

RALF LATTOUF

**AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DE PROCESSOS
MITIGADORES DE IMPACTO AMBIENTAL**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2003

RALF LATTOUF

**AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DE PROCESSOS
MITIGADORES DE IMPACTO AMBIENTAL**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr.

São Paulo

2003

*Aos que trabalham
para a construção
de um mundo melhor*

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Silvio de Oliveira, pela paciência, confiança e incentivo.

À minha família e à minha namorada, pela motivação, paciência e compreensão para com a minha falta de tempo;

Aos companheiros da ARQUIPÉLAGO ENGENHARIA AMBIENTAL, pela inestimável contribuição com o material dos estudos de caso;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a elaboração e conclusão desta dissertação, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Termodinâmica	4
3.1.1. A Primeira Lei da Termodinâmica.....	4
3.1.2. A Segunda Lei da Termodinâmica.....	6
3.1.3. Exergia	7
3.1.4. Componentes Exergéticas de um Sistema.....	9
3.1.4.1. Exergia Física ou Termomecânica	10
3.1.4.2. Exergia Química.....	10
3.2. Indicadores Ambientais.....	11
3.2.1. Parâmetros Físico-Químicos	12
3.2.2. Parâmetros biológicos	14
3.2.3. Parâmetros toxicológicos	15
3.3. Exergia e Meio Ambiente	17
3.3.1. Exergia como medida do fluxo de recursos e reservas	18
3.3.2. Exergia como uma medida de resíduos ou potencial para causar danos.....	19
3.3.3. Sustentabilidade	20
3.3.4. Ecologia Industrial (EI).....	24
3.3.5. Análise Exergética do Ciclo de Vida (LCEA)	26
4. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	29
4.1. Processos de Destruição da Exergia do Contaminante	34
4.2. Processos de Aproveitamento Exergético do Contaminante	35
5. ESTUDOS DE CASO.....	36
5.1. Tratamento de Efluentes Gasosos	37
5.1.1. Descrição do Problema	37
5.1.2. Descrição das Alternativas de Tratamento.....	42
5.1.2.1. Incineração (pós-queimador / oxidação térmica).....	42
5.1.2.2. Adsorção em coluna de carvão ativado.....	45
5.1.2.3. Biofiltro	47
5.1.3. Cálculo da Exergia Acumulada.....	49

5.1.4. Avaliação dos Resultados	49
5.2. Remediação de Solo e Água Subterrânea	52
5.2.1. Descrição do Problema	52
5.2.2. Descrição das Alternativas de Remediação	58
5.2.2.1. Processo de Bombeamento	58
5.2.2.2. Extração Multifásica	63
5.2.2.3. Remoção de Solo e Incineração	66
5.2.3. Cálculo da Exergia Acumulada.....	68
5.2.4. Avaliação dos Resultados	68
5.3. Destino Final de Resíduos Sólidos Urbanos	72
5.3.1. Descrição do Problema	73
5.3.2. Descrição das Alternativas de Tratamento.....	74
5.3.2.1. Aterro	74
5.3.2.2. Reciclagem.....	83
5.3.2.3. Incineração	92
5.3.3. Cálculo da Exergia Acumulada.....	101
5.3.4. Avaliação dos Resultados	103
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	107
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	111
ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO – ESTUDO DE CASO 1	114
Memorial de Cálculo – Pós-Queimador.....	115
Memorial de Cálculo – Sistema de Adsorção por Carvão Ativado	116
Memorial de Cálculo – Biofiltro	118
ANEXO B – MEMORIAL DE CÁLCULO – ESTUDO DE CASO 2	119
Extração Multifásica	121
Remoção e incineração de Solo	123
ANEXO C – MEMORIAL DE CÁLCULO – ESTUDO DE CASO 3	125
aterro	126
Triagem	127
Reclagem de Plástico	127
Reciclagem de Papel / Papelão	128
Incineração	129
APÊNDICE I – Valores Orientativos para Solo e Água Subterrânea.....	130
APÊNDICE II – Padrão de Qualidade para Água	132
APÊNDICE III – Padrão de Qualidade para Ar.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Consumo de exergia acumulado para os recursos e utilidades	32
Tabela 5.1. - Cálculo da Exergia Química da Emissão	39
Tabela 5.2. Consumo de exergia acumulado para os processos de tratamento - Emissões Atmosféricas	50
Tabela 5.3. - Rendimento exergético das alternativas avaliadas.....	51
Tabela 5.4. - Distribuição de 8.000 L de combustível num aquífero.....	54
Tabela 5.5. – Concentração de Contaminantes na Água Subterrânea.....	55
Tabela 5.6. - Concentração de Contaminantes no Solo	56
Tabela 5.7. - Cálculo da Exergia Química do Óleo Diesel	56
Tabela 5.9. - Dados de Recuperação de Produto	61
Tabela 5.10. - Cargas Elétricas – MPE	66
Tabela 5.11. - Tabela de consumo de utilidades de um incinerador:.....	67
Tabela 5.12. – Transporte e movimentação de solo para a remoção	67
Tabela 5.13. Consumo de exergia acumulado para os processos de remediação	69
Tabela 5.14. - Comparação da eficiência de remediação de cada alternativa.....	70
Tabela 5.15. - Índice e o rendimento exergético das alternativas avaliadas	71
Tabela 5.16. – Composição Percentual Média do Lixo Domiciliar no Brasil (1999).....	72
Tabela 5.17. – Potencial de Aproveitamento dos Componentes do Lixo Urbano	73
Tabela 5.18. – Conteúdo exergético dos materiais avaliados	73
Tabela 5.19. - Lista de Cargas Elétricas do Aterro	77
Tabela 5.20. Lista de Transportes Utilizados.....	77
Tabela 5.21. - Relação das Quantidades de Solo Movimentadas	78
Tabela 5.22. Prognóstico da Geração de Biogás.....	81
Tabela 5.23. - Lista de Cargas Elétricas da Unidade de Triagem	86
Tabela 5.24. - Lista de Cargas Elétricas da Unidade de Reciclagem de Plásticos.....	89
Tabela 5.25. - Lista de Cargas Elétricas da Unidade de Reciclagem de Plásticos.....	90
Tabela 5.26. - Composição do Lixo	94
Tabela 5.27. - Composição Elementar Média	94
Tabela 5.28. - Cálculo da Quantidade de Ar Teórica.....	95
Tabela 5.29. - Cálculo do Consumo de Ar.....	96
Tabela 5.30. - Balanço térmico para o processo de combustão	97
Tabela 5.31. - Lista de Cargas Elétricas do Incinerador	98
Tabela 5.32. - Lista de Transportes Utilizados	98
Tabela 5.33. – Contribuição específica em base exergética do produto dos resíduos avaliados.....	101
Tabela 5.34. Consumo de exergia acumulado para os processos de tratamento de lixo urbano.....	102
Tabela 5.35. - CExA específico por produto para disposição em aterro.....	103
Tabela 5.36. - Balanço de exergia acumulada para reciclagem de 500 kg/d de diversos resíduos por 10 anos.....	104

Tabela 5.37. - Comparação da Exergia contida nos produtos residuais dos processos de tratamento avaliados (MJ/kg).....	105
Tabela A.1. - Dimensionamento preliminar da chaminé	115
Tabela A.2. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Pós-Queimador.....	116
Tabela A.3. - Dimensionamento preliminar da coluna de adsorção	117
Tabela A.4. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA.....	117
Tabela A.5. - Dimensionamento preliminar do leito do biofiltro	118
Tabela A.6. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA.....	118
Tabela .B.1. - Cálculo do Termo de Exergia de Mistura	120
Tabela B.2. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA.....	121
Tabela B.3. - Características da Torre de Stipping	122
Tabela B.4. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA.....	122
Tabela B.5. - Tabela de consumo de utilidades de um incinerador:	123
Tabela B.6. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Aterro	126
Tabela B.7. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Triagem	127
Tabela B.8. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Reciclagem de Plástico	127
Tabela B.9. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Reciclagem de Papel / Papelão	128
Tabela B.10. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Incineração	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fluxo de energia, exergia e matéria através do planeta Terra	17
Figura 3.2. – Troca de matéria entre a tecnosfera e a ecosfera	23
Figura 4.1. – Fronteiras do problema abordado	30
Figura 4.2. Diagrama da seqüência de cálculo do método de CExA.....	33
Figura 5.1. Efluentes gasosos - problema e fronteiras consideradas.....	38
Figura 5.2. - Fluxograma conceitual do processo de incineração	42
Figura 5.3.- Modelo da Câmara de Combustão do Pós-Queimador	43
Figura 5.4. - Fluxograma conceitual do processo de adsorção com carvão ativado	46
Figura 5.5. - Diagrama ilustrativo – processo por Biofiltro	48
Figura 5.6. - Planta da área estudada com pluma de contaminação.....	53
Figura 5.7. - Fluxograma do processo de bombeamento	59
Figura 5.8. – Foto do Sistema de Tratamento Implantado	60
Figura 5.9. - Gráfico de Recuperação x Tempo	61
Figura 5.10. Fluxograma do processo de Extração Multifásica.....	64
Figura 5.11. Foto do Sistema de Extração Multifásica Instalado	65
Figura 5.12. - Desenho esquemático de um aterro sanitário moderno.....	75
Figura 5.13. - Curva teórica de geração de biogás ao longo do tempo	82
Figura 5.14. - Fluxograma de Processo para Reciclagem de Plástico	88
Figura 5.15. - Fluxograma de Processo para Reciclagem de Papéis.....	91
Figura 5.16. - Foto de Usina de Incineração	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

Símbolo	Descrição	Unidade
$A_{r_{teórico}}$	percentagem de ar teórico	%
a	atividade	-
B, b	exergia total, específica	kJ , J/kg
c_p	calor específico do ar a pressão constante	kJ/kg.K
CExA	consumo de exergia acumulado	kJ
C&E	Calor e Eletricidade	kJ
ExMP	exergia da matéria-prima	kJ
E	energia	kJ
g	aceleração da gravidade	m/s ²
H, h	entalpia total, específica	kJ , kJ/kg
m	massa	kg
n_i	número de moles da espécie i	
P	pressão	Pa
Q	calor	J
R	constante do(s) Gas(es)	J/ mol K
S	entropia	kJ/kg K
T	temperatura	K
U	energia interna	kJ
V	velocidade	m/s
\forall, v	volume total, específico	m ³ , m ³ /kg
W	trabalho	J
x	concentração	%
Z	altura em relação a um referencial	m

Símbolos Gregos

Símbolo	Descrição	Unidade
α	capacidade de adsorção mássica	%
ε	fator de Carnot	%
η	rendimento	%
ψ	eficácia em base exergética	-
ρ	densidade	kg/m ³
δ, Δ	variação	-
μ_i	potencial químico da espécie i	J/kg

Índices

Símbolo	Descrição	Unidade
–	médio	
.	taxa de variação temporal	
k	cinético	
p	potencial	
ph	físico	
ch	químico	
0	referencial / estado de referência	

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma metodologia para a avaliação de diferentes alternativas tecnológicas para a mitigação de impacto ambiental. É proposto que os materiais e utilidades necessários para a construção e operação de sistemas de abatimento de contaminantes seja quantificada em base exergética. O conteúdo exergético das emissões de um dado processo de produção, bem como os produtos intermediários e finais dos processos de tratamento, também podem ser quantificados para desenvolver um balanço exergético do processo de tratamento.

