermentação entérica	22%
Arrozais	17%
Queima de Biomassa	11%
Aterros sanitários	8%
Tratamento de esgotos domésticos	7%
Dejetos de animais	7%

Outra fonte importante de gás metano refere-se a efluentes líquidos. Esgotos domésticos e de indústrias alimentícias, papel e celulose e de bebidas, com elevado teor de matéria orgânica (expresso em Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO), tem um alto potencial para a geração do gás metano. A carga orgânica unitária, uma função do consumo de água correspondendo a 80% desta, varia entre 20 e 80 gDBO/habitante dia no mundo. No Brasil considera-se uma carga orgânica de 50 gDBO/hab. dia, a partir do que estima-se a geração de 1,97 milhões de toneladas de DBO por ano [12]. Dentre as fontes de esgotos domésticos incluem-se os sistemas individuais das áreas rurais (fossas sépticas – filtros anaeróbicos), além dos sistemas coletivos para tratamento biológico (lagoas de estabilização, processo de lodos ativados, filtros biológicos).

Nas estações de tratamento de esgotos, a composição do biogás é mais rica em metano, cerca de 70%, o que torna atraente o uso deste gás como fonte energética. De fato, é possível suprir toda a demanda energética da ETE – Estação de Tratamento de Esgoto – através da combustão do gás em um gerador . [23]

2.4.3 – Sumidouros de Metano

No balanço global, observa-se um excedente de emissão de 23 milhões de toneladas por ano de metano em relação ao removido anualmente, o que corresponde a um crescimento anual (0,6%) desse gás na atmosfera. Mantida esta taxa, a concentração dobra a cada 110 anos aproximadamente.

De acordo com a metodologia proposta pelo IPCC [3], são considerados sumidouros de metano os seguintes processos:

- A oxidação do metano por radicais hidroxila (OH) na troposfera, que resulta em monóxido ou dióxido de carbono, dependendo da concentração de NO_x . Este processo responde pela remoção de mais de 90% do metano emitido. O resultado final é, de qualquer forma, CO_2 mesmo que haja CO na etapa intermediária;

- A captura por solos e águas nos processos de oxidação por microrganismos, e pelo transporte pela atmosfera, onde se torna uma fonte de vapor d'água;
- A queima do CH_4 , para prevenir sua liberação na atmosfera, simplesmente para evitar a emissão ou para ser usado como fonte de energia. O processo de combustão gera gás carbônico.

2.5 – Chorume

Um sério problema que ocorre nos aterros sanitários é a formação do chorume, que é o líquido produzido pela massa orgânica de lixo durante o processo de degradação biológica. Este líquido em contato com a água da chuva, que percola a massa do aterro, gera o lixiviado, tóxico, com valores elevados de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio), traços de metais dissolvidos e presença de amônia. [14].

A ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas [1] - define esse percolato como: “líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como característica a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO; se constitui numa mistura de substâncias inorgânicas, compostos em solução e em estado coloidal de diversas espécies de organismos”.

Dependendo do volume de resíduos que está sendo fermentado, a quantidade de líquido resultante pode ser muito grande, como exemplo [15] um aterro na cidade de São Paulo, com mais de quinze anos, que acumula todos os dias aproximadamente 500 mil litros de chorume. Já a FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente[16] - , aponta o aterro de Gramacho como o maior do estado do Rio de Janeiro, recebendo 6.000 t/dia de lixo e produzindo 800 mil l/dia de chorume.

O chorume possui uma DBO na ordem de 3.000 a 19.000 mg/l [17]. Essa ampla faixa de valores se dá porque no processo de degradação do lixo até a sua inertização várias etapas ocorrem e o lixo depositado anteriormente já estará em uma fase de degradação mais adiantada do que o lixo depositado recentemente. Esse valor também é função da decomposição do resíduo, variando de acordo com sua heterogeneidade.

A DBO é o padrão para avaliar o grau de poluição de líquidos com matéria orgânica, e definida como “quantidade de oxigênio utilizado na oxidação bioquímica da matéria orgânica, num determinado período de tempo”. [18]

Contaminantes como metais pesados, presentes nos resíduos, também estão presentes no chorume e podem contaminar o solo e o lençol freático. Além disso, a disposição inadequada de resíduos em locais de solos não apropriados e clima de alta pluviosidade pode contaminar rios e lagos pelo chorume, ou parte dele, carregado pela chuva.

A Tabela 2.5 apresenta os íons que podem ser encontrados no chorume, de acordo com o componente do resíduo. [19]

Tabela 2.5 - Íons que podem ser encontrados no chorume [19]

ÍONS	ORIGENS
Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Material orgânico, entulhos de construção, cascas de ovos
PO ₄ ³⁻ , NO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Material orgânico
Cu ²⁺ , Fe ²⁺ , Sn ²⁺	Material eletrônico, latas, tampas de garrafas
Hg ²⁺ , Mn ²⁺	Pilhas comuns e alcalinas, lâmpadas fluorescentes, fungicidas, tintas, amaciantes, produtos farmacêuticos, interruptores,...
Ni ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺	Baterias recarregáveis (celular, telefone sem fio, automóveis), plásticos, ligas metálicas, pigmentos, papéis, vidro, cerâmica, inseticidas, embalagens...
Al ³⁺	Latas descartáveis, utensílios domésticos, cosméticos, embalagens laminadas em geral
Cl ⁻ , Br ⁻ , Ag ⁺	Tubos de PVC, negativos de filmes de raio-X
As ³⁺ , Sb ³⁺ , Cr ³⁺	Embalagens de tintas, vernizes, solventes orgânicos

Os cátions (íons carregados positivamente) citados, normalmente se combinam com espécies doadoras de elétrons, como o íon CN⁻, formando complexos. Esses íons também são muito reativos em contato com as argilas do solo.[19]

A Tabela 2.6 apresenta as quantidades de contaminantes normalmente encontrados no chorume proveniente de aterros sanitários. [19]

Tabela 2.6 - Quantidades de contaminantes normalmente encontrados no chorume provenientes de aterros sanitários.[19]

PARÂMETRO	FAIXA DE VARIAÇÃO
K ⁺	200 – 1000 (mg/l)
Na ⁺	200 – 1200 (mg/l)
Ca ²⁺	100 – 300 (mg/l)
Mg ²⁺	100 – 1500 (mg/l)
Cl ⁻	300 – 3000 (mg/l)
SO ₄ ²⁻	10 – 1000 (mg/l)
Fe (total)	1 – 1000 (mg/l)
Mn	0,01 – 100 (mg/l)
Cd	0,007 – 0,15 (mg/l)
Co	0,004 – 0,13 (mg/l)
Cr	0,0005 – 1,90 (mg/l)
Fe	0,22 – 2.920,00 (mg/l)
Cu	< 10 (mg/l)
Zn	0,1 – 100 (mg/l)
Ni	0,01 – 100 (mg/l)
Pb	< 5 (mg/l)
Hg	< 0,2 (mg/l)
NO ₃ ⁻	0,1 – 10 (mg/l)
NH ₄ ⁻	10 – 1000 (mg/l)
Alcalinidade	500 – 10000
Carbono orgânico total dissolvido (CODT)	200 – 30000 (mg/l)
Demanda química de oxigênio (DQO)	1000 – 90000 (mg/l)
Sólidos totais dissolvidos (STD)	5000 – 40000 (mg/l)
pH	4 à 8

Em geral, a concentração de metais nos resíduos urbanos é relativamente baixa e será variável de acordo com o pH existente na etapa de decomposição do lixo; o pH ácido ou seja $\text{pH} < 7$, aumenta a concentração de metais, já que nesse pH os metais são mais solúveis. Esta condição corresponde em geral à fase inicial do processo de decomposição (“chorume novo”).

A identificação de compostos orgânicos no chorume é uma preocupação que vem motivando a pesquisa científica em nível mundial. Como exemplos podem ser citados trabalhos dedicados à identificação de carcinógenos [20], compostos orgânicos voláteis na atmosfera de aterros sanitários com e sem lagoa para coleta de chorume [21], estrógenos ambientais [22], potencial de lixiviação de plastificantes como o dietilhexilftalato [20], testes de toxicidade [20] e o desenvolvimento de sistemas de alto vácuo para a extração de orgânicos voláteis [20]. A Figura 2.3 mostra as lagoas de chorume do aterro sanitário de São Carlos, notando-se o nível elevado de líquido na lagoa da esquerda.

Figura 2.3 – Vista das lagoas de chorume do aterro sanitário de São Carlos

2.6 – Incineração

A incineração é um processo no qual os resíduos são destruídos por via térmica, geralmente com recuperação de energia. Uma instalação de incineração, é “um equipamento técnico relacionado ao tratamento de resíduos por via térmica com ou sem recuperação do calor produzido por combustão, abrangendo o local de implantação e o conjunto de instalação constituído pelo incinerador, seus sistemas de alimentação de resíduos, combustíveis e ar, bem como os aparelhos e dispositivos de controle das operações de incineração, de registro e de vigilância contínua das condições de incineração”[25].

O processo de incineração permite a redução do volume de resíduos através da combustão, com temperaturas entre 900° e 1100° C. Este tipo de sistema tem maior utilidade na eliminação de resíduos combustíveis, apresentando menor vantagem para outros materiais como vidros e metais. A incineração tem sido adotada em lugares de grande produção de resíduos por permitir uma redução do volume de até cerca de 90%.

Uma instalação moderna de incineração de resíduos sólidos urbanos é constituída de:

- Fosso de recepção de resíduos;
- Garras para alimentação da câmara de combustão;
- Alimentador da câmara de combustão;
- Câmara de combustão (equipadas com grelhas móveis onde os resíduos são queimados); há vários tipos como rotativas, leito fluidizado, câmaras múltiplas, etc...
- Caldeira de recuperação de energia. A caldeira é o local onde passam os gases resultantes da queima com a finalidade de produzir vapor que pode ser utilizado diretamente em indústrias, para aquecimento da central ou para a geração de energia elétrica;

- Grupo termo gerador

Os processos de uma instalação de incineração estão ilustrados na Figura 2.4

Figura 2.4 – Processos de uma instalação de incineração

No interior da câmara de combustão, o processo de incineração apresenta as seguintes fases:

1. Fase de secagem, na qual se dá uma diminuição do teor de água dos resíduos;
2. Fase de volatilização e ignição, na qual o produto seco entra na zona de combustão a uma temperatura de 400 a 500° C;
3. Fase de combustão completa que se dá sobre a massa de resíduos, onde a temperatura varia entre 800 e 1.110° C;
4. Fase de extinção, da qual resultam as escórias que serão encaminhadas para um aterro sanitário especial.

Do processo de incineração de resíduos sólidos municipais podem resultar os seguintes produtos finais: energia calorífica que é transformada em energia elétrica ou vapor, águas residuárias, gases, cinzas e escórias. O efluente originado pela escória e pela lavagem dos gases, é considerado um resíduo perigoso, que deverá passar por um tratamento adequado.

Os gases resultantes da incineração passam por um tratamento posterior, uma vez que na sua composição se incluem diversas substâncias tóxicas como chumbo, cádmio, mercúrio, cromo, arsênio e outros metais pesados além de ácido clorídrico, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, dioxinas e furanos, clorobenzenos, clorofenóis e PCBs.

Gases ácidos podem ser tratados pela adição de calcários diretamente na câmara de combustão nos incineradores de leito fluidizado como o do [24], em lavadores úmidos usando soluções básicas de NaOH ou a seco, utilizando-se Ca(OH)_2 , CaO ou NaHCO_3 .

Os processos de depuração de gases vai recolher as cinzas volantes que representam de 5 a 25% do total dos resíduos sólidos de um incinerador, sendo também incluídas na categoria dos resíduos perigosos pelo que necessitam de um tratamento complementar. Os equipamentos para tratamento dos gases são caros, constituindo uma parte importante do custo total de uma central de incineração, além de necessitarem de uma manutenção cuidadosa de forma a garantir a eficiência de remoção de poluentes necessária para serem minimizados os impactos no ambiente.

As escórias, recolhidas pelo fundo da fornalha são menos contaminadas pois deixam o processo a alta temperatura e são imediatamente resfriadas por imersão em água.

Os processos e equipamentos do sistema de depuração de gases, são os seguintes:

- Controle da temperatura de combustão na fornalha: para garantir a maior taxa de degradação possível dos resíduos e subprodutos da combustão deverá ser mantida, na câmara de combustão, uma temperatura entre 900°C de 1100 °C;
- Controle do NOx – catálise e controle da combustão;
- WET – SCRUBBERS: os gases são lavados através de um chuveiro de água, em que as gotículas vão capturando as poeiras e alguns gases na sua passagem;

- DRY – SCRUBBERS: sistema semelhante ao “wet-scrubber” apenas com a diferença de que o processo decorre a seco, sendo lançadas sobre os gases substâncias alcalinas em pó;
- Injeção de carvão ativado: este processo é utilizado essencialmente para controle das emissões de metais pesados orgânicos e dioxinas. Esta injeção é feita antes do mecanismo de controle de partículas (filtro de mangas), pois as partículas de carvão ativado após terem absorvido os poluentes, devem ser capturadas.
- Filtros de mangas: funcionamento semelhante aos sacos de aspiradores domésticos, uma vez que consistem em pequenos sacos por onde os gases são forçados a passar, sendo retida uma elevada percentagem de partículas.