Em seguida é proposta uma metodologia para comparar as diferentes alternativas de processo, em duas situações distintas: quando o objetivo do processo é a destruição da exergia do contaminante, avaliado pelo índice η_u , e quando o objetivo do processo é a maximização do aproveitamento da exergia do contaminante, avaliado pelo índice η_p .

São apresentados três estudos de caso, contemplando os meios passíveis de contaminação: tratamento de emissões atmosféricas, remediação de um sítio contaminado e gerenciamento de resíduo sólido. Para cada caso, três alternativas de processo foram analisadas pela metodologia proposta.

Os resultados mostraram que a exergia acumulada é um ferramental útil para a quantificação do custo ambiental de processos de tratamento, sendo o rendimento exergético um critério inovador para a avaliação da sustentabilidade destes processos.

ABSTRACT

This study focuses on the sustainability of different technological options for minimizing environmental impact. It is proposed that the cumulative consumption of resources and utilities for construction and operation of environmental treatment system can be quantified in exergy terms. Also the exergy content of the emissions of a given production process, as the exergy of the by-products of the treatment process can be quantified to develop an exergy balance, focused on the treatment process.

Further it is proposed a methodology to compare the different process alternatives in two different situations: the former considering that the main task of the process is to eliminate the exergy content of a given emission, which is analyzed by the η_d coefficient; and the latter considering that the main task of the process is to maximize the utilization of the exergy content of a given emission, which is analyzed by the η_p coefficient.

Three case studies are presented: air emissions treatment, remediation of a contaminated site and management of solid waste. For each case, three different process alternatives were analyzed, by the proposed methodology.

It is concluded that exergy is appropriate to compare the technological alternatives and can be used as a guideline for choosing the most sustainable one.

1. INTRODUÇÃO

As relações entre o meio ambiente em que vivemos e a atividade humana têm sido foco de um interesse crescente por parte de toda a sociedade e, particularmente, da comunidade científica. A percepção das limitações do meio ambiente em receber e assimilar os rejeitos oriundos de nossa civilização tem sido bastante difundida, tanto pela mídia como por organizações do terceiro setor, cuja pressão tem se traduzido, ao longo dos anos, em legislações ambientais cada vez mais severas.

A quantificação do impacto ambiental tem sido feita das mais diversas maneiras, envolvendo aspectos técnicos, econômicos e sociais. Mesmo uma abordagem técnica dos problemas ambientais, acaba acarretando uma análise complexa, envolvendo diversas ciências e metodologias.

Já os processos de tratamento e medidas que visam condicionar as emissões dentro dos limites legais estabelecidos, têm sido avaliados, quase que exclusivamente, quanto à eficiência no abate das emissões e aspectos econômicos.

Uma vez que as questões ambientais inevitavelmente demandam uma análise multidisciplinar, a definição dos limites legais aceitáveis para a emissão de rejeitos para o meio-ambiente tem sido realizada através de uma abordagem pouco sistêmica, considerando parâmetros físicos, químicos, biológicos, ecológicos, toxicológicos, econômicos, etc. Deve-se ainda ressaltar o fato de que geralmente a tecnologia de tratamento mais recente costuma ditar os limites preconizados.

Embora condizente com a natureza pluralista dos problemas ambientais, o ferramental usual de análise acaba relegando a comparação de soluções ambientais que atingem as

mesmas metas de abatimento das emissões, a uma avaliação econômica. Aspectos que evidenciam um menor impacto ambiental global da solução adotada, muitas vezes, acabam sendo negligenciados, em detrimento de uma análise local.

Neste contexto, o conceito de exergia surge como um poderoso ferramental para a análise do impacto ambiental e das medidas e processos para mitigar este impacto. Uma vez que é a medida do potencial para realizar trabalho contido na matéria (combustível, alimento ou qualquer tipo de material), a exergia torna-se a escolha mais natural para avaliar a quantidade e a qualidade de recursos, em detrimento a outros parâmetros.

Combinando a Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica, a exergia consegue ser uma medida geral de todos os fluxos e estoques de recursos naturais, inclusive os renováveis.

A análise de Ciclo de Vida é uma das ferramentas na avaliação da sustentabilidade de opções tecnológicas. Ela leva em consideração todos os efeitos sobre o ecossistema e a população, os quais podem colocar em risco as possibilidades e sobrevivência das gerações atuais e futuras.

Utilizando-se a metodologia de análise de ciclo de vida em base exérgica é possível avaliar-se, em uma unidade comum, de mesma dimensão de energia (Joule), um processo mitigador de impacto ambiental, quanto aos seus produtos e insumos, combustíveis ou não.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a avaliação de alternativas de processos mitigadores de impacto ambiental, utilizando-se para tanto, a análise exergética de ciclo de vida.

A grande limitação do conceito de exergia para a avaliação de danos causados ao meio ambiente, reside no fato dela avaliar a capacidade em realizar trabalho de um dado fluxo de contaminante, em detrimento ao prejuízo real que ele representa ao meio ambiente.

Desta forma, no sentido de buscar um ferramental alternativo para a quantificação do impacto ambiental, desenvolveu-se uma metodologia para determinar o custo exergético dos processos que reduzem este impacto a índices aceitáveis.

Outro objetivo almejado por esta metodologia é definir um critério de mérito que permita comparar alternativas tecnológicas disponíveis para a solução de problemas ambientais, de maneira a identificar a opção mais sustentável.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TERMODINÂMICA

Termodinâmica é o ramo da ciência que estuda os fenômenos do equilíbrio físico e químico, bem como a extração de “trabalho útil” dos processos que levam sistemas ao equilíbrio. É bastante importante para outras áreas da ciência, desde geologia até biologia, passando por ecologia e até economia, uma vez que lida com estoques e fluxos de energia. As leis da termodinâmica são, portanto, fundamentais para todas ações, reações, eventos, praticamente tudo que “muda” ou “acontece” no universo. Num certo sentido, a termodinâmica é a ciência das mudanças de substâncias materiais, desde uma escala molecular, até uma escala planetária (Ayres, 1996).

3.1.1. A Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica baseou-se em medições experimentais cuidadosamente tomadas por James P. Joule em seu laboratório, na década de 1840; que demonstraram a equivalência numérica na conversão de calor em trabalho. Frequentemente denominada lei da conservação da energia, a Primeira Lei estabelece que a energia total de um dado sistema isolado nunca aumenta ou diminui. A energia pode apenas ser convertida de uma forma para outra. Muitas variáveis termodinâmicas frequentemente utilizadas, tais como calor, trabalho, entalpia, são, na verdade, formas de energia.

Pode-se distinguir algumas formas de energia, mais evidentes, como a *cinética* e a *potencial*, cuja conservação é facilmente observável no movimento de um pêndulo.

Outras, como *calor* e *trabalho*, menos intuitivas, só foram reconhecidas no século XVIII, quando surgiram as primeiras máquinas a vapor (em 1769 James Watt construiu o primeiro motor a vapor, iniciando, desta forma, o desenvolvimento das máquinas térmicas, o que demandou uma teoria para aprimorar seu desempenho – a termodinâmica).

Ainda no século XVIII foi observado que, na maioria dos casos em que há reações químicas, calor é transferido ou absorvido, ou seja, existem reações exotérmicas e endotérmicas. Tal constatação sugeriu uma nova forma de energia associada a sistemas termodinâmicos, um termo químico, o qual é necessário para fechar o balanço de energia de processos que envolvem reações químicas.

No século XIX foi evidenciado que qualquer corpo macroscópico, sólido líquido ou gás, é constituído, na verdade, de uma associação de partículas microscópicas, átomos e moléculas, interagindo umas com as outras. Novamente existe uma energia cinética das partículas a ser considerada, mas há também a energia relativa aos movimentos de vibração e rotação das mesmas. Numa escala macroscópica, a somatória destas energias de escala microscópica foi denominada *energia interna*.

A lei de conservação de energia só foi estabelecida empiricamente quando as diversas formas de energia foram incluídas. Para tanto elas tiveram que ser medidas, sendo esta a razão pela qual a Primeira Lei somente foi formulada na década de 1840 (J. R. Mayer, J. P. Joule e W. Thomson).

3.1.2. A Segunda Lei da Termodinâmica

Um sistema realiza trabalho, quando o único efeito sobre o meio puder ser o levantamento de um peso (Van Wylen; Sonntag, 1976). A conversão de trabalho em calor pode ocorrer com uma eficiência de 100%. Por outro lado, calor também pode ser convertido em trabalho, mas dentro de certos limites, com uma eficiência limitada. A essência deste limite é o objetivo da Segunda Lei da Termodinâmica.

A Segunda Lei da Termodinâmica foi inicialmente expressa em 1824 pelo engenheiro francês N.L. Sadi Carnot, resultante de sua tentativa de encontrar uma equação geral para o trabalho máximo possível de ser extraído de um motor, que converte calor em trabalho de eixo. O rendimento (ε) que proporciona este trabalho máximo foi equacionado para um motor térmico ideal, operando através de expansão e compressão, retirando calor de uma fonte de alta temperatura (T_s) e rejeitando o mesmo para o meio a baixa temperatura (T_0):

$$\varepsilon = \frac{(T_s - T_0)}{T_s} \quad (1)$$

Essa equação é conhecida como o rendimento de Carnot e, uma vez sendo um máximo, todos os motores “reais” necessariamente operam com rendimentos inferiores.

A primeira expressão analítica para a segunda lei ocorreu apenas em 1865, quando Clausius introduziu o conceito de entropia. A definição de entropia para processos reversíveis formulada por Clausius envolve uma integral de linha da expressão:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{reversível}} \quad (2)$$

Onde δQ representa um elemento diferencial de calor transferido e T é a temperatura absoluta.