Os gases após a passagem pelos diversos processos de depuração são emitidos para a atmosfera através de uma chaminé com uma altura adequada de maneira que os poluentes que restaram nestes gases quando chegarem ao solo tenham uma concentração suficientemente pequena para não afetar a saúde pública ou o meio ambiente. Para calcular a altura mínima da chaminé recorre-se a modelos matemáticos de dispersão de poluentes.

Após o início de operação do incinerador é necessário monitorar as emissões de poluentes, sendo já possível para diversos poluentes, sua monitoração contínua. No entanto, para alguns poluentes, como é o caso das dioxinas, essa medição é realizada de forma pontual, pois a sua concentração é extremamente pequena, na casa dos nanogramas por metro cúbico. Para efeito de comparação, os demais poluentes são regulados em miligramas por metro cúbico ou parte por milhão em volume (ppmv).

A incineração dos resíduos sólidos municipais é um processo sofisticado de redução de volume dos mesmos, sendo necessário garantir o armazenamento permanente dos resíduos resultantes, muitos deles subprodutos tóxicos necessitando por isso cuidados na sua operação para evitarem danos a saúde pública e o meio ambiente. Permite o aproveitamento de energia, mas não a reciclagem dos materiais. Devido a estas circunstâncias , a incineração pode fazer parte de um elenco de técnicas para lidar com os resíduos, entre elas a disposição em aterro sanitário, a gestão dos resíduos sólidos

urbanos que privilegia a redução, a reutilização e a reciclagem, incluindo nesta última a reciclagem da matéria orgânica.

2.7 – Produtos da Combustão Incompleta - PCI

A volatilização e combustão da matéria orgânica durante a incineração do lixo é normalmente completada desde que sejam adequados o tempo de residência, a temperatura de combustão e a turbulência no interior da câmara.

A temperatura desempenha um papel importante. Quando mantida a 900°C ou acima, a concentração de hidrocarbonetos nos gases pode ser tão baixa quanto 10 ppm. A 600°C este valor salta para várias centenas de ppm.

A concentração de monóxido de carbono nesta altura permanece regularmente abaixo de 0,1% em volume. A combustão incompleta pode ocorrer quando o incinerador é operado inadequadamente, por exemplo, operando com temperaturas abaixo de 800°C.

A ocorrência da combustão incompleta pode ser detectada monitorando a composição do fluxo de gás. Esta combustão incompleta pode causar a emissão de orgânicos como os HPA (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), dioxinas e furanos.

2.7.1 – CPAs (Compostos Policíclicos Aromáticos)

São compostos baseados em anéis benzênicos que se fundem para produzir dois ou mais anéis policíclicos. Dentro das subclasses de CPA – Compostos Policíclicos Aromáticos, existem por exemplo HPAs (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), HPASs (hidrocarbonetos policíclicos sulfúricos aromáticos), quando contém átomos de enxofre e HPNAs (hidrocarbonetos policíclicos nitrogênicos aromáticos), quando contêm átomos de nitrogênio. A Tabela 2.7 demonstra alguns exemplos de HPA, HPAS e HPNA.

Tabela 2.7 – Exemplos de CPA [27]

CPA		
HPA	HPNA	HPSA
$C_{14}H_{10}$	$C_{12}H_9N$	C_8H_6S
$C_{18}H_{12}$	$C_{13}H_9N$	$C_{12}HS$
$C_{20}H_{12}$	$C_{17}H_{11}N$	

CPA são conhecidos por apresentarem-se naturalmente no meio ambiente, por exemplo em sedimentos, nos combustíveis fósseis e nas emissões naturais e queima de florestas. Entretanto, a maior fonte de CPAs é antropogênica, como exemplos, óleos e carvão utilizados para queima em fornalhas residenciais, motores a diesel e gasolina e de maior relevância, na queima de lixo [26, 27]. A emissão de CPAs no meio ambiente, trazem riscos à saúde, porque estes compostos compreendem um grande grupo de produtos químicos cancerígenos [26].

Credita-se aos CPAs quando presentes nas partículas sólidas em suspensão no ar ou na forma gasosa, um aumento na taxa de morte por câncer na área urbana, quando comparada à de áreas rurais [27]. Doenças como câncer de pulmão, estômago, rins e fígado, também têm sido associados à exposição aos CPAs [26,28].

Os CPAs observados na incineração de resíduos sólidos, incluiu algumas espécies conhecidas por serem biologicamente ativos em seres humanos. Os níveis de CPA relatados para emissões de incineradores são muito baixos quando comparados a outras fonte de emissões, por exemplo a queima de carvão e óleo em termoeletrônica e motores operando a óleo diesel.

Propriedades físicas e químicas dos CPAs sugerem que o aperfeiçoamento da combustão e a introdução de mecanismos de controle, tais como os sistemas de limpeza de gases, podem controlar sua emissão, bem como a formação de dioxinas e furanos [29].

Estudos em um incinerador de Ekjo, na Suíça, de leito fluidizado, utilizado para a queima de resíduos sólidos, foi observado que a maior emissão de CPA estava associada aos resíduos sólidos com a fuligem e o clínquer. Observou-se também a baixa solubilidade dos CPAs na água.

A sua formação ocorre no processo de combustão, tendo sido considerados como precursor para a formação da cobertura de fuligem nos sistemas de combustão.[27]

Também foi detectado um número de halogênicos, clorobenzênicos e clorofenólicos, os quais são considerados como precursores para a formação de dioxinas e furanos.

2.8 – Dioxinas e Furanos

As substâncias do grupo dioxinas e furanos (dibenzo-para-dioxinas policloradas e dibenzo-para-furanos policlorados) são compostos químicos considerados nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente, que podem ser detectadas em solos e sedimentos, rios e lagos, formulações químicas e lixos, herbicidas, depósitos de resíduos perigosos e aterros sanitários [28].

O termo dioxina refere-se a um grupo de 75 combinações químicas e o termo furanos a 135 composições, na maioria de elevada toxicidade. As dioxinas e furanos causam vários efeitos tóxicos sendo reconhecidamente um disruptor hormonal, além de afetar os sistemas imunológico e reprodutivo.

A dioxina 2,3,7,8-TCDD é um agente cancerígeno que espalha-se no meio ambiente e invade a cadeia alimentar, atingindo a corrente sanguínea e os tecidos gordurosos dos seres humanos.

As concentrações em que se encontram as dioxinas e furanos no ambiente são muito baixas, exigindo uma técnica muito específica para se identificar as substâncias e determinar a quantidade. O conhecimento da elevada toxicidade é mais do que suficiente, para impor a identificação das fontes e reduzir as emissões para o meio ambiente.

2.8.1 – Características de Dioxinas e Furanos

A estrutura básica das dioxinas e furanos é mostrada na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Estrutura de dioxinas e furanos

No caso das dioxinas, dois anéis de benzeno são ligados com dois átomos de oxigênio, já os furanos têm uma ligação com o oxigênio e uma ligação direta entre os átomos de carbono. Ambos os grupos possuem 8 (oito) posições para ligar com átomos de hidrogênio ou cloro (ou com outros halógenos). Para ter a possibilidade de identificação dessas oito posições específicas, elas são marcadas com números de 1 a 8.

A dioxina mais tóxica e mais perigosa é a 2,3,7,8 – tetracloro di benzo – p – dioxina (2,3,7,8 – TCDD) que possui 4 átomos de cloro nas posições 2, 3, 7 e 8.

Extensas investigações mostram que a toxicidade das outras dioxinas furanos, também pode ser demonstradas. Como a toxicidade dos congêneres específicos é diferente (relação de 1 a 1000), existe um sistema de valorização internacional [30]. Este sistema consiste na verificação laboratorial da toxicidade do congênere específico, multiplicado com o fator correspondente a Tabela 2.7, (I – TEF – International Toxic equivalent Faktor). Com a obtenção do resultado da multiplicação soma-se uma quantia, que representa a toxicidade dos demais congêneres em relação do 2,3,7,8 – tetraclorobenzeno – p – dioxina (I-TEQ – International Toxic Equivalent Value).

A grande diferença na toxicidade entre os grupos dioxinas e furanos exige métodos especiais para análise laboratorial, sendo também importante os aspectos da amostragem, porque uma alteração dos congêneres, tem de ser evitada em todo o caso.

Tabela 2.8 – Fatores de equivalência de toxicidade para dioxinas e furanos, relativos ao 2,3,7,8 – TCDD

DIOXINAS		FURANOS	
Congêneres	I - TEF	Congêneres	I - TEF
2,3,7,8 – TCDD	1	2,3,7,8 – TCDF	0,1
		2,3,4,7,8 – PeCDF	0,5
1,2,3,7,8 – TeCDD	0,5	1,2,3,7,8 – PeCDF	0,05
1,2,3,4,7,8 – HeCDD	0,1	1,2,3,4,7,8 – HeCDF	0,1
1,2,3,7,8,9 – HxCDD	0,1	1,2,3,7,8,9 – HxCDF	0,1
1,2,3,6,7,8 – HxCDD	0,1	1,2,3,6,7,8 – HxCDF	0,1
		2,3,4,6,7,8 – HxCDF	0,1
1,2,3,4,6,7,8 – HpCDD	0,01	1,2,3,4,6,7,8 – HpCDF	0,01
		1,2,3,4,7,8,9- HpCDF	0,01
OCDD	0,001	OCDF	0,001

2.8.2 – Fontes de Dioxinas e Furanos

As dioxinas e furanos são sempre subprodutos indesejáveis, que nunca se produzem para utilização, exceto para análises laboratoriais.

A formação da dioxinas e furanos exige em geral a presença de compostos orgânicos tipo fenol, cloro, um catalisador (por exemplo cobre) e uma temperatura de reação entre 200 e 600° C. [31], [32]

A “síntese de novo”, explica que as dioxina e furanos são sintetizados entre o ponto de entrada do gás na câmara de queima e a saída dos gases pela chaminé.

Como as dioxinas e furanos possuem efeitos tóxicos em quantidades muito pequenas, são necessário teores baixos dos produtos base para produzir consideráveis quantidades dessas substâncias. É conhecido que vestígios de composições orgânicas (as vezes condicionadas para processos de pirólise), cloro e cobre, estão espalhados em muitos produtos, em muitas espécies dos resíduos e também no ambiente em geral.

Por outro lado também encontram-se teores mais elevados em processos químicos caracterizados pelos teores elevados dos produtos de base.

É possível que até os incêndios florestais produzam dioxinas e furanos em teores baixos.

As principais fontes de PCDDs e PCDFs encontram-se listados:[31],[32],[33]

- Processos metalúrgicos e siderúrgicos;
- Processos da indústria de celulose e papel;
- Processos da indústria química em relação a produtos clorados;
- Incineração de resíduos urbanos ou de resíduos perigosos;
- Incineração de resíduos hospitalares;
- Incineração de lamas de depuração de ETEs;
- Processos de reciclagem de metais;
- Incêndios florestais e combustão de biomassa;
- Fontes acidentais : incêndios de PVC.

Na medida em que se alastram pelo ambiente global, as dioxinas e furanos se acumulam e podem levar décadas para serem degradadas. As dioxinas e furanos não se dissolvem prontamente na água, mas são facilmente solúveis nos tecidos gordurosos animais ou humanos, sendo capazes de se fixar nestes tecidos vivos. São particularmente evidentes em organismos aquáticos, que habitam o fundo dos oceanos e que estão em permanente contato com sedimentos, além dos animais que ingerem matéria particulada suspensa na água. Os responsáveis da indústria, os cientistas e as autoridades procuram meios apropriados para minimizar os impactos ambientais de dioxinas e furanos. Entretanto já existem soluções técnicas eficientes, para reduzir as emissões. Na indústria de celulose e papel, por exemplo, o processo de branqueamento pode ser realizado sem o uso de agentes clorados, que causam a formação de dioxinas e furanos com a matéria orgânica de celulose. Já existe tecnologia de branqueamento substituindo o cloro (Elemental chlorine free – ECF) que elimina o problema.

O exemplo indica que, para uma classificação da importância das fontes, é necessário saber os pormenores dos processos. Exemplos semelhantes existem no âmbito da incineração dos resíduos (centrais equipadas com a tecnologia de adsorção em carvão ativado) e nos processos metalúrgicos e siderúrgicos.

2.9 – Recuperação de Energia na Incineração

A recuperação de energia na incineração é uma prática mais comum em países como Inglaterra, Alemanha, França, Países Nórdicos e Japão, notadamente crescente em todo o mundo.

As áreas metropolitanas brasileiras, produzem cerca de 16 mil toneladas de resíduos sólidos municipais por dia, com elevado teor orgânico. Estes resíduos, em climas tropicais e subtropicais como o do nosso país, oferecem condições favoráveis à produção do metano e potencial para recuperação energética, ao mesmo tempo eliminando as emissões desse gás de efeito estufa.

Uma avaliação de 13 aterros em todo o país [34] estimou reservas variando de 9,7 a 14,8 bilhões de metros cúbicos de metano por ano, com capacidade total de geração de 303 a 578 milhões de metros do metano por ano, possibilitando a provisão de 60 a 144 MW de energia elétrica. Assim, cerca de 50% das emissões brasileiras de metano produzidos por resíduos – inclusive efluentes líquidos – provêm de 13 aterros. Somente dois deles representam 25% do total das emissões do país: o aterro Bandeirantes em São Paulo e o de Gramacho no Rio de Janeiro.

No entanto, a realidade indica uma situação onde basicamente nada do metano produzido é recuperado nos aterros do país.

A recuperação da energia do CH_4 é uma prática que possui aspectos ambientais positivos, dentre os quais o mais importante talvez seja a redução na emissão de gases estufa. Isto se dá de duas maneiras:

- Evita emissão de CO_2 na produção da mesma quantidade de energia a partir de um combustível fóssil;
- Evita a emissão direta de CH_4 .

A incineração, ao contrário do que ocorre durante a disposição de resíduos orgânicos nos aterros sanitários não emite metano, pois na incineração praticamente todo o carbono é oxidado a CO_2 .

Nos aterros, cerca da metade do carbono do resíduo atinge a atmosfera como metano (CH_4) e mais ou menos o mesmo valor como CO_2 . O metano tem um efeito estufa (radioative forcing) cerca de sete vezes maior (horizonte de 500 anos) do que o CO_2 e desta forma, considerando-se a proporção CO_2/CH_4 mencionada acima para os dois processos é fácil perceber que o efeito estufa produzido pela incineração será cerca de quatro vezes menor do que o da disposição em aterros sanitários [33].

2.10 – Limites de Emissões para a Incineração de Resíduos Sólidos

Os limites para a emissão de qualquer sistema de tratamento térmico não deve ultrapassar os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos. A Tabela 2.9 mostra os padrões de emissões estabelecidos pela CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental para as instalações de incineração, considerando os materiais e a capacidade dos incineradores.

Tabela 2.9 – Limite legais de emissões estabelecidos pela CETESB para instalações de incineração.

Poluente	Emissões em base seca com 70% de O ₂ nos gases efluentes ⁽¹⁾		
	Capacidade < 200 Kg/dia	Capacidade de 200 a 1500 kg/dia	Capacidade > 1500 kg/dia
Material Particulado	120 mg/Nm ³	70mg/Nm ³	50mg/Nm ³
Monóxio de Carbono CO	125mg/Nm ³	125mg/Nm ³	125mg/Nm ³
SO _x (expresso em SO ₂)	250mg/Nm ³	250mg/Nm ³	250mg/Nm ³
NO _x (expresso em NO ₂)	400mg/Nm ³	400mg/Nm ³	400mg/Nm ³
Ácido Clorídrico HCl	100mg/Nm ³ ou 1,8 kh/h	100mg/Nm ³ ou 1,8 kh/h	100mg/Nm ³ ou 1,8 kh/h
Ácido Fluorídrico HF	5mg/Nm ³	5mg/Nm ³	5mg/Nm ³
Substância Classe I ⁽²⁾	0,28mg/Nm ³	0,28mg/Nm ³	0,28mg/Nm ³
Substância Classe II ⁽³⁾	1,4mg/Nm ³	1,4mg/Nm ³	1,4mg/Nm ³
Substância Classe III ⁽⁴⁾	7,0mg/Nm ³	7,0mg/Nm ³	7,0mg/Nm ³
Dioxinas e Furanos ⁽⁵⁾	-----	0,14ng/Nm ³	0,14ng/Nm ³

1 – condições aplicáveis desde que não haja injeção de oxigênio puro

2 – somatório das emissões de Cd, Hg e Tl

3 – somatório das emissões de As, Co, Ni, Se, Te

4 – somatório das emissões de Sb, Pb, Cr, Cn, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, Va, Sn

5 – em 2,3,7,8 TCDD FET (toxicidade equivalente)

2.11 – Bibliografia

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1987). **NRB 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro.
- [2] CHRISTENSEN, T.H.; COSSU, R.; STEGMANN, R. (1996). *Landfilling of waste: biogas*. London: E & FN Spon.
- [3] CLIMATE change 2001: the scientific basis – contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Cambridge: Cambridge University Press.
- [4] PINGUELLI ROSA, L. (1996). Risks, uncertainty and the equity issue in GHG emissions: a latin american ieu point. In: PINGUELLI ROSA, L.; SANTOS, M.A. (Ed.). *Greenhouse gas emission under developing countries poin of view*. Rio de Janeiro: COPPE/ENERGE/ALAPE. p.261-262.
- [5] GRADEL, T.E.; CRUTZEN, P.J. (1997). *Atmosphere, climate and change*. New York: Scientific American.
- [6] USEPA (1998). *Greenhouse gases emission of management of municipal solid waste*. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 14 Ago.2002.
- [7] PACEY, J.G. (1986). The Factors influencing landfill gas production. In: ENERGY FROM LANDFILL GAS CONFERENCE, 1986., Solihull. *Proceedings...* England: Elsevier. p.51-59.
- [8] GURIJALA, K.R.; SULFLITA, J.M. (1993). Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landifill samples. *Environment of Science and Techonology*, Washington, v.27, n.6, p.1176-1181.
- [9] NYNS, E.J.; GENDEBIEN, A. (1993). Landifill gas: from environment to energy. *Water Science & Technology*, London, v.27, n.3, p.253-259, Fev.

- [10] BROSSEAU, J. (1994). Trace gas compounds emissions from municipal landfill sanitary sites. *Atmospheric Environment*, Amsterdam, v.28, n.2, p.285-293, Jan.
- [11] CAMPOS, J.R. (1999). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro: ABES. Cap.10, p.251.
- [12] COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1979). *Manual de instruções básicas para a execução de aterro sanitário - anexo 3*. São Paulo.
- [13] BLAHA, D. et al. (1999). Natural and anthropogenic methane source in New England. *Atmospheric Environment*, Amsterdam, v.33, n.2, p.243-255, Jan.
- [14] MURRAY, J.P.; ROUSE, J.V.; CARPENTER, A.B. (1981). Groundwater contamination by sanitary landfill leachate and domestic wastewater in carbonate terrain: principal source diagnosis, chemical transport characteristics and design implications. *Water Research*, New York, v.15, n.6, p.745-757.
- [15] RODRIGUES, F.L.; CAVINATO, V.M. (1997). *Lixo: de onde vem?, para onde vai?*. São Paulo: Moderna.
- [16] FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (1992). *Vocabulário básico do meio ambiente*. 4.ed. Rio de Janeiro.
- [17] AS, L.A.C.M.; KIRCHNER, F.F.; LOCH, C. (1993). Resíduos sólidos: uma solução através do sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. *Anais...* [S.l.]:[s.n.]. p.129-134.
- [18] BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, W.A. (1993). *Manual de tratamento de águas residuárias industriais*. São Paulo: CETESB.

- [19] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Compromisso Empresarial para a Reciclagem. (1996). *Lixo municipal*: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE. IPT Publicação, 2163.
- [20] McARDLE, J.L.; AROZARENA, M.M. (1988). *Treatment of hazardous waste leachate*. New Jersey: Noyes Data.
- [21] JAMES, K.J.; STACK, M.A. (1997). The Impact of leachate collection on air quality in landfills. *Chemosphere*, Oxford, v.34, n.8, p.1713-1721, Apr.
- [22] BAIRD, C. (1999). *Environmental chemistry*. New York: W.H.Freeman. p.368.
- [23] PAGLIUSO, J.D.; PASSIG, F.H.; VILLELA, L.C.H. (2002). Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants. In: TALLER Y SYMPOSIUM LATINO AMERICANO SOBRE DIGESTION ANAEROBIA, 7., 2002, Mérida. *Proceedings...* México: IWA. p.96-110.
- [24] COSTA, M.C.D; PAGLIUSO, J.D.; MILIOLI, F.E. (2001). Effects of temperature on the conversion and global reaction rate coefficient in the absorption of SO₂ by limestone in a fluidized bed reactor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2001, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. p.85-95.
- [25] MINISTÉRIO DO AMBIENTE (1997). *Plano estratégico dos resíduos sólidos urbanos*. São Paulo.
- [26] LEE, M.L.; NOVOTNY, M.; BARTLE, K.D. (1981). *Analytical chemistry of polycyclic aromatic compounds*. New York: Academic Press.
- [27] WILLIAMS, P.T. (2001). *Pollutants from incineration: an overview*. Leeds Department of fuel and energy.
- [28] GELBOIN, E.; TSO, S. (1978). *Polycyclic hidrocarbons and cancer*. New York: Academic Press.

- [29] DAVIES, I.W. et al. Título do artigo. *Environmental Scence & Tecnology*, Easton, v.10, n.5, p.451-453.
- [30] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1996). *Stationary source emissions* – determination of the nass concentration of PCDD/PCDFs. Part 1: Sampling. [S.i.]
- [31] ROSS, B.J.; NAIKWADI, K.P.; KARASEK, F.W. (1989). *Effect of temperature, carrier gas and precursor structure on PCDD and PCDF formed from precursurs by catalytic activity of MSW Incinerator fly ash*. *Chremosphere*, Oxford, v.19, n.1/6, p.291-298.
- [32] DÜWEL, U.; NOTTRODT, A.; BALLSHMITER, K. (1990). *Simultaneous sampling of PCDD/PCDF inside the combustion chamber and on four boiler levels of a waste incinerator palnt*. *Chemosphere*, Oxford, v.20, n.10/12, p.1839-1846.
- [33] SINDICIC, D.R. (2002). *Efeitos da adição de O₂ puro sobre as emissões poluentes produzidas na incineração industrial de resíduos perigosos*. 110p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Orientador – PAGLIUSO, J.D.) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- [34] U.S.A.I.D. (1997). *Characterization of landfill sites in Brazil for landfill gas recovery*. Disponível em:<<http://www.usaid.gov>>. Acesso em: 24 Mar. 2003

Capítulo 3

EXPERIMENTAL

3.1 – Descrição Geral do Aterro Sanitário

Parte do trabalho experimental, foi realizada junto ao aterro sanitário de São Carlos, cujas principais características são descritas a seguir.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos, consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário. A Figura 3.1, apresenta vista do Aterro Sanitário de São Carlos.

Figura 3.1 – Vista geral do aterro sanitário

3.1.1 – Localização e Acesso

O aterro localiza-se na Fazenda Guaporé, distante aproximadamente 15 km do centro da cidade de São Carlos e tem acesso pela Rodovia Washington Luiz.

3.1.2 – Tipo de Aterro

O Aterro Sanitário de São Carlos foi executado abaixo do nível original do terreno, em escavações oriundas de erosões ocorridas em áreas da Fazenda Guaporé e Fazenda Embaré. Como cada erosão dista-se entre si aproximadamente 200 metros, tem-se na realidade dois aterros sanitários, denominados AS-1 e AS-2, de idêntica concepção.[1]

Figura 3.2 – Área em planta dos sub-aterro AS-1 e AS-2

3.1.3 – Área

O aterro AS-1, possui uma área superficial de 110.000 m² e o AS-2 uma área de 70.000 m², totalizando um total de 180.000 m².

3.1.4 – Topografia

As áreas do Aterros AS-1 e AS-2, constituem-se em escavações resultantes de antigas erosões já estabilizadas. Suas dimensões são bastantes variadas, tanto no que se refere a largura como na altura, apresentando taludes com inclinações muito próximas a 90°. Essas características tornaram obrigatório a realização de determinadas obras de preparação que facilitaram o desenvolvimento do aterro em condições operacionais seguras e eficientes. [1]

3.1.5 – Idade

As capacidades volumétricas, bem como a vida útil de cada camada dos dois sub aterros, com início considerado em janeiro de 1989, são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Capacidade volumétrica e vida útil do aterro sanitário

Sub Aterro	Camada	Capacidade Volumétrica (m ³)	Vida Útil (meses)
AS-1	1 ^a	29.220	7,4
	2 ^a	38.958	9,8
	3 ^a	32.944	8,2
AS-2	1 ^a	36.386	8,7
	2 ^a	86.726	20,0
Total		224.234	54,1

A partir da capacidade volumétrica da área, avaliada em 117.405m^3 e dos dados apresentados na Tabela 3.1, foi estimada a vida útil do aterro sanitário com sendo de 4,5 anos. O aterro AS-1 conta hoje com 03 camadas acima do nível do solo, e o aterro AS-2, está em fase de execução.

3.1.6- Quantidade de Lixo Gerado

O volume de lixo a ser depositado no aterro foi calculado a partir da previsão de crescimento populacional e do índice de produção “per capita” obtidos para o município, sendo hoje este valor de 130 t/dia de lixo.

3.1.7 – Memorial Descritivo do Aterro Sanitário

3.1.7.1 – Instalações de Apoio

As instalações de apoio são estruturas auxiliares que têm por objetivo garantir o funcionamento do aterro sem solução de continuidade e dentro dos padrões estabelecidos pela técnicas de engenharia e de saneamento ambiental. No Aterro Sanitário de São Carlos são constituídas por:

- Cercas – têm como função o controle de entrada e saída, além de ser garantido o isolamento do mesmo da presença de animais ou da atuação de catadores;
- Portaria – instalação de controle e anotação da entrada e saída de resíduos e outros materiais do aterro;
- Prédio para estocagem de materiais;
- Acessos Internos – têm como função garantir a chegada de veículos às frentes de operação;
- Iluminação;
- Infra estrutura – portaria, vigias, almoxarifado, balança.