Segundo Clausius, para qualquer processo irreversível tem-se:

$$dS > \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \quad (3)$$

Como qualquer sistema fechado necessariamente atinge, em um dado momento, um estado de equilíbrio estático, no qual todas as forças estão balanceadas, a definição de Clausius tem por consequência que, tal estado, corresponde a um ponto de entropia máxima. Desta maneira, um incremento na entropia indica uma aproximação do equilíbrio termodinâmico, o qual é irreversível.

3.1.3. Exergia

Exergia é um potencial termodinâmico, o qual, em geral, mede “diferenças”. A denominação de trabalho disponível (disponibilidade) foi pioneiramente introduzida por Willard Gibbs em 1873. Foi interpretado como energia disponível (Keenan, 1948 apud Ayres et al., 1996), capacidade de realizar trabalho e componente energética passível de transformação ou conversível (Rant, 1964). Evans, Tribus e outros introduziram o termo “essergia” (essência da energia) e uniram a termodinâmica clássica com a teoria da informação (Tribus, 1961 apud Wall 2000). O termo *exergia* foi sugerido por Z. Rant em 1956, denotando “capacidade para realizar trabalho” (Rant, 1956 apud Gong, 1999). Paralelamente aos termos exergia e essergia, este potencial também foi denominado disponibilidade, trabalho disponível, *distinguishability*, contraste, entropia potencial e informação física ou pi-potencial (Ayres & Martinàs, 1995); (Ayres et al., 1996). Numa

conferência em Roma, em 1987, houve um consenso entre os participantes no sentido de promover o termo exergia para o conceito genérico de potencial para causar mudanças, de maneira a englobar os termos disponibilidade, energia disponível, essergia, energia útil, trabalho potencial, trabalho disponível, energia conversível, etc.

Foram apresentadas aplicações para motores a gás de combustão interna (Stodola, 1898); para fluxos em turbina a vapor (Darrieus, 1930 apud Ayres et al., 1996); (Keenan, 1932 apud Ayres et al., 1996); para o processo de síntese de carbonato de sódio (Glansdorff, 1957). A noção de eficiência exergética como ferramenta para otimização de processos é atribuída a Denbigh (1956) apud Ayres et al. (1996).

Exergia somente pode ser definida para um sistema que não está em equilíbrio com o meio. Portanto, a exergia desaparece no equilíbrio com o meio. Exergia é uma medida efetiva da distância para o equilíbrio com o meio, sendo, neste ponto, a mais genérica delas (Evans, 1969).

Existem diversas equações para o cálculo da exergia, dentre elas, para um fluxo:

$$\mathbf{B} = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (4)$$

e para um sistema:

$$\mathbf{B} = U - U_0 + p_0(v - v_0) - T_0(S - S_0) \quad (5)$$

O trabalho máximo que pode ser fornecido por um motor térmico operando em um ciclo foi definido por Carnot, como sendo dependente apenas da diferença de temperatura

entre o sistema e o meio. Para que o trabalho seja máximo, é necessário que o ciclo seja reversível e que o calor seja transferido a taxas infinitesimais. Neste caso, tem-se:

$$\mathbf{B} = W_{m\acute{a}x} = \varepsilon \cdot Q \quad (6)$$

3.1.4. Componentes Exergéticas de um Sistema

De maneira análoga à energia, a exergia de um fluxo, \dot{E}_x , pode ser dividida em componentes distintas (Kotas, 1985). Excluindo-se os efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e de tensão superficial, tem-se:

$$\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{B}}^k + \dot{\mathbf{B}}^p + \dot{\mathbf{B}}^{ph} + \dot{\mathbf{B}}^{ch} \quad (7)$$

Onde:

$\dot{\mathbf{B}}^k$ = Exergia cinética

$\dot{\mathbf{B}}^p$ = Exergia potencial

$\dot{\mathbf{B}}^{ph}$ = Exergia física

$\dot{\mathbf{B}}^{ch}$ = Exergia química

A mesma **Equação (7)** pode ser expressa em termos específicos, introduzindo-se o termo $\mathbf{b} = \dot{\mathbf{B}} / \dot{m}$

$$\mathbf{b} = \mathbf{b}^k + \mathbf{b}^p + \mathbf{b}^{ph} + \mathbf{b}^{ch} \quad (8)$$

3.1.4.1. EXERGIA FÍSICA OU TERMOMECAÂNICA

As energias cinética e potencial de um fluxo são formas ordenadas de energia, passíveis de completa conversão em trabalho. Portanto, quando calculadas em relação aos níveis de referência do meio, são iguais às exergias cinética e potencial (Kotas, 1985), equações (9) e (10) respectivamente

$$\dot{\mathbf{B}}^k = \dot{m} \frac{V^2}{2} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{B}}^p = \dot{m} g_E Z_0 \quad (10)$$

A exergia física definida na **Equação (11)** é igual ao trabalho máximo obtido quando um fluxo é levado de seu estado inicial até um estado ambiente, definido por P_0 e T_0 , por processos físicos envolvendo apenas interações térmicas e mecânicas com o meio (Kotas, 1985). Este estado também é chamado de Estado de Referência Restrito.

$$\dot{\mathbf{B}}^{ph} = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (11)$$

3.1.4.2. EXERGIA QUÍMICA

Exergia química é a quantidade de trabalho reversível necessária para conduzir uma dada substância do estado de referência restrito para um estado onde haja equilíbrio completo (estado morto), a partir de substâncias encontradas no meio-ambiente, através de processos envolvendo transferência de calor e substâncias apenas com o meio ambiente. Define-se a exergia química molar total de uma mistura composta i espécies químicas, como:

$$\bar{\mathbf{b}}^{ch} = \sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i + RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i) \quad (12)$$

3.2. INDICADORES AMBIENTAIS

As primeiras considerações sobre a problemática ambiental remontam ao Império Romano, o qual desde o séc IV AC iniciou a implantação de aquedutos em suas *urbes*, possibilitando o fornecimento de água e a retirada do esgoto das cidades, melhorando, sensivelmente com tais medidas as condições de higiene da população.

Durante o século XIX, com o problema da superpopulação nas cidades européias, e a conseqüente problemática com a depuração natural dos efluentes domésticos, começaram a ser implantados sistemas rudimentares de tratamento biológico de esgoto sanitário.

A industrialização e o adensamento populacional do século XX, trouxeram nova percepção para as limitações do meio-ambiente, em receber e assimilar os rejeitos oriundos da atividade humana. A disposição de resíduos sólidos de maneira inadequada provocou a contaminação do solo e da água subterrânea; o descarte indiscriminado de efluentes líquidos industriais e domésticos causou a poluição e morte de rios e mananciais; assim como o despejo de poluentes atmosféricos industriais foi responsável pelo incremento de doenças respiratórias, risco de câncer, chuva ácida e outros problemas.

A humanidade passou então a estudar com maior profundidade o meio em que vive, suas inter-relações com a atividade humana, definindo e aprimorando padrões de qualidade para os distintos meios aos quais está exposta: água, ar e solo. Tais meios são avaliados segundo parâmetros físicos, químicos, biológicos e toxicológicos descritos a seguir.

3.2.1. Parâmetros Físico-Químicos

Os parâmetros físico-químicos têm-se mostrado o grande foco de concentração para avaliar a qualidade ambiental de um meio ou o impacto ambiental a que este meio foi submetido. A concentração de diversas substâncias nos meios ar, água e solo, tem servido para esta avaliação.

No solo, até recentemente, não havia legislação específica para definir a qualidade do solo e da água subterrânea. Geralmente eram adotados valores definidos por agências ambientais estrangeiras, como :

- USEPA (EUA), que em 1996 apresentou um relatório com uma lista de valores genéricos revisada para 110 substâncias; e
- VROM (Holanda) que, como parte do esforço de desenvolvimento de valores orientadores e de acordo com o princípio de multi-funcionalidade, formulou uma lista como guia de avaliação e remediação de locais contaminados. Esta lista de valores é freqüentemente referida como a “Lista Holandesa” ou “Lista ABC”, tendo sido estabelecida em 1983 e revisada em 1994, (CETESB, 2001).

Em São Paulo, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, publicou, em 2001, uma lista com valores orientadores para solo e água subterrânea, cujos valores encontram-se no **Apêndice I** (CETESB, 2001). Até o advento desta publicação, era usual utilizar-se como padrão de qualidade das águas subterrâneas a portaria 1469 do ministério da saúde (Ministério da Saúde, portaria 1496, 2000), a qual define o padrão de potabilidade da água, sendo, portanto, bastante restritiva.

Tanto para água superficial, como para o ar, o decreto lei estadual 8.468, de 1976, define uma série de limites para as concentrações admissíveis em emissões líquidas e gasosas, para situações bem definidas, como o lançamento em um corpo d'água, em uma rede de esgoto, ou a emissão de um forno de fundição. Os Apêndices II e III apresentam estes limites para água e para o ar, respectivamente.

Particularmente para o ar, os parâmetros legais ora adotados são bastante restritos, limitando-se às concentrações de material particulado, NO_x, SO_x, CO e CO₂. O limite para substâncias orgânicas, que provocam odor tem sido definido de maneira pouco precisa, através da reclamação de vizinhos quanto a problemas com odor. Por este motivo busca-se, com alguma frequência, os parâmetros definidos em normas internacionais, como o *TA-Luft*¹ (Alemanha) e a *USEPA*² (EUA).

Raramente a temperatura é utilizada para caracterizar um impacto ambiental. A exceção pode ser considerada para o descarte de efluentes líquidos. No estado de São Paulo, o limite é 40°C, respectivamente, quando o efluente é lançado em coleções de água (Artigo 18, decreto lei estadual 8.468, 1976).

¹ *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft*, Especificação Técnica para a Qualidade do Ar da Alemanha

² *United States Environmental Protection Agency* – Agência de Proteção Ambiental Norte Americana

3.2.2. Parâmetros biológicos

Parâmetros biológicos têm-se mostrado inovadores como indicadores ambientais. As vantagens comparativas de se utilizar indicadores biológicos de qualidade ambiental com relação aos parâmetros físico-químicos são:

- rapidez e eficiência na obtenção de resultados;
- relação custo-benefício;
- avaliação da qualidade ambiental *in situ* através do uso de organismos testes;
- maior susceptibilidade a uma grande variedade de estressores;
- avaliação da qualidade ambiental de um ecossistema sem recorrer a análises dos parâmetros físico-químicos;
- avaliação da função de um ecossistema e monitoramento ambiental em grande escala.