3.1.7.2 – Sistema de Drenagem de Líquidos Percolados

Tem por objetivo coletar os líquidos percolados do lixo depositado no aterro, que tendem a infiltrar-se no solo contaminando as águas do sub solo.

No aterro em questão foi executado uma linha de drenos de brita, com dimensões mínimas de 0,40 x 0,40 m, escavada na camada de terra colocada sobre a camada de impermeabilização de fundo. Este dreno é aberto na linha central do fundo das valas a serem aterradas, na convergência das declividades da camada de impermeabilização, facilitando desta maneira, a remoção desses líquidos para fora da área. [1]

3.1.7.3 – Sistema de Tratamento de Líquidos Percolados

No aterro sanitário de São Carlos, optou-se pelo sistema “Sistema Australiano” de lagoas de oxidação, ou seja, um conjunto composto por uma lagoa anaeróbia e uma facultativa, para o tratamento desses líquidos. Estas lagoas foram escavadas diretamente no solo e toda a superfície de escavação impermeabilizada por uma camada de solo argiloso de 0,5m de espessura. A técnica de execução dessa impermeabilização é similar à utilizada nas valas para aterramento dos resíduos.

Devido à diferença de nível entre a cota de saída dos drenos de líquidos e a lâmina das lagoas, essas funcionam por gravidade, sem a necessidade, portanto, da utilização de bombas.

3.1.7.4 – Sistema de Drenagem de Gases

É realizado através de um sistema de drenagem, constituído pela superposição vertical de tubos perfurados de concreto, revestidos por uma camisa de brita. Os gases são incinerados. A Figura 3.3 demonstra um queimador de gás existente no aterro.

Figura 3.3 – Queimador de biogás

3.1.7.5 – Corte esquemático do Aterro Sanitário

A Figura 3.4 demonstra um corte esquemático de um aterro sanitário, onde se pode observar detalhes da captação do líquido percolado (chorume), e do biogás produzido, bem como detalhes da impermeabilização do solo.

Figura 3.4 – Corte esquemático de um aterro sanitário

3.2 – Metodologia

Dentro do objetivo deste trabalho, para estabelecer a aplicabilidade do processo proposto é necessário fazer um balanço de energia onde estão envolvidas a vazão e a composição química do gás (energia disponível), calor específico, calor latente de vaporização e eventualmente poder calorífico residual do chorume (consumo de energia).

O processo deve atingir de forma estável temperaturas em torno de 900°C, consideradas seguras para evitar a formação de poluentes no interior da câmara de combustão [2].

Para determinar quais poluentes do ar seriam potencialmente gerados e que tratamento seria aplicado aos gases da incineração para sua remoção, é preciso conhecer a composição química do chorume.

Nas temperaturas típicas de combustão, o enxofre, por exemplo forma SO_2 e SO_3 , o Cl pode formar HCl e organos clorados, metais pesados podem ser emitidos na forma gasosa ou incorporados ao material particulado (MP) e N pode dar origem ao NO_x (NO e NO_2) nascente.

Fez-se ainda um estudo preliminar da aplicabilidade da micro filtração como forma de reduzir o teor de água do chorume e assim sua demanda por energia.

3.3 – Coleta de Amostras

Foram coletadas para análise química e física amostras de chorume bruto provenientes do aterro sanitário da cidade. Estas amostras foram retiradas na entrada das lagoas de armazenagem que o aterro utiliza.

Figura 3.5 – Detalhe da lagoa de chorume, utilizada para coleta de amostras

As amostras foram recolhidas em frascos de vidro, com tampa plástica de rosca, lavados previamente com uma solução de 50% de ácido concentrado e 50% de água. A temperatura média das amostras, quando do recolhimento foi de 24 °C. Assim que chegaram ao laboratório, as amostras tiveram seu pH aferido (~8) e foram guardadas em geladeira a 4°C, ao abrigo da luz até o momento dos testes.

As amostras do biogás foram extraídas utilizando uma mangueira introduzida no interior do tubo dos queimadores de gás do aterro, para evitar sua diluição com ar atmosférico e fazendo a sucção através de uma ampola de vidro cheia de água, equipada com uma torneira em cada uma das suas extremidades de maneira a possibilitar a saída da água e a entrada do gás. A mangueira foi previamente purgada por exposição ao gás.

A Figura 3.6 mostra a operação de coleta do biogás realizada em um dos queimadores.

Figura 3.6 – Captação do biogás para análise e composição química

3.4 – Vazão do Chorume

Para determinação da vazão de chorume produzida pelo aterro, utilizou-se um recipiente de coleta de 20 litros e um cronômetro para medida do tempo de enchimento do recipiente. Isto foi feito na entrada das lagoas/reservatórios de chorume.

A vazão foi calculada para o tempo gasto em segundos para enchimento de um recipiente de 20 litros, demonstrada pela fórmula:

$$V = \left(\frac{\text{volume do recipiente}}{\text{tempo de enchimento}} \right) \times 3,6 \text{ (m}^3\text{/hora)}$$

3.5 – Vazão do Biogás

A determinação da vazão de gás do aterro foi realizada em alguns queimadores apenas, utilizando para isto uma sonda que foi desenvolvida, construída e calibrada no NETeF. A sonda utiliza elementos de um sistema de anemometria de fio quente DISA 55M System, mas é modificada para fornecer médias espaciais e temporais em lugar da resolução temporal/espacial típica fornecida por este tipo de equipamento

A sonda é composta por um fio níquel cromo de diâmetro de wg 45, com o comprimento de 3,0 cm, colocado no centro de um anel de aço, que é introduzido no interior do queimador de gás do aterro sanitário. O detalhe da Sonda é demonstrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Detalhe da Sonda

Figura 3.8 – Detalhe da Sonda – fio de níquel cromo

Figura 3.9 – Vista da Sonda

Observou-se que as lagoas também possuem emissão de biogás através de sua superfície, entretanto sua vazão não foi monitorada.

3.5.1 – Calibração da Sonda para Medida da Vazão do Biogás

A sonda foi calibrada com ar, utilizando para isto uma rede ar comprimido a baixa pressão alimentada por um soprador centrífugo. Utilizou-se um manômetro inclinado para medida da diferença de pressão.

O procedimento para calibração da sonda e sua utilização no campo é descrito a seguir:

1. Liga-se a sonda num conector BNC, situado na parte frontal do equipamento, com um cabo de 5,00 m de comprimento;
2. O anemômetro é inicialmente ligado e espera-se 3 minutos para seu aquecimento;
3. A deca da resistência do anemômetro deve ser ajustada para ficar em zero (0 0 , 0 0);
4. A chave função deve estar inicialmente na posição “res. measure”;
5. A chave volts para a utilização do anemômetro foi fixada em 10, para efeito de range, para leitura no voltímetro;
6. É realizado um curto na sonda para a calibração da ponte interna de voltagem, sendo compensada através de um potenciômetro instalado na parte frontal do equipamento. A leitura é feita através de um multímetro ligado ao aparelho;
7. Após esta operação desliga-se o curto na sonda e marca-se a resistência medida na década de resistência, sendo que esta deve ser lida no multímetro;
8. Depois de equilibrada a ponte, a chave função deve ser posicionada na posição operação;

9. A leitura no multímetro, posicionado em 20 V, para efeito de escala, será o “zero” para as medidas a serem efetuadas. Este valor de leitura encontrado é subtraído do valor encontrado na etapa de numero 7.

O detalhe da bancada de calibração é demonstrado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Esquema da bancada de calibragem da Sonda

3.5.2 – Calibração da Sonda de Vazão

Para estas medidas foi utilizada a sonda desenvolvida durante este trabalho. Estes valores são determinados no gráfico correspondente aos valores obtidos através da calibração da sonda, utilizando-se o cálculo de descarga de fluido compressível através de placa de orifício “corner tap”. Estes cálculos estão demonstrados nos anexos.

O cálculo da aferição do manômetro inclinado utilizado para este experimento está demonstrado nos anexos.

3.5.3 – Vazão Medida

O resultado dos valores obtidos nas placas de orifícios de diâmetros 6,85mm, 11,8mm e 14,5mm, estão demonstrados na figura 3.11, que possibilita a determinação da Vazão, no aterro, utilizando-se da sonda desenvolvida. Esta demonstrado também os valores encontrados nos três queimadores de gases. Foi escolhido para a medida da vazão um queimador em cada camada do aterro sanitário.

Figura 3.11 – Valores obtidos na calibração da sonda para as placas de orifício.

3.6 – Propriedades do Chorume

3.6.1 - Poder Calorífico do Chorume

Na determinação do poder calorífico do chorume foi utilizado um calorímetro C 5000 – IKA Labortechnik (IKA – labortechnik C 5000 control). As amostras foram de 0,5 g de chorume em três condições, bruto, microfiltrado ou misturado com etanol. Foram realizados testes com diferentes porcentagens de mistura entre o chorume e o etanol, conforme a Tabela 3.2

Tabela 3.2 – Porcentagens da mistura chorume etanol

	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Chorume	25%	50%	75%
Etanol	75%	50%	25%

Figura 3.12 - Calorímetro C 5000 – IKA Labortechnik (IKA – labortechnik C 5000 control)

Não houve poder calorífico detectável para o chorume em estado bruto ou concentrado por microfiltração. As misturas com etanol mostraram poder calorífico proporcional à fração de álcool. Concluiu-se portanto que não há qualquer energia disponível no chorume. Assim admitiu-se para os balanços de energia que o chorume tenha as propriedades da água.

3.6.2 - Análise de Metais Pesados

A determinação de metais pesados foi realizada através de Espectrometria de Absorção Atômica com o método de adição de padrão. Para tanto, os padrões foram preparados em meio ácido, aproximadamente 0,1ml de ácido clorídrico, com concentração de metal de 1000 µg/ml e o volume final de 100ml. Utilizou-se um aparelho de absorção atômica marca HITACHI, modelo Z 8100.

Para preparar a amostra para o aparelho de absorção atômica, as amostras de chorume foram levadas à digestão ácida. Para cada digestão foram tomados 50 ml de chorume, transferidos para elen meyer de 100 ml de volume e adicionados a 20 ml de água régia (15 ml de HCl e 5 ml de HNO₃) e posteriormente levados à fervura em um agitador/aquecedor magnético até secura da amostra, para a eliminação de toda a matéria orgânica.

Posteriormente a amostra seca foi ressuspensa e filtrada. O filtrado foi transferido para um balão volumétrico de 100 ml e seu volume completado com água milli-Q.

Para medida de metais pesados na absorção atômica foi tomado 10 ml da amostra digerida e transferida para um balão volumétrico de 50 ml e completou-se o volume com água milli-Q até 50 ml.

3.6.2.1 – Resultados da Análise de Metais Pesados

Os resultados obtidos na análise de metais pesados por digestão anaeróbica são mostrados na Tabela 4.3 (Seção 4.3.1). Nota-se a presença de vários metais sobretudo Ni e Al que poderiam dar origem a emissões poluentes. Um balanço de massa deve avaliar os valores máximos das emissões de metais considerando que todo o metal do chorume esteja presente nos gases e material particulado do incinerador. Entre as técnicas utilizadas para a remoção destes materiais está a sua absorção por carvão ativado, realizada em uma combinação de lavador seco e filtro de mangas.

3.6.3 – Presença de Elementos Formadores de Gases Ácidos e Cinzas

A Tabela 4.3 (Seção 4.3.1) mostra as concentrações de Cinzas, Cl, F, S e N no chorume. A presença destes elementos significa que há potencial para formação dos gases SO₂, SO₃, HCl, HF, NO e NO₂. Novamente as quantidades máximas estão sendo calculadas através do balanço de massa. Note-se que cerca de 95% do SO_x produzido na combustão é SO₂, e o mesmo vale para o NO_x, onde de 90 a 95% das emissões são na forma de NO.

3.6.4 – Micro Filtração de Chorume

Para verificar a possibilidade de remoção de água do chorume e desta forma reduzir a sua demanda energética, foram realizados testes com microfiltração.

As Figuras 3.13 e 3.14 apresentam esquematicamente a bancada utilizada para análise experimental do processo de microfiltração. No módulo de filtração, construído de aço inox, é inserido um tubo cerâmico poroso de 60 cm de comprimento e 10 mm de diâmetro interno, com área superficial de $0,038 \text{ m}^2$. O fluido de estudo é mantido em circulação a partir do tanque, por meio de uma bomba centrífuga.

A pressão através da parede porosa (pressão transmembrana) foi mantida em 2 bar por causa do limite de capacidade da bomba e o processo foi investigado através de medidas da vazão transmembrana ou permeado registradas em função do tempo durante 45 minutos.

Figura 3.13 - Esquema geral do processo de micro-filtração

Figura 3.14 - Escoamento de mistura com sólido em suspensão no tubo poroso.