As alterações físico-químicas na qualidade do meio ambiente podem afetar diretamente o equilíbrio biológico das comunidades constituintes de ecossistemas, interferindo na abundância e na composição das espécies, na produtividade primária e na função do ecossistema. Nesses casos, os indicadores físico-químicos de qualidade ambiental não terão nenhuma utilidade para determinar estressores imprevisíveis. Os indicadores físicos e químicos são altamente específicos, o que representa uma desvantagem quando um estressor não pode ser identificado antecipadamente (EMBRAPA, 2000).

Por outro lado, do ponto de vista de controle, avaliação e legislação ambiental, os indicadores biológicos sofrem a grande desvantagem de serem de difícil, quando não impossível quantificação. Por esta razão, os mesmos ainda tem sido preteridos, em relação aos parâmetros físico-químicos, como instrumento de avaliação sistemática da qualidade ambiental dos meios ar, água e solo.

3.2.3. Parâmetros toxicológicos

Parâmetros toxicológicos têm sido geralmente utilizados para avaliar a saúde ocupacional e pública, ao invés de qualidade ambiental. Entretanto, recentemente, nos Estados Unidos, a *American Society for Testing and Materials* - ASTM homologou uma metodologia chamada de Ação Corretiva Baseada em Risco – *Risk Based Corrective Action* – RBCA, que foi desenvolvida especificamente para hidrocarbonetos de petróleo e descreve uma seqüência lógica de atividades e decisões a serem tomadas desde a suspeita da contaminação até o alcance das metas de remediação (ASTM,1995). Em 1998 esta metodologia foi expandida para outros contaminantes em uma nova versão denominada “Chemical Release” (ASTM, 1998); (CETESB, 2001).

Segundo esta metodologia, para que um efeito adverso à saúde ocorra são necessários três elementos: a fonte de contaminação, o receptor (homem) e um tempo de contato entre ambos, chamado de duração de exposição. O contaminante pode atingir o receptor por diversas maneiras, chamadas vias de exposição. A metodologia RCBA considera as vias, ingestão de água e solo contaminados, inalação de voláteis, inalação de material particulado e contato dérmico (CETESB, 2001).

A quantidade total de contaminante absorvida por dia pelo receptor, é comparada, no caso de contaminantes não carcinogênicos, com limites aceitáveis como Dose de Referencia (RfD) determinado pela EPA. Para compostos carcinogênicos não há um limite seguro de exposição onde o risco de contrair câncer seja nulo. Utiliza-se então uma probabilidade aceitável que varia de 10^{-6} a 10^{-4} .

De acordo com a metodologia RBCA, a fonte de contaminação (fase livre) deve ser sempre removida, como uma primeira ação. A seguir, os dados analíticos coletados em campanhas de amostragem de solos e águas subterrâneas no local, devem ser comparados com valores orientadores, chamados “*Risk Based Soil Level*” – RBSL, os quais são calculados por um modelo computacional que considera os critérios acima apresentados. Desta forma, tem-se limites para parâmetros físico-químicos como meta de “risco aceitável” (ou de descontaminação a ser atingida), os quais variam dinamicamente conforme o risco real ao qual a população local está exposta.

Esta metodologia permite, portanto, critérios menos restritivos para definição de limites de contaminação aceitáveis, do que, por exemplo, os limites exigidos para potabilidade da água, como citado no item anterior. A justificativa seria direcionar investimentos e esforços na recuperação de áreas degradadas, nas situações que apresentam risco mais eminente ao meio-ambiente e à saúde pública.

3.3. EXERGIA E MEIO AMBIENTE

Sendo a exergia definida como o trabalho potencial máximo de um sistema em relação ao seu meio, este precisa ser especificado, para que a mesma possa ser definida. Geralmente, a temperatura de referência (T_0) é 298,15 K e a pressão (P_0) 1 atm. Entretanto, a temperatura da terra não é constante, mas varia conforme a localidade e a época do ano. Pressões e condições químicas também variam ao redor do globo. Um enorme potencial termodinâmico foi construído pelos depósitos de combustíveis fósseis e pela presença de oxigênio na atmosfera. A **Figura 3.1.** apresenta um modelo do fluxo de energia, exergia e matéria através do planeta Terra.

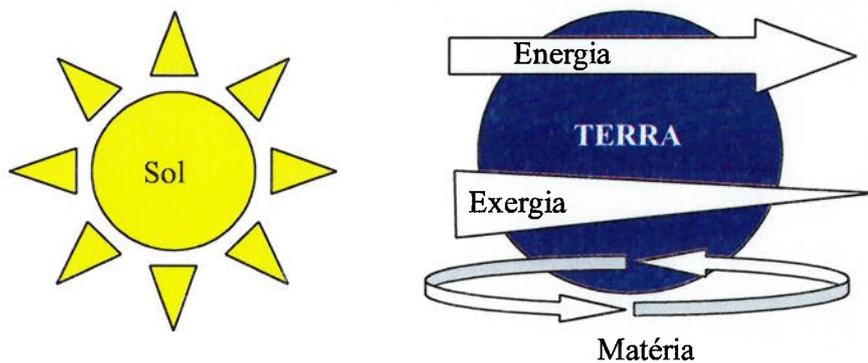


Figura 3.1. Fluxo de energia, exergia e matéria através do planeta Terra (Gong, 1999)

A tecnologia é basicamente um conjunto de processos, através dos quais matéria e energia são transformados. A Segunda Lei da Termodinâmica afirma que todos esses processos reais (irreversíveis) geram entropia, refletindo uma perda qualitativa do fluxo de energia. O conceito de exergia é o ferramental termodinâmico que expressa a qualidade da energia. Há uma extensa literatura disponível sobre o conceito de exergia (Kotas, 1985); (Szargut et al., 1988). Segundo Gaggioli, (1999), a fundamentação teórica foi desenvolvida por décadas, sendo sua implementação prática, limitada. Atualmente,

há um crescente interesse no desenvolvimento de operações tecnológicas nos campos da termodinâmica e da química (Bejan, 1996). Wall (1977, 1986 e 1993) explorou o potencial do conceito de exergia em diversos campos, tais como na análise econômica. Ele propôs a introdução de uma “taxa exérgica” para otimizar o uso atual de recursos e reduzir o impacto ambiental. O potencial em utilizar-se a exergia como um indicador ambiental foi investigado recentemente por Gong (1999). Seu trabalho abordou e discutiu diversas técnicas de análise exérgica recentes, como Análise de Ciclo de Vida, Modelagem de Logística, Ecossistemas, Ecologia Industrial e outros, avaliando sua aplicabilidade como indicador ambiental.

3.3.1. Exergia como medida do fluxo de recursos e reservas

Sendo uma medida do potencial para realizar trabalho contido na matéria (combustível, alimento ou qualquer tipo de material), a exergia torna-se a escolha mais natural para avaliar a quantidade de recursos, do que a energia. Infelizmente, ela ainda não desempenha este papel. Por razões históricas, uma outra variável termodinâmica, a entalpia de combustão, tem sido utilizada para este propósito, com a terminologia incorreta de “energia”. Evidentemente esta medida não se aplica para os demais recursos não combustíveis (Ayres, 1996).

Um dos primeiros economistas a enfatizar a importância da qualidade dos recursos foi Nicholas Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1971). Ele não baseou sua argumentação em dados empíricos, mas sim numa teoria fundamental, particularmente na Segunda Lei da termodinâmica. Seu trabalho chamou a atenção para o fato de que, o nosso sistema econômico, depende de enormes quantidades de matéria prima com baixa entropia (p.ex. os combustíveis fósseis), a qual é convertida, por combustão, em produtos de elevada entropia.

A primeira tentativa sistemática de utilizar exergia como uma medida geral de todos os recursos, incluindo os renováveis, foi conduzida por Göran Wall (1977, 1986). Mais tarde, Wall aplicou sua sistematização para o Japão (Wall, 1990) e Itália (Wall et al, 1994); (Sciubba 1995). O trabalho de Wall foi um divisor de águas, no sentido em que foi o primeiro a sugerir uma maneira comum de medir estoque e fluxo de recursos naturais (Ayres 1996).

3.3.2. Exergia como uma medida de resíduos ou potencial para causar danos

A exergia mede tanto as entradas de recursos num sistema, como também as saídas de produtos e resíduos. Ela é destruída durante todo o processo, não somente, mas principalmente, como calor de baixa temperatura, o qual, raramente, causa algum tipo de dano ao meio ambiente (exceção seria o descarte de efluentes líquidos, discutido no **item 3.2.1.**). Mas uma fração de exergia pode ser perdida na forma de materiais físico-quimicamente reativos (Ayres, 1996).

Ao contrário da massa, que é uma grandeza conservativa, o conteúdo exergético de um fluxo residual é, geralmente, muito inferior ao conteúdo do fluxo de entrada. Quanto mais eficiente um processo, no sentido exergético, menor a exergia contida nos materiais que precisam ser descartados. A princípio, o conteúdo exergético de um resíduo pode ser reduzido até valores próximos de zero (Ayres, 1996).

O cálculo do conteúdo exergético de um resíduo, na prática, pode ser feito de duas maneiras. A primeira requer um conhecimento detalhado da composição química do fluxo de rejeito. Uma vez que isto seja conhecido, o cálculo da exergia pode ser procedido componente por componente, conforme descrito pela **Equação (12)** Embora

aparentemente simples, a dificuldade desta metodologia consiste em obter dados confiáveis quanto à composição química dos resíduos (Ayres 1996).

A segunda forma de cálculo da exergia de um resíduo envolve o uso da equação de balanço exergético:

$$B_{entrada} = B_{produto} + B_{processo\ fabricação} + B_{resíduo} + B_{destruída} \quad (13)$$

Neste caso, basta conhecer a composição das entradas do processo, inclusive utilidades e a composição dos principais produtos de saída. Então é possível estimar a exergia perdida (ou ganha) pelo processo (Ayres, 1996). A exergia dos fluxos de entrada e saída do processo pode ser calculada da maneira descrita anteriormente, utilizando-se a **Equação (12)**.

A exergia de um poluente pode ser interpretada como o potencial para causar danos, através da ocorrência de reações incontroladas no meio-ambiente (Gong, 1999). A exergia contida em resíduos pode causar desvios ao equilíbrio ambiental através de processos físicos, como o aquecimento global, bem como químicos, como a destruição da camada de ozônio.

O principal problema desta abordagem, consiste no fato de que resíduos com o mesmo conteúdo exergético podem causar danos ambientais distintos. Tome-se o exemplo de uma emissão atmosférica contendo metano, com o mesmo conteúdo exergético de outra contendo dioxinas. Apesar da igualdade numérica no valor da exergia destas correntes, o potencial para causar danos ambientais e/ou de saúde pública delas é bastante distinto.

3.3.3. Sustentabilidade

Sustentabilidade possui diversas definições. A definição atual, introduzida por Brundtland em 1987 (ONU – WCED, Relatório Brundtland, 1987) é amplamente aceita: “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento social que satisfaz completamente as necessidades das gerações atuais, sem colocar em risco as necessidades das gerações futuras”. Tal definição evidencia que o estudo do desenvolvimento sustentável só pode ser conseguido através de uma abordagem multidisciplinar. A definição alcança questões filosóficas, econômicas, políticas, sociais e de ciências naturais.

Segundo esta visão, as ciências naturais são de suma importância. Elas geram a tecnologia (tecnosfera) para manufaturar bens para a sociedade (sociosfera), partindo dos recursos naturais disponíveis no meio (ecosfera), conforme a divisão por esferas inter-relacionadas, proposta por Arons (2000). Apesar destas “ciências aplicadas”, ou tecnologias, serem essenciais para a produção de bens, elas podem simultaneamente colocar em risco as gerações atual e futura. O problema pode ser direto (risco repentino ou toxicidade) ou, numa escala de longo prazo, a tecnosfera pode colocar em risco as gerações futuras de duas maneiras, interagindo com a ecosfera através de dois mecanismos. Inicialmente, ela extrai recursos materiais e energia da tecnosfera, de maneira que a primeira ameaça da tecnosfera para com a sustentabilidade reside na taxa de consumo destes recursos. Caso a taxa de consumo para aplicações tecnológicas seja maior do que a taxa de produção de recursos pela ecosfera, então as necessidades da humanidade no futuro estão ameaçadas. Num segundo momento, a tecnosfera emite produtos residuais para a ecosfera. Tais emissões podem comprometer mecanismos ecológicos e, conseqüentemente, a capacidade da ecosfera em produzir recursos.

O desenvolvimento sustentável só pode ser garantido se algumas condições de contorno, relativas a diversos campos da ciência, forem satisfeitas. No tocante às ciências naturais, duas condições de contorno principais podem ser destacadas:

- Os recursos necessários para produzir os bens não podem faltar; e
- As emissões da tecnosfera não podem colocar em risco a ecosfera, uma vez que isso pode afetar a produção de recursos.

Essas duas condições de contorno são consideradas na abordagem de análise de ciclo de vida (Wenzel, 1997) . A partir delas, é evidente que uma tecnologia sustentável deve ser tão eficiente quanto possível. Uma elevada eficiência reduz a demanda por recursos consumidos, bem como a geração de emissões. A eficiência poderia ser uma terceira condição de contorno para a sustentabilidade da tecnosfera (Lowe, 1997). Nesse sentido, van den Berg (1999) identificou três aspectos de sustentabilidade: uso de fontes renováveis, eficiência do processo e emissões.

A primeira condição apontada requer uma reflexão sobre os diferentes recursos disponíveis no ecossistema. Inicialmente, apenas recursos minerais são disponíveis, tais como minério de ferro, óleos minerais, os quais demandam milhares de anos para se formar e, conseqüentemente, são considerados não renováveis. Num segundo momento há os chamados recursos renováveis, os quais são encaminhados para a ecosfera numa escala de tempo de anos.

A segunda condição para a sustentabilidade da tecnosfera é a prevenção da interferência das emissões com o processo na ecosfera. Emissões de produtos perigosos, como clorofluorcarbonos, dioxinas e furanos precisam ser evitadas. A capacidade de assimilação da ecosfera para estes tipos de compostos é muito limitada. Contudo, mesmo esse pré-requisito pode ser insatisfatório para atingir a segunda condição: emissões muito elevadas de compostos “inofensivos”, como CO₂ , podem causar distúrbio na ecosfera (aquecimento global). Os dois pontos apresentados podem ser unificados numa única condição: o circuito fechado de troca de matéria entre a ecosfera e a tecnosfera, movido pela energia solar. A **Figura 3.2.** apresenta este conceito num

contexto global. A ecosfera fornece produtos de elevada qualidade, tais como madeira e trigo (biomassa), os quais são consumidos pela tecnosfera e subseqüentemente retornados para a ecosfera como produtos de baixa qualidade (conteúdo exergético), dióxido de carbono e água. Graças à energia solar, a ecosfera está apta a assimilar estes produtos residuais e transformá-los novamente em produtos de alta qualidade.

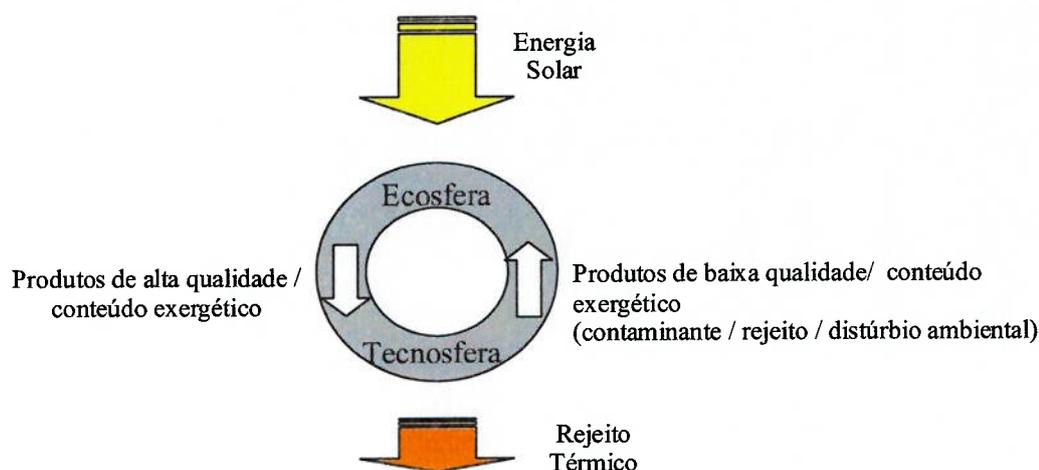


Figura 3.2. – Troca de matéria entre a tecnosfera e a ecosfera (Dewulf et al., 2000)

Toda a gama de conhecimento científico-tecnológico disponível (tecnosfera) tem um papel chave na sustentabilidade: proporcionar o suprimento de produtos e serviços para a sociedade, de maneira a atender suas necessidades, hoje e no futuro.

3.3.4. Ecologia Industrial (EI)

A busca por uma sólida sustentabilidade pode ser direcionada para o uso dos recursos com máxima eficiência. Isso pode ser obtido mantendo-se recursos materiais pelo período mais longo possível na tecnosfera, como produtos úteis. Portanto, o fluxo de matéria nos sistemas deve ser convertido, na medida do possível, para sistemas cíclicos (Lowe, 1997). O primeiro princípio da Ecologia Industrial (EI) afirma que “empresas individuais devem estar conectadas num ecossistema industrial”. Esta meta pode ser atingida “fechando-se” os circuitos de produção, através da reutilização e reciclagem e por definir todo resíduo como um produto potencial, procurando um mercado para ele (Lowe, 1997).

Embora o princípio da IE esteja bastante claro, avaliar o “caráter cíclico” e a eficiência metabólica de uma indústria são tarefas bem mais árduas, especialmente numa abordagem quantitativa.

A geração de entropia em um processo possui uma relação linear com a destruição de exergia. A metabolização de recursos pela tecnologia e pela sociedade contribui para a deterioração do conteúdo exergético dos materiais. Produtos e resíduos são fontes potenciais de energia, sempre que tiverem algum conteúdo energético. Se há uma busca pela sustentabilidade na produção e no consumo, o coeficiente global de eficiência exergética do metabolismo industrial deve ser otimizado.

Os principais aspectos de sustentabilidade de uma dada tecnologia são as eficiências de retirada e conversão de recursos, bem como de redução das emissões (Arons, 2000). Há grandes vantagens em se utilizar a exergia como um ferramental para avaliar-se a sustentabilidade de um processo tecnológico. Toda a qualidade da matéria pode ser expressa na mesma unidade: Joules (energia). Tal base permite uma análise completa e objetiva dos processos industriais, com relação às demandas por recursos e as eficiências dos processos.

A avaliação da sustentabilidade é baseada no cálculo cumulativo do consumo de exergia (CExC), levando-se em consideração todos os recursos necessários para gerar o produto. Por outro lado, o maior desafio na análise exérgica da sustentabilidade é que o conteúdo exérgico das emissões nem sempre reflete o impacto ambiental. Recentemente foram publicados trabalhos que procuram abordar esta questão (Arons 2000 e Dewulf 2001)

Aplicações de análise exérgica geralmente focam no ciclo de vida de um único produto. Tais estudos não abordam as alternativas do produto após sua utilização, numa abordagem de eficiência e sustentabilidade do metabolismo industrial.

Do ponto de vista de alternativas de processo, o grande ganho da Ecologia Industrial é que ela possibilita uma evolução dos métodos “fim-de-tubo” de controle de poluição, através de estratégias holísticas para prevenção e planejamento de um desenvolvimento industrial com maior atenção ao meio-ambiente (Connelly et al., 1996)

3.3.5. Análise Exergética do Ciclo de Vida (LCEA)

Szargut e Morris (1987) introduziram o conceito de consumo cumulativo de exergia (CExA) para expressar a somatória da exergia dos recursos naturais consumidos em todas as etapas da cadeia produtiva.

A análise de Ciclo de Vida (LCA) é uma das ferramentas na avaliação da sustentabilidade de opções tecnológicas. Ela leva em consideração todos os efeitos sobre o ecossistema e a população, os quais podem colocar em risco as possibilidades das gerações atuais e futuras. Contudo, a principal limitação da metodologia de LCA é balancear os diversos efeitos, sendo todos quantificados em escalas distintas. Por esta razão, a introdução do conceito exergético para LCA possibilita quantificar os diferentes efeitos da produção, consumo e disposição de produtos e serviços numa única escala. Por esta metodologia, os efeitos para o meio-ambiente das cadeias de produção, consumo e disposição são quantificados em termos de destruição de exergia, com a correspondente geração de entropia. Os produtos extraídos da ecosfera são quantificados quanto ao seu conteúdo exergético. A conversão dos recursos em produtos, resíduos e irreversibilidades pode ser analisada à luz da exergia, evidenciando o papel da eficiência do processo para a sustentabilidade (Dewulf, 2001).