Notou-se através do volume inicial que houve uma redução de apenas 2% do teor de água existente no chorume. As misturas com etanol mostraram poder calorífico proporcional à fração de álcool.

3.7 – Composição do Biogás

Na determinação da composição do biogás utilizou-se um cromatógrafo Grow-Mac com detector de condutividade térmica e coluna Porapak Q (2m x 1/2 - 80 a 100 mesh).

Os principais constituintes do biogás do aterro sanitário são mostrados na Tabela 4.4 (Seção 4.3.2). Nota-se que o metano tem uma concentração volumétrica de 51% e os demais gases, que são os inertes CO_2 e N_2 atingem 49%. Gases traços não foram detectados. Esta composição deve conferir ao biogás um poder calorífico (PC) em torno de 18 MJ/Nm³ ou 25 MJ/kg. Como comparação, o PC do etanol é de 26.8 MJ/kg.

Para a coleta do biogás na lagoa de chorume, utilizou-se uma ampola de vidro com uma torneira em cada extremidade, com água em seu interior. Um funil de metal foi mergulhado no chorume e após retirado o ar de seu interior. Após este procedimento, foi plugado o bico do funil e uma das extremidades da ampola através de uma mangueira de silicone.

A coleta do biogás foi executada junto a margem da lagoa, próximo a saída da tubulação que coleta o chorume no aterro e despeja na lagoa.

3.8 – Energia Disponível

Para a realização do balanço de energia adotou-se neste trabalho o estado de referência de 25°C e 0,1 MPa para os reagentes, o que representa bem o estado do biogás e de seu ar de combustão. Admitindo que os reagentes gasosos se comportem como gases perfeitos entre o estado de referência e o estado considerado, a entalpia de reagentes e produtos passa a ser uma função exclusiva da temperatura e pode ser determinada em qualquer condição de interesse utilizando-se as correlações disponíveis na literatura para o calor específico dos gases à pressão constante.

Na fornalha pode-se aplicar a conservação da energia para volumes de controle estáticos em condições de regime permanente, com as hipóteses de: condições uniformes nas seções de entrada e saída, presença de reações químicas no seu interior, ausência de variações significativas das energias cinética e potencial dos escoamentos e ausência de troca de energia sob a forma de trabalho mecânico através da fronteira. A Figura 3.15 esquematiza o volume de controle e os fluxos de gases e calor através de sua fronteira.

Figura 3.15 – Esquema do volume de controle para o cálculo do balanço de energia

Observada as restrições impostas acima e considerando o volume de controle da Figura 3.15 a equação da conservação da energia toma a forma:

$$Q_D = \sum_P n_s (h_f + \Delta h_s) - \sum_R n_e (h_f + \Delta h_e) \quad (3.1)$$

Onde P e R designam produtos e reagentes respectivamente, e:

- Q_D é a troca de energia sob a forma de calor realizada com o exterior, neste caso o chorume,
- n é a descarga molar de cada espécie química,
- h_f é a entalpia de formação das espécies químicas
- Δh a correção destas entalpias da condição padrão (25°C) para a temperatura considerada.

Para o cálculo da máxima energia disponível por mol de metano foram estabelecidas as seguintes condições:

- Excesso de ar: $\lambda = 1,10$, ou seja 10 % de excesso de ar. Nesta condição tem-se ar suficiente para combustão virtualmente completa e evita-se a perda de energia pelo excesso de gases aquecidos;
- Temperatura $T = 900^\circ \text{C}$. Esta é uma temperatura elevada o bastante para destruir compostos orgânicos perigosos e baixa o suficiente para evitar a formação expressiva de NO_x . Adicionalmente experiência no NETeF tem mostrado que é possível a temperaturas até 900°C dispensar o uso de refratários, construindo o combustor em aço inoxidável. Isto reduz consideravelmente o custo de uma unidade de incineração. [2],[3]

A equação para a combustão completa de um mol de metano, considerando a composição do biogás e o coeficiente de excesso de ar $\lambda=1,10$ é:

Reagentes:

Como a condição assumida para os reagentes é a padrão ($T=25^{\circ}\text{C}$), a correção da entalpia é nula para todos os reagentes. Da mesma forma a entalpia de formação é nula para as formas mais estáveis do oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2).

A Equação 3.2 mostra o cálculo da entalpia dos reagentes :

$$h_R = \sum_R n_e(h_f + \Delta h) = 1,00(h_{f\text{CH}_4} + 0,0) + 0,176(h_{f\text{CO}_2} + 0,0) + 9,06(0,0+0,0) + 2,20(0,0+0,0) \quad (3.2)$$

Produtos:

Para o cálculo da correção da entalpia (Δh) foi utilizada a definição de calor específico e as correlações que fornecem o calor específico a pressão constante em função da temperatura, Equações 3.3 a 3.9:

$$c_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T} \right)_p \quad (3.3)$$

$$dh = c_p dT \quad (3.4)$$

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (3.5)$$

$$c_p \text{CO}_2 = -3,7357 + 30,529 \theta^{0,5} - 4,1034\theta + 0,02481\theta^2 \quad (3.6)$$

$$c_p \text{H}_2\text{O} = 143,5 - 183,54\theta^{0,25} + 82,751\theta^{0,5} - 3,6989\theta \quad (3.7)$$

$$c_p \text{O}_2 = 37,432 + 0,020102\theta^{1,5} - 178,571\theta^{-1,5} + 236,88\theta^{-2} \quad (3.8)$$

$$c_p \text{N}_2 = 36,060 - 512,79\theta^{-1,5} + 1072,70\theta^{-2} - 820,40\theta^{-3} \quad (3.9)$$

A correção da entalpia dos produtos de combustão é feita segundo a Equação 3.5.

A Equação 3.10 mostra o cálculo da entalpia dos reagentes :

$$h_p = \sum P n_s (h_f + \Delta h_s) = 1,18(h_{fCO_2} + \Delta h) + 2,00(h_{fH_2O} + \Delta h) + 0,20(h_{fO_2} + \Delta h) + 9,06(h_{fN_2} + \Delta h) \quad (3.10)$$

O cálculo da energia disponível por kmol de CH_4 portanto é a diferença da entalpia dos produtos pela entalpia dos reagentes, expresso pela Equação 3.11:

$$Q_D = h_p - h_R \quad (\text{kJ / kmol de } CH_4) \quad 3.11$$

O detalhamento dos cálculos acima é demonstrado no Capítulo 4 deste trabalho.

3.9 – Bibliografia

- [1] FILSAN ENGENHARIA E SERVIÇO S/A (1989). *Aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos – Fazenda Guaporé*. São Carlos. Projeto Executivo.
- [2] COSTA, M.C.D.; PAGLIUSO, J.D.; MILIOLI, F.E. Effects of temperature on the conversion and global reaction rate coefficient in the absorption of SO₂ by limestone in a fluidized bed reactor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2001, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. p.85-95.
- [3] PAGLIUSO, J.D.; PASSIG, F.H.; VILLELA, L.C.H. Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants. In: TALLER Y SYMPOSIUM LATINO AMERICANO SOBRE DIGESTION ANAEROBIA, 7., 2002, Mérida. *Proceedings...* México: IWA. p.96-110.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Vazão do Chorume

A vazão média anual de chorume medida no vazodouro que alimenta as lagoas de chorume foi de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, ou $48 \text{ m}^3/\text{dia}$. Existe ainda uma outra tubulação de chorume abaixo da que foi usada no estudo, cuja vazão não foi possível computar, pois a mesma fica submersa.

Parte das medidas foi feita durante a pesquisa e parte foi cedida pela companhia que opera o aterro

Medidas feitas ao longo do ano mostraram efeitos sazonais na produção de chorume (Figura 4.1 e Tabela 4.1), com forte influência do período de chuvas. Isto agrava bastante o problema no aterro, com a possibilidade de extravazamento das lagoas de captação. Aumenta, desta forma, o risco de que o percolado venha a infiltrar-se no solo comprometendo as águas subterrâneas.

Tabela 4.1 – Vazão do chorume de Janeiro a Agosto do ano de 2002 (m³/hora)

Dia	Mês							
	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto
01	2,9	4,0	5,5	2,8	1,6	1,4	1,3	1,4
02	3,1	6,0	3,1	2,3	1,6	DOM	1,3	1,4
03	2,8	DOM	DOM	2,1	1,6	1,3	1,3	1,4
04	2,6	2,6	3,1	2,1	1,6	1,3	1,3	DOM
05	2,6	3,3	3,0	2,1	DOM	1,3	1,4	1,4
06	DOM	3,3	2,9	2,1	1,6	1,3	1,4	1,4
07	4,2	3,6	2,7	DOM	1,6	1,3	DOM	1,4
08	9,0	4,2	3,6	2,1	1,6	1,3	1,4	1,4
09	4,8	12,0	2,9	2,1	1,6	DOM	1,4	1,4
10	4,2	DOM	DOM	1,9	1,6	1,3	1,4	1,4
11	3,6	7,2	2,7	1,9	1,6	1,3	1,4	DOM
12	3,8	4,8	3,6	1,9	DOM	1,3	1,4	1,4
13	DOM	4,0	2,6	1,9	1,6	1,3	1,4	1,4
14	7,2	4,8	2,7	DOM	1,6	1,3	DOM	1,4
15	5,1	4,8	2,8	1,8	1,5	1,3	1,4	1,4
16	4,2	6,0	2,6	1,7	1,5	DOM	1,4	1,4
17	3,8	DOM	DOM	1,7	1,4	1,3	1,4	DOM
18	3,6	4,5	2,4	1,7	1,4	1,3	1,4	1,6
19	2,9	4,0	2,5	1,7	DOM	1,3	1,4	1,6
20	DOM	3,6	2,4	1,7	1,4	1,3	1,4	1,6
21	3,6	4,5	2,4	DOM	1,5	1,3	DOM	1,6
22	3,3	4,8	2,3	1,6	1,5	1,3	1,3	1,6
23	3,3	3,1	2,3	1,6	1,5	DOM	1,3	1,7
24	2,9	DOM	DOM	1,6	1,5	1,3	1,3	DOM
25	4,8	5,1	4,0	1,6	1,5	1,3	1,3	1,7
26	4,5	4,2	4,0	1,6	DOM	1,3	1,3	1,6
27	DOM	3,8	4,8	1,6	1,4	1,3	1,3	1,6
28	5,5	3,4		DOM	1,4	1,3	DOM	1,6
29	5,1	DOM		1,6	1,4	1,3	1,3	1,6
30	4,5			1,6	1,4	DOM	1,3	1,6
31	4,2				1,3		1,3	DOM

Figura 4.1 – Vazão de chorume no período de Janeiro a Agosto de 2002

4.2 – Vazão do Biogás

Foram realizadas medidas para a determinação da vazão do biogás em três queimadores de gás localizados no Aterro Sanitário de São Carlos, utilizando a sonda especialmente desenvolvida neste trabalho (Seção 3.5).

4.2.2 – Vazão Medida

Os valores obtidos da vazão nos queimadores está demonstrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores encontrados na leitura dos queimadores

Queimadores	Vazão (m ³ /h)
Q1	31,5
Q2	32,5
Q3	34,2

Os valores da Tensão medidos nos queimadores de biogás, utilizando-se da sonda, foram 7,23, 7,42, e 7,54 Volt, que foram utilizados para a determinação dos valores apresentados na Tabela 4.2.

O objetivo de se tomar medidas em níveis diferentes do aterro, foi de observar se o tempo em que os resíduos ficam depositados influencia na produção do biogás, sendo que no nível mais baixo o tempo de depósito do resíduo é mais maior do que o nível mais alto. Foi também amostrado um queimador de biogás do nível intermediário.

O valor da vazão de 31,5 m³/h, foi encontrado no nível mais inferior, sendo que o valor da vazão de 34,2 m³/h foi encontrado no nível superior. O queimador de biogás é um ponto de coleta (convergência) do biogás, representando uma área de produção do biogás.

Existem 20 queimadores de biogás em todo o aterro sanitário. Utilizando um valor médio para a vazão de 32,7 m³/h, teremos uma produção de 654 m³/h de biogás.

4.3 – Composição Química

4.3.1 – Composição Química do Chorume

Os principais elementos químicos e cinzas encontrados nas análises realizadas com as amostras do chorume são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Principais elementos químicos e cinzas encontrados nas amostras de chorume

Elemento	Unidade
Ni	6,47 ppm*
Al	8,67 ppm*
Cr	1,23 ppm*
Cu	0,80 ppm*
Cd	0,10 ppm*
Pb	1,50 ppm*
Fe	26,00 ppm*
Zn	1,20 ppm*
Nitrogênio	1726 mg/kg
Cloro	1332 mg/kg
Flúor	6,00 mg/kg
Enxofre	176 mg/kg
Cinzas	100 mg/kg

*em massa

Como o chorume será incinerado, suas concentrações no efluente gasoso deverão seguir padrões de emissões. Dentre os elementos apresentados na amostra do chorume, de acordo com a NBR 11175 [1], o Cd pertence a Classe 1; o Ni a Classe 2; o Pb, Cr, F, Cu pertencem a Classe 3. Os elementos N, S e F, geram gases com potencial de emissões como óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, compostos clorados inorgânicos e compostos fluorados inorgânicos.