A principal dificuldade na Análise Exergética do Ciclo de Vida é o tratamento dos efeitos negativos futuros inerentes aos resíduos gerados. A análise de processos de manufatura permite quantificar a quantidade de emissões em termos exergéticos, mas o conteúdo exergético das emissões não é necessariamente relacionado com o impacto que causa ao meio-ambiente e à saúde humana. Como exemplo, o conteúdo exergético do benzeno não difere muito do tolueno (42,3 contra 42,7 MJ/kg, Szargut et al. 1988), mas o impacto é evidentemente diferente. Portanto, do ponto de vista tecnológico, foi proposto que a exergia necessária para reduzir a emissão em questão deve ser calculada

antes de seu descarte para o meio-ambiente, de maneira à emissão não mais afetá-lo, nem à saúde humana (Cornelissen, 1997).

Contudo, essa abordagem possui duas desvantagens: a redução da emissão, na prática, depende dos limites impostos pelas autoridades, sendo que estes limites podem variar ao longo do tempo, em função de novos conhecimentos científicos.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO

Todos os passos de um processo de produção, desde a matéria-prima, retirada do meio-ambiente, até o produto final, resultam em destruição de exergia. Muitas vezes o estágio final de produção é caracterizado por uma eficiência exérgica relativamente elevada, embora a produção de produtos intermediários possa ocorrer com eficiências exérgicas muito baixas. Portanto, é interessante e útil o cálculo do consumo de exergia acumulado (CExA) proposto por Szargut (1988), o qual expressa a somatória do consumo de exergia de recursos naturais ao longo de uma cadeia produtiva.

Um método semelhante é o consumo de energia acumulado (CEnA), o qual já foi bastante desenvolvido durante a década de 1970. Entretanto, o cálculo em base exérgica é mais informativa, uma vez que considera a exergia de matérias-primas não energéticas retiradas da natureza (Szargut 1988).

A definição das fronteiras do sistema é bastante importante, uma vez que estas influenciam diretamente na somatória da exergia das etapas computadas. Para a análise exérgica de soluções ambientais, considera-se um problema genérico com as fronteiras apresentadas na **Figura 4.1.**, na qual o volume de controle considerado é aquele que envolve o processo de tratamento. Os seguintes fluxos de exergia atravessam as fronteiras deste volume de controle :

- **B_{insumos}** : CExA de todos os materiais e utilidades necessários para a implantação e operação do sistema de tratamento;
- **B_{contaminante}** : Exergia do fluxo de contaminante proveniente da atividade humana e objeto de tratamento;
- **B_{rejeito}** : Exergia do fluxo de rejeitos do processo de tratamento, os quais são descartados para o meio-ambiente; e

- B_{produto} : Fluxo de exergia dos produtos úteis à sociedade, obtidos com o processo de tratamento.

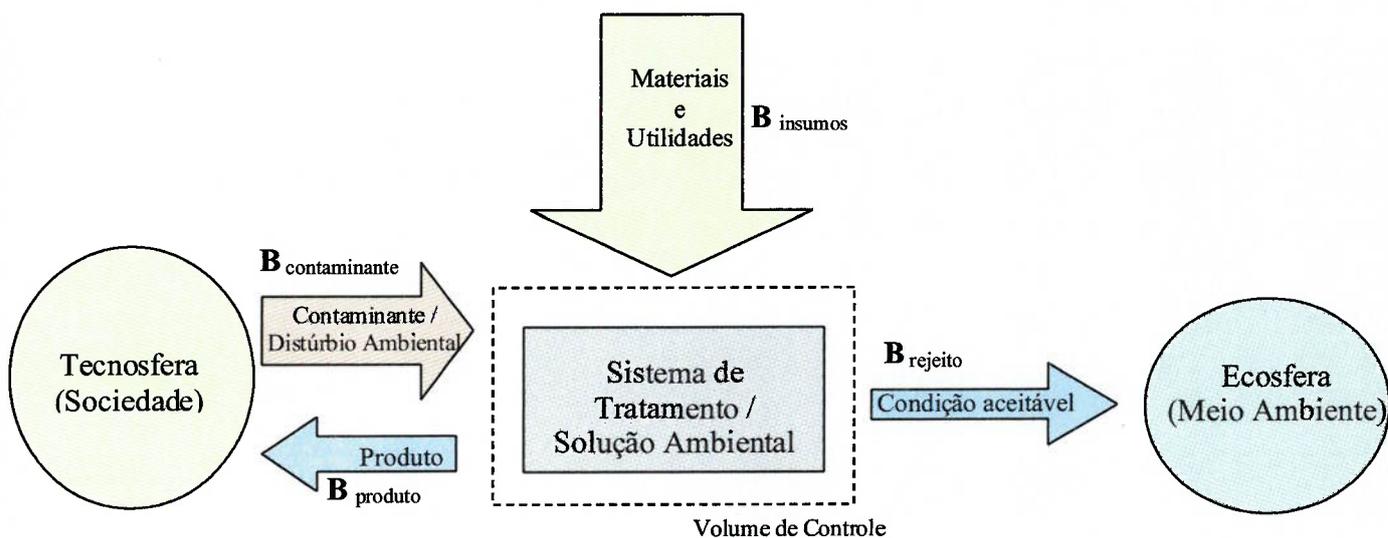


Figura 4.1. – Fronteiras do problema abordado

Limitou-se, portanto, à análise do processo de tratamento e/ou solução ambiental adotado. Para este caso, tem-se o seguinte balanço de exergia:

$$B_{\text{contaminante}} + B_{\text{insumos}} = B_{\text{produto}} + B_{\text{rejeito}} + B_{\text{destruída}} \quad (14)$$

Desta maneira, deslocou-se o enfoque tradicional de balanço exergético do processo produtivo, para a avaliação do sistema de abate da emissão, resíduo ou contaminação por ele causada.

Os fluxos do contaminante e do rejeito são calculados conforme descrito no item 2.3.2., ou seja, conhecendo-se, ou estimando-se a composição química dos rejeitos e calculando-se a exergia da mistura pela Equação (12).

Para a exergia dos insumos, empregou-se a metodologia de análise exergética de ciclo de vida, proposta por Szargut (1988), segundo a qual o consumo de exergia acumulado CExA expressa a somatória da exergia dos recursos naturais consumidos ao longo da implantação e operação deste sistema. A dificuldade no uso desta metodologia reside no cálculo da exergia de materiais não combustíveis, recursos e utilidades extraídos do meio ambiente.

Szargut (Szargut et al. 1988) e por Dewulf (Dewulf et al 2000) tabelaram diversos valores para os conteúdos de exergia específicos de diversos recursos e utilidades, desde a extração das matérias-primas da ecosfera, manipulação, fabricação e transporte, até sua construção e operação.

A **Tabela 4.1.** apresenta o consumo de exergia para a disponibilização dos recursos e utilidades envolvidos na construção e operação dos sistemas de tratamento (Dewulf 2000).

Os produtos listados nesta tabela não são, evidentemente, retirados diretamente da ecosfera, necessitando, para tanto, de produtos intermediários e eletricidade, considerada proveniente da queima de combustíveis fósseis.

Neste contexto, Szargut et al. (1988) dividiu a cadeia de processos produtivos em níveis. O nível 1 compreende apenas a última etapa da cadeia de processos de produção, quando o consumo imediato de matéria-prima e produtos intermediários são avaliados, incluindo-se o transporte. Num segundo nível, a extração, transporte e armazenamento de matérias-primas, assim como a fabricação de matérias-primas para o nível 1 são levados em consideração. No nível três, a produção das instalações para o nível 1, assim como a extração, transporte e armazenamento para a produção de intermediários no nível dois são considerados.

Tabela 4.1. Consumo de exergia acumulado para os recursos e utilidades

Recurso / Utilidade	CExA	Fonte
<i>Mão-de-obra</i>		
Sondagem manual e instalação de poços	$5,43 \times 10^0$ MJ/m	presente trabalho – Cap. 5.2.
Triagem manual de lixo	$2,26 \times 10^0$ MJ/h	presente trabalho – Cap. 5.3.
Operação de processo	$1,81 \times 10^0$ MJ/h	presente trabalho – Cap. 5.2.
<i>Materiais Inorgânicos</i>		
Tijolo	4.59×10^1 MJ / kg	Universidade de Twente (2000)
Concreto	1.10×10^0 MJ / kg	Bearthiaume et Bouchard (1999)
Aço	4.59×10^1 MJ / kg	Szargut (1988)
Aço zincado	5.86×10^1 MJ / kg	Frischknecht et al (1996)
Pedra calcária	1.21×10^1 MJ / kg	Szargut (1988)
Cerâmica	6.56×10^0 MJ / kg	Frischknecht et al (1996)
<i>Materiais Orgânicos</i>		
Polietileno	8.60×10^1 MJ / kg	Boustead (1993)
Polipropileno	8.52×10^1 MJ / kg	Boustead (1993)
PVC	6.70×10^1 MJ / kg	Boustead (1993)
pintura acrílica	8.23×10^1 MJ / kg	Buwal (1995)
carvão ativado	2.47×10^2 MJ / kg	Elvers et al. (1996)
reativação do carvão ativado	1.23×10^2 MJ / kg	Meir (1997)
Composto	4.36×10^0 MJ / kg	Dewulf (2000)
<i>Utilidades</i>		
Gás	3.49×10^1 MJ / Nm ³	Szargut (1988)
Eletricidade	$1,54 \times 10^0$ MJ / MJ	Szargut (1988)
Transporte de carro	4.33×10^0 MJ / km	Frischknecht et al (1996)
Transporte por caminhão (28 t)	3.13×10^0 MJ / t.km	Frischknecht et al (1996)
Escavação com pá-carregadeira	8.22×10^0 MJ / m ³	Szargut (1988)

Este trabalho limitou-se à avaliação até o nível dois. Segundo Szargut (1998), levando-se em consideração os dois primeiros níveis, mais de 95% da exergia acumulada é computada. A **Figura 4.2.** apresenta um diagrama da seqüência de cálculo do método de CExA.

Deve ser ressaltado, que os valores de CExA apresentados na **Tabela 4.1.** consideraram apenas a exergia necessária para a fabricação e operação dos elementos listados. A

metodologia empregada não levou em consideração a exergia necessária para eliminação dos resíduos oriundos destes processos produtivos.

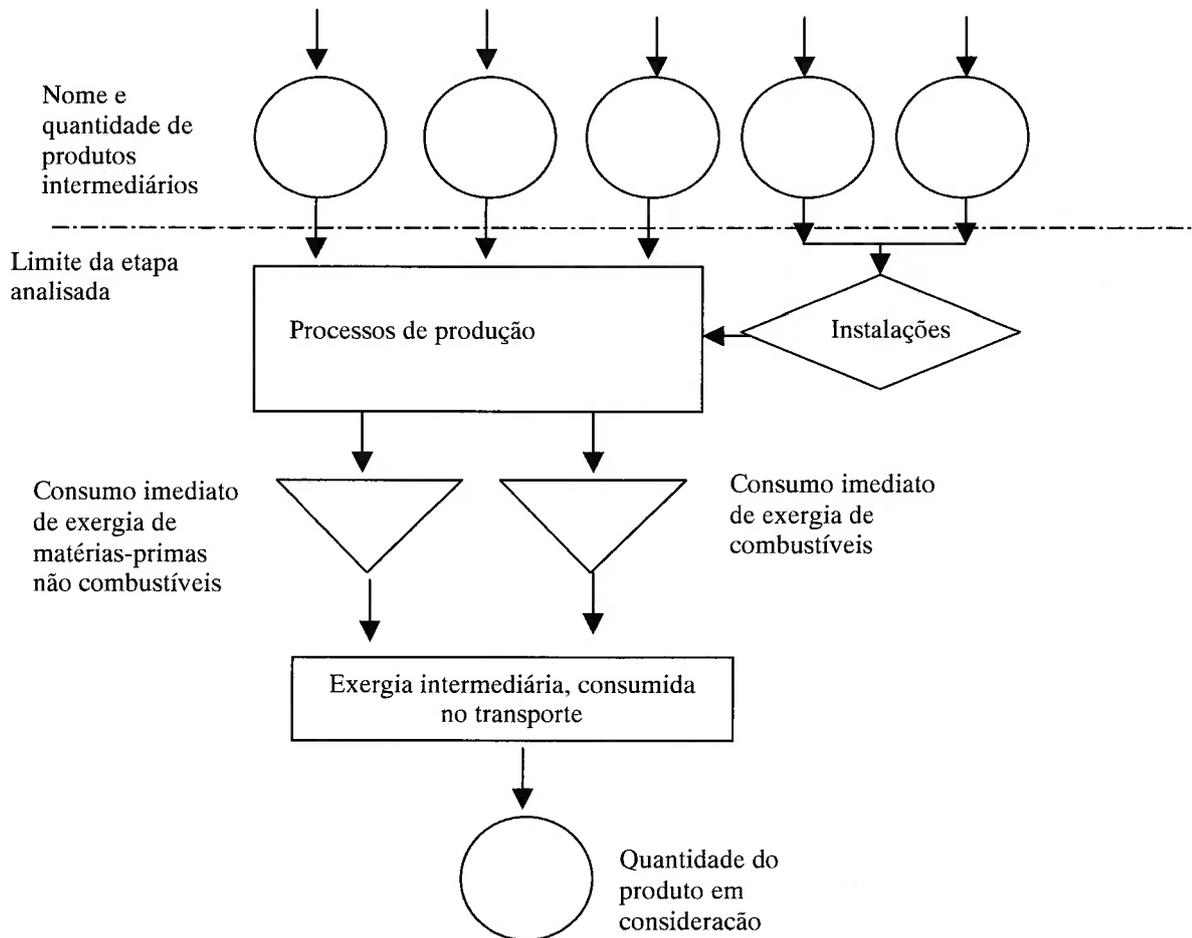


Figura 4.2. Diagrama da seqüência de cálculo do método de CExA (Szargut, 1988)

Com a finalidade de simplificar os cálculos, adotou-se que equipamentos como bombas e sopradores são fabricadas exclusivamente de aço, de forma que para o cálculo da exergia acumulada foi considerado o peso destes equipamentos, fornecido pelos fabricantes, multiplicado pela exergia acumulada do aço da **Tabela 4.1**.

A metodologia constituiu-se, portanto, na seguinte sistematização de trabalho:

- Identificação e caracterização quanto à composição química do fluxo de contaminante ambiental avaliado;
- Cálculo da exergia deste fluxo;
- Cálculo da CExA de alguns processos de tratamento, descontaminação ou reciclagem, computando-se os recursos e utilidades necessários para sua implantação, ponderados pelos valores específicos da **Tabela 4.1.**;
- Cálculo da exergia do(s) fluxo(s) de saída após o tratamento; e
- Avaliação do rendimento, em base exergética, do processo de tratamento dado pela metodologia abaixo .

Conforme o objetivo do processo de tratamento, tem-se duas situações distintas, para as quais definiu-se critérios de métodos diferenciados.

4.1. PROCESSOS DE DESTRUIÇÃO DA EXERGIA DO CONTAMINANTE

Tais processos tem por meta reduzir ao mínimo a exergia contida no fluxo de um contaminante. São processos que visam o tratamento de emissões atmosféricas, efluentes líquidos ou a descontaminação de solo e água subterrânea, nos quais a recuperação de um produto é mínima, senão desprezível. Para estes processos, seguindo-se a nomenclatura apresentada na **Figura 4.1.**, definiu-se um rendimento exergético para destruição do contaminante:

$$\eta_d = \frac{\mathbf{B}_{contaminante} - \mathbf{B}_{rejeito} - \mathbf{B}_{produto}}{\mathbf{B}_{insumos}} \quad (15)$$

4.2. PROCESSOS DE APROVEITAMENTO EXERGÉTICO DO CONTAMINANTE

Tais processos têm por meta maximizar a exergia que pode ser obtida de um dado contaminante, através de processos de tratamento que mitigam o impacto causado ao meio ambiente e produzem algum produto útil para a sociedade. São processos tais como a destinação final de resíduos sólidos ou líquidos, os quais possuem uma elevada exergia específica, a qual pode ser parcialmente recuperada pela sociedade. Para estes processos, seguindo-se a nomenclatura apresentada na **Figura 4.1.**, definiu-se um rendimento exergético para aproveitamento do produto convertido:

$$\eta_p = \frac{\mathbf{B}_{rejeito} + \mathbf{B}_{produto}}{\mathbf{B}_{contaminante} + \mathbf{B}_{insumos}} \quad (16)$$

5. ESTUDOS DE CASO

A seguir serão apresentados estudos de caso nos quais foi aplicada a metodologia descrita no capítulo anterior. Procurou-se abordar situação bem distintas, de maneira a contemplar os três meios suscetíveis a impacto ambiental: água, ar e solo. Desta maneira, foram considerados estudos de caso envolvendo os problemas de tratamento de emissões atmosféricas, contaminação do solo e água subterrânea, bem com a destinação final de resíduos sólidos.

Para cada estudo de caso será conduzida uma breve descrição do problema, durante a qual o conteúdo exergético que se pretende tratar será examinado e quantificado. Em seguida será apresentado um descritivo das alternativas de processos de tratamento consideradas, bem com as hipóteses realizadas, visando determinar a quantidade de insumos e utilidades necessários para a instalação e operação dos sistemas, durante um horizonte de tempo pré-definido. Com esta informação e com o consumo de exergia acumulado para os diversos itens apresentados na **Tabela 4.1.**, será computado o consumo de exergia acumulado para cada alternativa, visando sua comparação. Esta será feita através do rendimento de destruição da exergia do contaminante, η_d , para os estudos de caso 5.1. e 5.2.; e por meio do rendimento de aproveitamento exergético do contaminante, η_p , para o estudo de caso 5.3.

Ao final dos estudos, será apresentada uma discussão dos rendimentos exergéticos calculados, comparando os resultados com os critérios de escolha tradicionais.

5.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS

5.1.1. Descrição do Problema

A indústria mecânica faz uso de processos de pintura em diversos segmentos e etapas de sua cadeia produtiva. Considerou-se aqui uma situação-problema real, em uma indústria de autopeças localizada em Curitiba-PR, a qual emprega tinta a base de solventes num processo convencional de pintura por pistola.

As peças são pintadas em uma cabine fechada, sendo o ar contaminado por compostos orgânicos succionado por um ventilador radial e encaminhado ao duto de exaustão e chaminé. Há uma cortina d'água que evita que emissões fugitivas saiam da cabine, promovendo a remoção parcial dos contaminantes destas emissões, os quais ficam dissolvidos na água que opera em circuito fechado. Periodicamente são conduzidos descartes desta água, para o sistema de tratamento de efluentes na fábrica. Este estudo baseou-se exclusivamente no efluente gasoso do escape da chaminé. A **Figura 5.1.** ilustra o problema e as fronteiras consideradas.