4.3.2 – Composição Química do Biogás

A composição do biogás foi determinada através da análise de amostras colhidas nos queimadores de gás e na superfície da lagoa de chorume. Os resultados encontrados são mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Teores de metano, dióxido de carbono e nitrogênio do biogás produzido no aterro e na lagoa de chorume

Composto	Queimadores de Gás	Lagoas de Chorume
CH ₄	51 %	5 %
CO ₂	9 %	1,3 %
N ₂	40 %	93,7 %

Observa-se na Tabela 4.4, que o teor de metano na composição do biogás amostrado no queimador no aterro sanitário é maior que o teor de metano encontrado no biogás da lagoa de chorume.

Neste trabalho não foi determinada a vazão do biogás na lagoa de chorume, tornando neste momento impossível a comparação da vazão do biogás entre o aterro sanitário que possui uma área superficial de 110.000 m² e a lagoa de chorume que possui uma área de 4.624 m².

Ambientalmente, é necessário a eliminação da lagoa de chorume, pois há emissão de metano, que é um poderoso gás efeito estufa, além do perigo de contaminação das águas subterrâneas pelo chorume.

4.4 – Outras Propriedades

Foi determinado o poder calorífico do chorume para analisar se o comportamento do mesmo durante a combustão seria endotérmico ou exotérmico durante o processo. Utilizou-se um calorímetro descrito na Seção 3.6.1.

Foram realizadas medidas com o chorume bruto, chorume misturado com várias frações de etanol e com o chorume microfiltrado.

O poder calorífico do etanol utilizado na mistura é mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Poder calorífico do etanol

Amostra de Etanol	Poder Calorífico (kJ/kg)
Amostra 1	26.331 kJ/kg
Amostra 2	27.273 kJ/kg
Amostra 3	27.440 kJ/kg
Valor Médio	27.015 kJ/kg

Os resultados para as misturas de chorume com o etanol são apresentados na Tabela 4.6

Tabela 4.6 – Poder calorífico de misturas de chorume e etanol (kJ/kg)

Composição da amostra	1° TESTE	2° TESTE	3° TESTE	Valor Médio
25% Chorume 75% Etanol	18.778	18.615	18.503	18.632
50% Chorume 50% Etanol	10.739	10.672	10.130	10.514
75% Chorume 25% Etanol	1.200	837	842	960

Observou-se que o chorume reduziu o poder calorífico do etanol, de 32%, 43% e 96,5% nos valores médios nas composições das misturas, possuindo um comportamento semelhante ao da água.

4.4.1 – Poder Calorífico do Chorume Microfiltrado

Os testes de microfiltração do chorume feitos para determinar a viabilidade da remoção de água e desta forma de redução no consumo de energia na incineração da massa de chorume restante foram realizados em tempos pré determinados de 30, 60 e 90 minutos de microfiltração na bancada. Os materiais microfiltrados foram as misturas de chorume com etanol (Tabela 4.6) e o chorume bruto.

Os resultados encontrados estão demonstrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados da microfiltração do chorume (kJ/kg)

AMOSTRA	1° TESTE (30 min)	2° TESTE (60 min)	3° TESTE (90 min)
25% Chorume 75% Etanol	3.279	3.743	741
50% Chorume 50% Etanol	2.801	2.527	não detectado
75% Chorume 25% Etanol	541	670	não detectado

4.4.2 – Valor do pH

O valor do pH do chorume analisado foi 8. Nota que comporta-se como um meio básico.

4.4.3 – Umidade

O teor de umidade da amostra de chorume foi 70% em peso. Os 30% restantes tinham consistência de pasta, que provavelmente é matéria orgânica.

4.5 – Disponibilidade de Energia

A determinação da vazão e da composição do biogás do aterro permitiu fazer-se um cálculo do potencial energético para a incineração do chorume (Seção 3.8).

Os principais parâmetros considerados no cálculo foram:

- Excesso de ar : $\lambda = 1,10$, ou seja 10% de excesso de ar;
- Temperatura $T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A equação da combustão para o biogás considerando a queima de um mol de metano com 10% de excesso de ar é :

Utilizando a equação da energia :

$$Q_D = \sum_P n_s (h_f + \Delta h_s) - \sum_R n_e (h_f + \Delta h_e)$$

Reagentes:

Como a condição assumida para os reagentes é a padrão ($T=25^\circ\text{C}$), a correção da entalpia é nula para todos eles. Da mesma forma, a entalpia de formação é nula para as formas mais estáveis do oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2).

A Equação 4.1 mostra os termos considerados no cálculo da entalpia dos reagentes e a Tabela 4.8 traz o valor de cada termo.

$$h_R = \sum_R n_i(h_i + \Delta h_i) = 1,00(h_{f\text{CH}_4} + 0,0) + 0,176(h_{f\text{CO}_2} + 0,0) + 9,06(0,0+0,0) + 2,20(0,0+0,0) \quad (4.1)$$

Tabela 4.8 – Entalpias de formação e correções para os reagentes a 25°C e 0,1 Mpa.

Composto	n (kmol/kmol CH_4)	h_f (kJ/kmol)	Δh (kJ/kmol)	$n(h_f + \Delta h)$ (kJ/kmol)
CH_4	1,000	-74873	0,0	-74873
CO_2	0,176	-393522	0,0	-69260
N_2	9,060	0	0,0	0,0
O_2	2,200	0	0,0	0,0
Total				-144133

Produtos:

A correção da entalpia dos produtos de combustão é feita segundo a Equação 4.2, onde

$$\Delta h = \int_{t_1}^{t_2} c_p dt \quad (4.2)$$

As correlações para o cálculo do calor específico dos produtos de combustão são fornecidas pelas equações 4.3 a 4.6, onde $\theta = T(\text{Kelvin})/100$. [2]

$$\text{CO}_2 : \bar{C}po_{\text{co}_2} = -3,7357 + 30,529\theta^{0,5} - 4,1034\theta + 0,024198\theta^2 \quad (4.3)$$

$$\text{H}_2\text{O} : \bar{C}po_{\text{h}_2\text{o}} = 143,05 - 183,54\theta^{0,25} + 82,751\theta^{0,5} - 3,6989\theta \quad (4.4)$$

$$\text{O}_2 : \bar{C}po_{\text{o}_2} = 37,432 + 0,020102\theta^{1,5} - 178,57\theta^{-1,5} + 236,88\theta^{-2} \quad (4.5)$$

$$\text{N}_2 : \bar{C}po_{\text{N}_2} = 39,060 - 512,79\theta^{-1,5} + 1072,7\theta^{-2} - 820,40\theta^{-3} \quad (4.6)$$

A Equação 4.7 mostra o cálculo da entalpia dos produtos de combustão e a Tabela 4.9 traz o valor de cada um de seus termos.

$$h_P = \sum_P n_i(h_i + \Delta h_i) = 1,176 (h_{\text{fCO}_2} + \Delta h_{\text{CO}_2}) + 2,00 (h_{\text{fH}_2\text{O}} + \Delta h_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,20(0,0 + \Delta h_{\text{O}_2}) + 9,06(0,0 + \Delta h_{\text{N}_2}) \quad (4.7)$$

Tabela 4.9 – Entalpias de formação e correções para os produtos a 900 °C e 0,1 Mpa.

Composto	n (kmol/kmol CH ₄)	h _f (kJ/kmol)	Δh (kJ/kmol)	n(h _f + Δh) (kJ/kmol)
CO ₂	1,18	-393522	42900	-413733
H ₂ O	2,00	-241826	33360	-416932
O ₂	0,20	0	28787	5757
N ₂	9,06	0	27240	246794
Total				-578114

Portanto, a energia disponível é:

$$Q_D = -144133 - (-578114)$$

$$Q_D = 433981 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

A energia requerida por kg de chorume incinerado é

$$Q_R = c_{pa} (100 - T_R) + h_{lv} + c_{pv} (T_P - T_R) \quad (4.8)$$

Onde:

- c_{pa} é o calor específico à pressão constante da água;
- T_P é a temperatura dos produtos (25° C);
- T_R é a temperatura dos reagentes (900° C);
- h_{lv} sua entalpia de vaporização à pressão atmosférica;

- c_{pv} o calor específico médio do vapor de água, dado por

$$c_{pv} = \frac{(143,05 - 183\theta^{0,25} + 82,751\theta^{0,5} - 3,6989\theta)}{18(T_P - T_R)} \quad c_{pv} = 2,14 \text{ kJ/kg K}$$

$$c_p = 4,18 \text{ kJ/kg K}$$

$$h_{lv} = 2257 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_R = 4443,4 \text{ kJ/kg de chorume}$$

Assim a razão em massa (R_m) de chorume incinerada por kmol de CH_4 é:

$$R_m = - Q_D / Q_R = 97,6 \text{ kg de chorume / kmol } \text{CH}_4$$

A razão em volume de chorume:

$$\rho_{ch} = 1000 \text{ kg / m}^3$$

$$R_{vch} = \frac{R_m}{\rho_{ch}}$$

$$R_{vch} = 0,097 \text{ m}^3 \text{ de chorume / kmol } \text{CH}_4$$

A razão entre o volume de chorume incinerado e o volume de metano necessário para isto é calculada levando em consideração o volume de um kmol de gás ideal e resulta:

$$v_{mol} = 22,6 \text{ m}^3/\text{kmol} \quad \rightarrow \quad R_v = \frac{R_{vch}}{v_{mol}}$$

$$R_v = 4,31 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ chorume / Nm}^3 \text{ de } \text{CH}_4$$

Produção de CH_4

Admitiu-se para a produção de gás um valor conservador de

$$R_{\text{CH}_4} = 13 \text{ Nm}^3 \text{ de } \text{CH}_4 / \text{t de resíduo}$$

A massa diária de resíduo levada ao aterro é:

$$m_{\text{Res}} = 130 \text{ t/dia}$$

Resulta portanto uma vazão por hora de

$$V_{\text{ZCH}_4} = \frac{m_{\text{Res}}}{24} \cdot R_{\text{CH}_4} \quad (4.9) \quad V_{\text{ZCH}_4} = 70,41 \text{ m}^3/\text{h} \quad (4.10)$$

A vazão incinerável de chorume (V_{chl}) obtém-se pelo produto da produção de biogás (V_{ZCH_4}) pela razão entre o volume de chorume incinerado e o volume do metano (R_v)

$$V_{\text{chl}} = 0,30 \text{ m}^3 \text{ chorume / h}$$

Este volume é considerável a vazão medida do chorume de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, ou 48 m^3 por dia, medida em um dos drenos que abastecem a lagoa de chorume. Existe ainda outro dreno submerso a este, que não foi possível ser avaliado.

4.6 – Potencial de Emissões

Na incineração são produzidos gases efluentes que contém substâncias poluentes originárias do processo, tais como monóxio de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), cloreto de hidrogênio (HCl) e fluoreto de hidrogênio (HF).

4.6.1 – Cálculo da Emissão de Poluentes

Dada a equação da combustão (Seção 4.5) com 10% de excesso de ar, temos o valor da descarga molar de PC por mol de CH₄.

$$PC = 12,44 \text{ mol de PC/mol de CH}_4$$

A quantidade de moles de PC nas CNTP é calculada:

$$N_{PC} = \frac{1.0m^3}{22,4m^3} kmol = 0,046kmol \quad (4.11)$$

Cálculo do número de moles de CH₄ por m³ é dado pela equação:

$$N_{CH_4} = \frac{N_{PC} kmol}{12,44 kmol / kmol CH_4} \quad (4.12)$$

substituindo (4.11) na (4.12), temos:

$$N_{CH_4} = \frac{0,046 kmol}{12,44 kmol PC / kmol CH_4} \quad (4.13)$$

$$N_{CH_4} = 0,036 kmol CH_4/m^3 PC \text{ nas CNTP} \quad (4.14)$$

Sendo a massa de chorume incinerado R_m de 97,6 kg de chorume/kmol de CH₄ (Seção 4.5), determinamos a quantidade de chorume incinerado (m_{ch}) em kg de chorume / kmol de CH₄.

$$m_{ch} = N_{CH_4} \times R_m \quad (4.15)$$

substituindo os valores temos:

$$m_{ch} = 0,036 \frac{kmol_{CH_4}}{m^3 PC} \times 97,6 \frac{kg ch}{kmol CH_4} \quad (4.16)$$

$$m_{ch} = 0,35 \frac{kg chorume}{m^3 PC} \quad (4.17)$$

Para o cálculo do potencial de emissões será utilizado os valores encontrados na Seção 3.6.6, Tabela 3.4

- Cloro – forma HCL – valor encontrado – 1332 mg/kg chorume

$$m_{HCl} = m_{ch} \times HCL \times \frac{M_{HCl}}{M_{Cl}} \quad (4.18)$$

substituindo os valores:

$$m_{HCl} = 0.35 \frac{kg \ ch}{m^3 PC} \times 1332 \frac{mg}{kg \ ch} \times \frac{18 kg / kmol}{17 kg / kmol} \quad (4.19)$$

$$m_{HCl} = 493,62 \text{ mg HCl/m}^3 \text{ PC nas CNTP} \quad (4.20)$$

- Flúor – forma HF – valor encontrado 6,00 mg/kg chorume

$$m_{HF} = m_{ch} \times HF \times \frac{M_{HF}}{M_F} \quad (4.21)$$

substituindo os valores:

$$m_{HF} = 0.35 \frac{kg \ ch}{m^3 PC} \times 6,0 \frac{mg}{kg \ ch} \times \frac{10 kg / kmol}{9 kg / kmol} \quad (4.22)$$

$$m_{HF} = 2,33 \text{ mg HF/m}^3 \text{ PC nas CNTP} \quad (4.23)$$

- Enxofre – forma SO₂ – valor encontrado 176 mg/kg de chorume

$$m_{SO2} = m_{ch} \times SO_2 \times \frac{M_{SO_2}}{M_S} \quad (4.24)$$

Substituindo os valores:

$$m_{SO_2} = 0,35 \frac{kg\ ch}{m^3\ PC} \times 176 \frac{mg}{kg\ ch} \times \frac{64\ kg / kmol}{32\ kg / kmol} \quad (4.25)$$

$$m_{SO_2} = 123,2\ mg\ SO_2 / m^3\ PC\ nas\ CNTP \quad (4.26)$$

- Nitrogênio – forma NO – valor encontrado 1726 mg/kg de chorume

$$m_{NO} = m_{ch} \times NO \times \frac{M_{NO}}{M_N} \quad (4.27)$$

sstituindo os valores:

$$m_{NO} = 0,35 \frac{kg\ ch}{m^3\ PC} \times 1726 \frac{mg}{kg\ ch} \times \frac{30\ kg / kmol}{14\ kg / kmol} \quad (4.28)$$

$$m_{NO} = 1294,5\ mg\ NO / m^3\ PC\ nas\ CNTP \quad (4.29)$$

- Cádmio

$$m_{Cd} = m_{ch} \times Cd \quad (4.30)$$

Substituindo os valores:

$$m_{Cd} = 0,35 \frac{kg\ ch}{m^3\ PC} \times 0,10 \frac{mg}{kg\ ch} \quad (4.31)$$

$$m_{Cd} = 0,035\ mg / m^3\ PC\ nas\ CNTP$$

- Níquel

$$m_{Ni} = m_{ch} \times Ni \quad (4.32)$$

Substituindo os valores:

$$m_{Ni} = 0,35 \frac{kg \ ch}{m^3 \ PC} \times 6,47 \frac{mg}{kg \ ch} \quad (4.33)$$

$$m_{Ni} = 2,26 \text{ mg/m}^3 \text{ PC nas CNTP}$$

- Chumbo

$$m_{Pb} = m_{ch} \times Pb \quad (4.34)$$

Substituindo os valores:

$$m_{Pb} = 0,35 \frac{kg \ ch}{m^3 \ PC} \times 1,50 \frac{mg}{kg \ ch} \quad (4.35)$$

$$m_{Pb} = 0,45 \text{ mg/m}^3 \text{ de PC nas CNTP}$$

- Cromo

$$m_{Cr} = m_{ch} \times Cr \quad (4.36)$$

Substituindo os valores:

$$m_{Cr} = 0,35 \frac{kg \ ch}{m^3 \ PC} \times 1,23 \frac{mg}{kg \ ch} \quad (4.37)$$

$$m_{Cr} = 0,43 \text{ mg/m}^3 \text{ de PC nas CNTP}$$

- Flúor

$$m_F = m_{ch} \times F \quad (4.38)$$

Substituindo os valores:

$$m_F = 0,35 \frac{kg \ ch}{m^3 \ PC} \times 6,0 \frac{mg}{kg \ ch} \quad (4.39)$$

$$m_F = 2,10 \text{ mg/m}^3 \text{ de PC nas CNTP}$$

- Cobre

$$m_{Cu} = m_{ch} \times Cu \quad (4.40)$$

Substituindo os valores:

$$m_{Cu} = 0,35 \frac{kg \ ch}{m^3 \ PC} \times 0,80 \frac{mg}{kg \ ch} \quad (4.41)$$

$$m_{Cu} = 0,28 \text{ mg/m}^3 \text{ de PC nas CNTP}$$

4.6.2 – Limites de Emissões Legais

Os valores encontrados no cálculo de emissões e os valores legais (Tabela 2.8 – Seção 2.10) estão demonstrados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Comparação dos valores encontrados com a legislação

Substância	Legislação	Valor encontrado (CNTP)
HCl	80,0 mg/Nm ³	493,62 mg HCl/m ³
HF	5,0 mg/Nm ³	2,33 mg HF/m ³
SO ₂	280,0 mg/Nm ³	123,2 mg SO ₂ /m ³
NO	560,0 mg/Nm ³	1294,5 mg NO/m ³
Cd		0,035 mg/m ³
Total Classe 1	0,28 mg/Nm ³	0,035 mg/m ³
Ni		2,26 mg/m ³
Total Classe 2	1,4 mg/Nm ³	2,26 mg/m ³
Pb		0,45 mg/m ³
Cr		0,43 mg/m ³
F		2,10 mg/m ³
Cu		0,28 mg/m ³
Total Classe 3	7,0 mg/Nm ³	3,26 mg/m ³

Observa-se pelos valores da Tabela 4.10, que algumas substâncias originadas na incineração necessitam de tratamento.

Hoje existem vários métodos de tratamento de gases efluentes que podem ser utilizados para estas emissões.

4.7 – Bibliografia

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1990). **NRB 11175**: Incineração de resíduos sólidos perigosos – padrões de desempenho. Rio de Janeiro.
- [2] SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C.; WYLEN, G.J.V. (1998). *Fundamentos da termodinâmica*. São Paulo: Edgard Blücher.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões

Aterros sanitários são fundamentais para o despejo final de resíduos, porém vêm sendo utilizados sem muito critério, como depósitos de todo tipo de resíduos, ocupando para tal finalidade espaços físicos cada vez maiores e produzindo fontes poluidoras gasosas (biogás) e líquidas (chorume).

Os resultados deste trabalho indicam que há possibilidade de eliminação de duas das fontes poluentes mais importantes dos aterros, citadas no parágrafo anterior, através da incineração do chorume, poluente do solo e da água, utilizando como combustível o biogás, que por conter metano é capaz de contribuir para a mudança climática.

A sonda desenvolvida neste trabalho possibilitou a realização de medidas de vazão sem produzir interferência no sistema de coleta de gás e com boa precisão na medida, pois trabalha com um sistema modificado de anemometria de fio quente que privilegia os valores médios espaciais e temporais, em lugar dos valores locais como se faz nos sistemas tradicionais. A não interferência é importante, uma vez que todo o aterro compõe um sistema de vazos comunicantes com escoamentos paralelos.

A vazão de biogás, medida em três queimadores, foi próxima de 32,7 m³/h e mostrou valores semelhantes nos três locais. Este resultado, se extrapolado para todo o aterro, resulta em uma vazão de 654 m³/h, que comparada à previsão feita com dados da literatura é 46% maior.

A concentração de metano no biogás foi de 55%, valor próximo daquele normalmente encontrado na literatura.

A perda de gás através da superfície do aterro mostrou-se claramente, visto que em dias de chuva nota-se a formação de bolhas junto à sua superfície.

Ficou claro também que as lagoas de chorume contribuem com a emissão de metano para a atmosfera, embora em quantidades mais modestas. A concentração de metano no gás da lagoa foi de 5%, mas a vazão não pôde ser medida.

O balanço energético mostrou que a relação entre a energia produzida e a energia requerida para a incineração do chorume é positiva, com pequena sobra. Entretanto é preciso cautela com este resultado pois nem todos os queimadores de gás tiveram sua vazão medida e é possível que alguns tenham vazão menor. Além disso podem existir vazamentos de gás no aterro e há uma segunda corrente de chorume que não pôde ser medida durante o trabalho, pois é inacessível.

A vazão de chorume mostrou forte sazonalidade, aumentando, nos primeiros meses do ano, em 60%, em relação à média anual. Este aumento naturalmente coincide com a estação chuvosa e traz algum risco para a operação do aterro.

As estimativas de emissões de gases ácidos e de metais produziram resultados que, de modo geral, ficaram abaixo daqueles permitidos pela legislação, exceto Ni, HCl e NO. Note-se entretanto que estes são resultados avaliados no potencial poluidor máximo, através do estudo da composição química do chorume e é possível que na realidade os valores sejam um pouco menores.

A viabilidade econômica do processo não foi estudada, mas a eliminação do metano contido no biogás pode ajudar a reduzir os custos de implantação através do comércio de emissões de gases estufa, o que já vem sendo praticado em alguns casos como nas instalações da Sasa em Tremembé.

5. 2 – Sugestões

Há necessidade de realizar um estudo mais extenso de pelo menos um ano completo, e incluindo todos os queimadores, operacionais ou não, sobre a produção de biogás no aterro para desta forma verificar sua eventual sazonalidade e compatibilidade com a produção de chorume. Assim ficaria definida a necessidade ou não de instalações de armazenamento de chorume nos períodos de pico, ou se haveria eventuais sobras de energia em certas épocas do ano.

Deve-se realizar um mapeamento extensivo das superfícies do aterro e da lagoa para medir e analisar suas emissões e vazamentos e quantificar a emissão de metano que produzem. Os dispositivos para ambas as medidas mencionadas acima já foram concebidos, mas é preciso construí-los e utilizá-los no trabalho.

A instrumentação para a medida de vazão de gás trabalhou bem, mas precisa ser simplificada para permitir o acesso mais fácil e mais rápido às medidas.

Um estudo de viabilidade econômica deve ser conduzindo, no qual sejam incluídas fontes de receita pela não emissão de gases estufa.

ANEXOS

Equação da Combustão para o biogás - equação para um mol de metano

Cálculo dos Coeficientes Estequiométricos

$\lambda =$	1,1		
$\alpha =$	2		
A =	0,176		
B =	0,784		
D =	2	D =	2,2
E =	8,27		
F =	1,18		
G =	2,00		
I =	0,20		
J =	9,06		

Cálculo da máxima energia disponível por mol de metano

Condições $\lambda = 1$ a energia é máxima para um dada temperatura
 $T = 900^\circ \text{C}$ Temperatura adequada para destruir compostos orgânicos perigosos e baixa o suficiente para evitar a formação expressiva de NO_x , não sendo necessário o uso de refratários, reduzindo custos

Da equação da 1ª lei da termodinâmica em sistemas reagentes ($W=0$) $\rightarrow$

$$\rightarrow Q = \sum p \times n_s(h + \Delta h) - \sum r \times n_e(h + \Delta h)$$

Reagentes:

O2	→	hf =	0,0		Δh =	0,0
N2	→	hf =	0,0		Δh =	0,0
CH4	→	hf =	-74873,0	KJ/Kmol	Δh =	0,0
CO2	→	hf =	-393522,0	KJ/Kmol	Δh =	0,0

$$\sum r \times n_e(h + \Delta h) = n_{\text{CH}_4} + (h_f + \Delta h)\text{CO}_2$$

$$\sum r \times n_e(h + \Delta h) = -144133 \text{ KJ/Kmol}$$

Produtos:

$$\sum p \times n_s(h + \Delta h) = F(h_f + \Delta h)\text{CO}_2 + G(h_f + \Delta h)\text{H}_2\text{O} + I(h_f + \Delta h)\text{O}_2 + J(h_f + \Delta h)\text{N}_2$$

F =	1,18
G =	2,00
I =	0,20
J =	9,06

T 1 =	25 °C	T 1 =	298	K	Θ1	2,98
T 2 =	900 °C	T 2 =	1173	K	Θ2	11,7

CO2	→	hf = -393522,0	KJ/Kmol	Δh = 42900
H2O	→	hf = -241826,0	KJ/Kmol	Δh = 33360
O2	→	hf = 0,0	KJ/Kmol	Δh = 28787
N2	→	hf = 0,0	KJ/Kmol	Δh = 27240

Cálculo do Δh utilizando a equação de calor específico a pressão constante

CO2

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} cp(T)100dT \quad cp_{CO2} = -3,7357 + 30,529\theta^{0,5} - 4,1034\theta + 0,02481\theta^2$$

$$\Delta h = \left[-3,7357\theta + \frac{30,529}{1,5}\theta^{1,5} - \frac{4,1034}{2}\theta^2 + \frac{0,024198}{3}\theta^3 \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \times 100$$

$$\Delta h = 42900 \text{ KJ/Kmol}$$

$$hf = -393522 \text{ KJ/Kmol}$$

H2O

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} cp(T)100dT \quad cp_{H2O} = 143,5 - 183,54\theta^{0,25} + 82,751\theta^{0,5} - 3,6989\theta$$

$$\Delta h = \left[143,05\theta - \frac{183,45}{1,25}\theta^{0,25} + \frac{82,751}{1,5}\theta^{1,5} - \frac{3,6989}{2}\theta^2 \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \times 100$$

$$\Delta h = 33360 \text{ KJ/Kmol}$$

$$hf = -241826 \text{ KJ/Kmol}$$

O2

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} cp(T)100dT \quad cp_{O2} = 37,432 + 0,020102\theta^{1,5} - 178,571\theta^{-1,5} + 236,88\theta^{-2}$$

$$\Delta h = \left[37,432\theta - \frac{0,020102}{2,5}\theta^{2,5} + \frac{178,57}{0,5}\theta^{-0,5} - 236,88\theta^{-1} \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \times 100$$

$$\Delta h = 28787 \text{ KJ/Kmol}$$

N2

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} cp(T)100dT \quad cp_{N2} = 36,060 - 512,79\theta^{-1,5} + 1072,7\theta^{-2} - 820,4\theta^{-3}$$

$$\Delta h = \left[39,060\theta + \frac{512,79}{0,5}\theta^{-0,5} - 1072,7\theta^{-1} + \frac{820,4}{2}\theta^{-2} \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \times 100$$

$$\Delta h = 27240 \text{ KJ/Kmol}$$

Substituindo na equação :

$$\sum p \times ns(h + \Delta h) = F(h_f + \Delta h)CO_2 + G(h_f + \Delta h)H_2O + I(h_f + \Delta h)O_2 + J(h_f + \Delta h)N_2$$

$$\sum p \times ns(h + \Delta h) = -578114 \text{ KJ/Kmol}$$

Da equação da 1ª lei da termodinâmica em sistemas reagentes (W=0) →

$$Q = \sum p \times ns(h + \Delta h) - \sum r \times ne(h + \Delta h)$$

$$Q = 433981 \text{ KJ/Kmol de Metano}$$

Energia disponível por mol de metano

Temperatura adiabática da chama

$$\sum p \times ns(h + \Delta h) = -34452,3 \text{ KJ/Kmol}$$

T 1 =	25 °C	T 1 =	298,15 K	Θ1	2,9815
T 2 =	2000 °C	T 2 =	2273,2 K	Θ2	22,7315

CO2	→	107864 KJ/Kmol
H2O	→	86834,7 KJ/Kmol
O2	→	69597,1 KJ/Kmol
N2	→	65983,3 KJ/Kmol

T=1000	-530057
T=800	-622811
T=1200	-434634
T=700	-668005
T=1500	-287513
T=1600	-237594
T=2000	-34452,3

por interpolação = 1784 K

Data: 23/4/2003

Diâmetro do tubo 38,7 mm
 Diâmetro do orifício 6,85 mm

Diâmetro da sonda 81 mm

Medida no manometrc
 24,50 24,00
 38,00 38,00
 43,50 43,50
 56,00 56,00
 70,50 70,50
 91,00 91,00
 104,50 104,50
 124,00 124,00
 169,00 169,00
 186,00 186,00
 196,50 296,50
 289,00 289,00

Pb (atm) 699,8 mmHg
 Tb (°C) 25,1
 R (Ar) 287,041 J/(Kg·K)

Beta 0,177 Coefic. Ko 0,591

0.5-Beta 0,323

Beta-o.7 0,000 Pa 101325 Pa

PBC 697,0 mmHg Kc 1,4

Ponto	DP na Placa (mmca)	P antes da Placa (mmca)	T_ar. antes Plac (°C)	Temp. Ambiente (°C)	Densidade da Ar (kg/m3)	Viscos. da Ar (Pa.s)	Y1	DP a 20 °C (mmca)	Número de Reynolds
1	24,50	24,00	24,6	24,5	1,091	2,90E-05	0,999	24,5	3256
2	38,00	38,00	24,6	24,5	1,092	2,90E-05	0,999	38,0	4047
3	43,50	43,50	24,6	24,5	1,093	2,90E-05	0,999	43,5	4328
4	56,00	56,00	24,6	24,5	1,094	2,90E-05	0,998	56,0	4907
5	70,50	70,50	24,6	24,5	1,096	2,90E-05	0,998	70,4	5502
6	91,00	91,00	24,6	24,5	1,098	2,90E-05	0,997	90,9	6247
7	104,50	104,50	24,6	24,5	1,100	2,90E-05	0,997	104,4	6693
8	124,00	124,00	24,6	24,5	1,102	2,90E-05	0,996	123,9	7289
9	169,00	169,00	24,6	24,5	1,107	2,90E-05	0,995	168,9	8509
10	186,00	186,00	24,6	24,5	1,109	2,90E-05	0,994	185,8	8927
11	196,50	296,50	24,6	24,5	1,122	2,90E-05	0,994	196,3	9224
12	289,00	289,00	24,6	24,5	1,121	2,90E-05	0,991	288,8	11137

Data:	23/4/2003			Diâmetro da sonda(mm)	81	
Diâmetro do tubo	38,7 mm			Medida no manometro	30,50	30,50
Diâmetro do orifício	11,8 mm				54,00	54,00
					74,50	74,50
Pb (atm)	699,8 mmHg				92,50	92,50
Tb (°C)	25,1				117,00	117,00
R (Ar)	287,041 J/(Kg°K)				135,50	135,50
					173,00	173,00
Beta	0,304	Coefic. k	0,599		215,50	215,50
0.5-Beta	0,196				226,00	226,00
Beta-o.7	0,000	Pa	101325 Pa		250,00	250,00
	PBC	697,0 mmHg	Kc	1,4	280,00	280,00
					364,00	364,00

Ponto	DP na Placa (mmca)	P antes da Placa (mmca)	T_ar. antes Placa (°C)	Temp. Ambiente (°C)	Densidad. da Ar (kg/m3)	Viscos. da Ar (Pa.s)	Y1	DP a 20 °C (mmca)	Número de Reynolds
1	30,50	30,50	24,6	24,5	1,091	1,82E-05	0,999	30,5	9990
2	54,00	54,00	24,6	24,5	1,094	1,82E-05	0,998	54,0	13276
3	74,50	74,50	24,6	24,5	1,096	1,82E-05	0,998	74,4	15587
4	92,50	92,50	24,6	24,5	1,098	1,82E-05	0,997	92,4	17365
5	117,00	117,00	24,6	24,5	1,101	1,82E-05	0,996	116,9	19529
6	135,50	135,50	24,6	24,5	1,103	1,82E-05	0,996	135,4	21017
7	173,00	173,00	24,6	24,5	1,108	1,82E-05	0,995	172,9	23753
8	215,50	215,50	24,6	24,5	1,113	1,82E-05	0,993	215,3	26522
9	226,00	226,00	24,6	24,5	1,114	1,82E-05	0,993	225,8	27164
10	250,00	250,00	24,6	24,5	1,117	1,82E-05	0,992	249,8	28578
11	280,00	280,00	24,6	24,5	1,120	1,82E-05	0,991	279,8	30256
12	364,00	364,00	24,6	24,5	1,130	1,82E-05	0,989	363,7	34541

Descarga de Ar (kg/h)	Coefic. Descarga (adim.)	T (Sonda) (°C)	Visc. da Ar (Pa.s)	Densid. do Ar (kg/m3)	Vs veloc_sa (m/s)	Tensão (Sonda) (V)	Vazão (m3/h)
6,0503	0,607	24,8	1,82E-05	1,091	0,299	2,2	5,5
8,0404	0,606	24,6	1,82E-05	1,094	0,396	2,8	7,3
9,4398	0,605	24,6	1,82E-05	1,096	0,464	3,2	8,6
10,5166	0,605	24,6	1,82E-05	1,098	0,516	3,5	9,6
11,8268	0,605	24,5	1,82E-05	1,102	0,579	3,8	10,7
12,7281	0,604	24,4	1,82E-05	1,104	0,621	4	11,5
14,3853	0,604	24,4	1,82E-05	1,108	0,700	4,3	13,0
16,0621	0,604	24,3	1,82E-05	1,114	0,777	4,6	14,4
16,4507	0,604	24,3	1,82E-05	1,115	0,795	4,7	14,8
17,3073	0,604	24,2	1,82E-05	1,118	0,834	4,9	15,5
18,3237	0,603	24,2	1,82E-05	1,122	0,881	5	16,3
20,9185	0,603	24,1	1,82E-05	1,132	0,997	5,4	18,5

Zero= 20,5 valor medi

22,7

23,3

Área= 0,005153 m2

23,7

24,0

24,3

24,5

24,8

25,1

25,2

25,4

25,5

25,9

Data:	17/4/2003	Diâmetro da sonda	81 mm
Diâmetro do tubo	38,7 mm	Medida no manometro	28,50 28,50
Diâmetro do orifício	14,5 mm		44,50 44,50
			62,00 62,00
Pb (atm)	699,8 mmHg		85,00 85,00
Tb (°C)	24,3		109,50 109,50
R (Ar)	287,041 J/(Kg°K)		126,00 126,00
			162,00 162,00
Beta	0,375	Coefic. Kc	0,605
0.5-Beta	0,125		
Beta-o.7	0,000	Pa	101325 Pa
	PBC	697,1 mmHg	Kc 1,4
			342,00 342,00
			460,00 460,00

Ponto	DP na Placa (mmca)	P antes da Placa (mmca)	T_ar. antes Placa (°C)	Temp. Ambiente (°C)	Densidade da Ar (kg/m3)	Viscos. da Ar (Pa.s)	Y1	DP a 20 °C (mmca)	Número de Reynolds
1	28,50	28,50	24,6	24,5	1,091	1,82E-05	0,999	28,5	12036
2	44,50	44,50	24,6	24,5	1,093	1,82E-05	0,999	44,5	15023
3	62,00	62,00	24,6	24,5	1,095	1,82E-05	0,998	61,9	17721
4	85,00	85,00	24,6	24,5	1,098	1,82E-05	0,997	84,9	20741
5	109,50	109,50	24,6	24,5	1,101	1,82E-05	0,996	109,4	23538
6	126,00	126,00	24,6	24,5	1,102	1,82E-05	0,996	125,9	25249
7	162,00	162,00	24,6	24,5	1,107	1,82E-05	0,995	161,9	28635
8	189,00	189,00	24,6	24,5	1,110	1,82E-05	0,994	188,8	30936
9	232,00	232,00	24,6	24,5	1,115	1,82E-05	0,993	231,8	34290
10	258,00	258,00	24,6	24,5	1,118	1,82E-05	0,992	257,8	36172
11	342,00	342,00	24,6	24,5	1,127	1,82E-05	0,989	341,7	41695
12	460,00	460,00	24,6	24,5	1,141	1,82E-05	0,986	459,6	48447

Descarga de Ar (kg/h)	Coefic. Descarga (adim.)	T (Sonda) (°C)	Visc. da Ar (Pa.s)	Densid. do Ar (kg/m3)	Vs (veloc_sa) (m/s)	Tensão (Sonda) (V)	Vazão (m3/h)
8,9873	0,613	24,3	1,82E-05	1,092	0,443	3	8,2
11,2177	0,612	24,2	1,82E-05	1,095	0,552	3,5	10,2
13,2328	0,612	24,1	1,82E-05	1,097	0,650	4	12,1
15,4881	0,611	24,1	1,82E-05	1,100	0,759	4,4	14,1
17,5765	0,611	24,1	1,82E-05	1,102	0,859	4,8	15,9
18,8543	0,611	24,0	1,82E-05	1,105	0,920	5	17,1
21,3821	0,610	24,0	1,82E-05	1,109	1,039	5,4	19,3
23,1002	0,610	24,0	1,82E-05	1,112	1,120	5,5	20,8
25,6049	0,610	23,9	1,82E-05	1,117	1,235	5,9	22,9
27,0102	0,610	23,9	1,82E-05	1,120	1,300	6	24,1
31,1343	0,609	23,8	1,82E-05	1,130	1,485	6,5	27,5
36,1761	0,609	23,8	1,82E-05	1,144	1,705	6,9	31,6

Zero= 20,5 valor medi

Área= 0,005153 m2

23,5
24,0
24,5
24,9
25,3
25,5
25,9
26,0
26,4
26,5
27,0
27,4

Manômetro Inclinado - Aferição

Instrumento Utilizado ; Betz e Escala Metálica

Fluido Manométrico : Querosene

Instrumento						
Manômetro Betz	Man. Incl. Coluna 1	Man. Incl. Coluna 6	Man. Incl. Coluna 11	Erro % Coluna 1	Erro % Coluna 6	Erro % Coluna 11
10,0	44,0	42,0	43,0	1,3	-0,8	-0,5
20,0	85,0	83,0	85,0	-0,4	-1,7	0,2
30,0	127,0	126,0	126,0	-0,2	-0,4	-0,4
40,0	169,0	173,5	169,0	-0,1	2,9	0,5
50,0	211,0	210,0	210,0	0,0	-0,4	0,1
60,0	253,0	252,0	251,0	0,0	-0,3	-0,2
70,0	295,0	294,0	293,0	0,1	-0,3	0,0

Regressões						
	Coluna 1	Coluna 6	Coluna 11	Média 1 e 6	Erro % Coluna 1	Erro % Coluna 6
Intercepto	-0,3747	-0,0621	-0,3763	-0,21837	2,6	-2,2
Declividade	0,2387	0,2376	0,2401	0,23813	0,1	-2,3
Correlação	1,0000	0,9997	1,0000		0,1	-0,7
					0,1	2,7
					0,1	-0,4
					0,0	-0,3
					0,0	-0,3