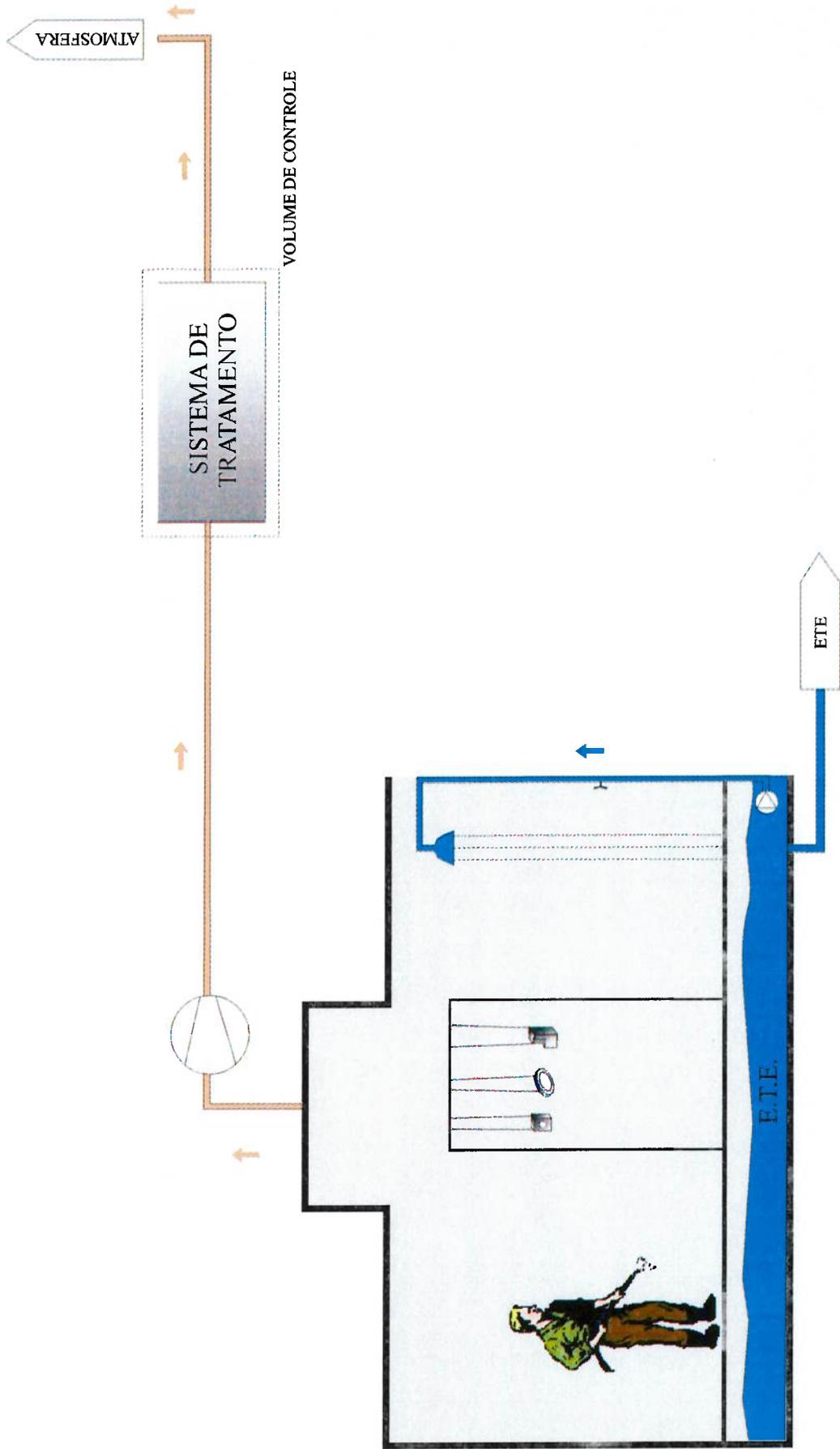


Figura 5.1. - Efluentes gasosos - problema e fronteiras consideradas

As características da instalação são:

- Dimensões da cabine: Largura= 2,44 m; Altura= 2,14 m; Profundidade= 2,91 m;
- Vazão do ventilador: 141 Nm³/min;
- Composição média da emissão atmosférica da chaminé, para os parâmetros de interesse analisados:
 - Benzeno: 24 µg/Nm³;
 - Tolueno: 60.162 µg/Nm³;
 - Xileno: 39.015 µg/Nm³;
 - Acetato de n-butila: 41.958 µg/Nm³;
 - Álcool etílico: 27.972 µg/Nm³;
 - Acetona: 23.310 µg/Nm³; e
- Temperatura dos gases de escape: 42 °C.

Atualmente as emissões atmosféricas são descartadas sem nenhum tratamento.

A **Tabela 5.1.** apresenta os valores da exergia química por unidade de volume do contaminante, para o qual utilizou-se a **Equação (12)** e assumiu-se as seguintes hipóteses:

- mistura ideal de gases (atividade = fração molar: $a_i = x_i$); e
- $R = 0,2871$ kJ/kg K para o ar.

Tabela 5.1. - Cálculo da Exergia Química da Emissão

Espécie Química	Massa Molecular	Exergia química específica	Conc. na Chaminé	Fração molar x_i	Exergia química específica	Fração da Exergia química da corrente
	g/mol	kJ/mol	µg/Nm ³ :	mol/mol	kJ/g	kJ/Nm ³
Benzeno	78,12	3.304	24	6,88E-09	42,291	0,0010
Tolueno	92,14	3.943	60.162	1,46E-05	42,798	2,5142
Xileno	106,17	4.573	39.015	8,23E-06	43,073	1,6392
Acetato de n-butila	88,11	2.270	41.958	1,07E-05	25,760	1,0374
Álcool etílico	46,07	1.364	27.972	1,36E-05	29,606	0,7998
Acetona	58,08	1.792	23.310	8,99E-06	30,845	0,6945
TOTAL						6,6860

Para a vazão de 141 Nm³/min tem-se um fluxo exerético químico $\dot{\mathbf{B}}^{ch}$ de 15,71 kW.

Considerando-se que a fração mássica dos contaminantes de 3,256 kg/h é inferior a 0,0298% da vazão mássica total do fluxo de saída, adotou-se, para o cálculo da exergia física do fluxo de saída deste processo, que o produto de saída é constituído exclusivamente de ar atmosférico, tratado aqui como um gás ideal. Tem-se portanto:

$$\dot{\mathbf{B}}_s^{ph} = H_s - H_0 - T_0(S_s - S_0) \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{B}}_s^{ph} = \dot{m}_s c_p (T_s - T_0 - T_0 \ln \frac{T_s}{T_0}) + \dot{m}_s R T_0 \ln \frac{P_s}{P_0} \quad (18)$$

onde:

$$\dot{m}_s = 3,03 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 1,0 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$R = 0,2871 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$T_s = 313 \text{ K}$$

$$T_0 = 298 \text{ K}$$

$$P_s = 1,023 \text{ bar}$$

$$P_0 = 1,013 \text{ bar (Pressão ambiente da região de Curitiba)}$$

Substituindo-se os valores tem-se que $\dot{\mathbf{B}}_s^{ph} = 3,6882 \text{ kW}$

Para a exergia cinética, tem-se:

$$\dot{\mathbf{B}}^k = \dot{m} \frac{V_s^2}{2} \quad (19)$$

onde:

\dot{B}^k = exergia cinética [kW]

\dot{m} = vazão mássica do fluxo = 3,03 kg/s

V_s = velocidade de saída do escoamento = 8,31 m/s

Substituindo-se os valores tem-se que $\dot{B}^k = 0,1046$ kW

Para a exergia potencial, tem-se:

$$\dot{B}^p = \dot{m} \cdot g_E \cdot Z_s \quad (20)$$

onde:

\dot{B}^p = exergia potencial

g_E = aceleração da gravidade = 9,81 m/s²

Z_s = cota de saída do fluxo = 3 m

Substituindo-se os valores tem-se que $\dot{B}^p = 0,0892$ kW

Portanto o conteúdo exergético total do fluxo de saída é

$$\dot{B}_{\text{conta min ante}} = \dot{B}^k + \dot{B}^p + \dot{B}^{ph} + \dot{B}^{ch} = 20,060 \text{ kW}$$

O conteúdo exergético acima, equivalente a uma exergia específica de 8,5363 kJ/Nm³, é relativamente baixo, em razão da maior fração do fluxo avaliado ser de ar, à pressão e temperatura próximas à ambiente, bem como o fato de a fração de contaminantes ser bastante diminuta (inferior a 0,03%). Esta exergia é o objeto de destruição por parte dos processos de tratamento avaliados a seguir.

5.1.2. Descrição das Alternativas de Tratamento

5.1.2.1. INCINERAÇÃO (PÓS-QUEIMADOR / OXIDAÇÃO TÉRMICA)

O pós-queimador (*after burner*) tem por objetivo promover a destruição térmica dos compostos orgânicos presentes no ar a ser tratado. O ar contaminado é empregado como ar primário e/ou secundário de combustão em um queimador. O combustível proposto para utilização é o gás natural, em função da reduzida quantidade de material particulado gerado no processo de queima, bem como de sua disponibilidade na planta. Após a queima, grande quantidade de energia é liberada, que se traduz no aquecimento dos gases resultantes. Desta maneira, é obtido um perfil de temperaturas na zona de reação com condições capazes de oxidar os contaminantes orgânicos presentes nos gases a serem tratados. O fluxograma conceitual pode ser observado na **Figura 5.2.**

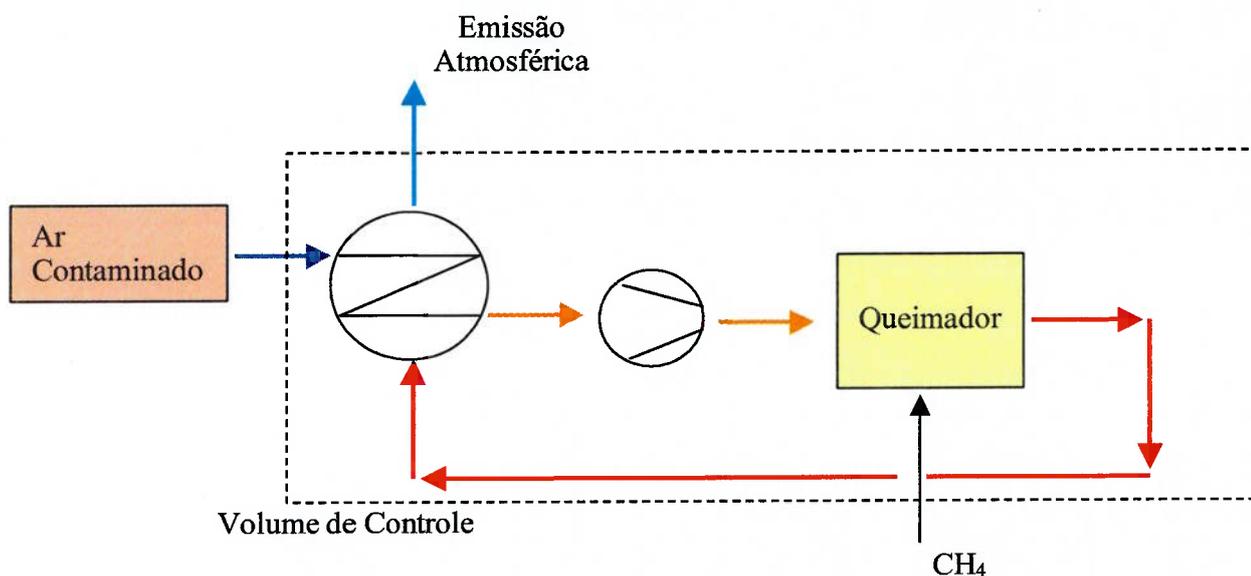


Figura 5.2. - Fluxograma conceitual do processo de incineração

Foi considerada também a instalação de um pré-aquecedor para os gases de entrada, que tem como finalidade aproveitar o rejeito térmico dos gases de saída e elevar o rendimento térmico do sistema.

Para o cálculo do consumo de combustível, adotou-se as seguintes hipóteses:

- A câmara de combustão é adiabática;
- O objetivo do processo é elevar a temperatura dos gases de combustão até 1295K, na qual admite-se que a oxidação térmica dos contaminantes foi completa;
- O emprego de 3 trocadores de calor intermediários, para pré-aquecer o ar de entrada, faz com que este entre na câmara de combustão a 1095K (informação do fabricante); e
- O combustível CH₄ entra a 295K; e
- O poder calorífico dos contaminantes é desprezível no processo de combustão.

Tem-se, portanto, o seguinte modelo:

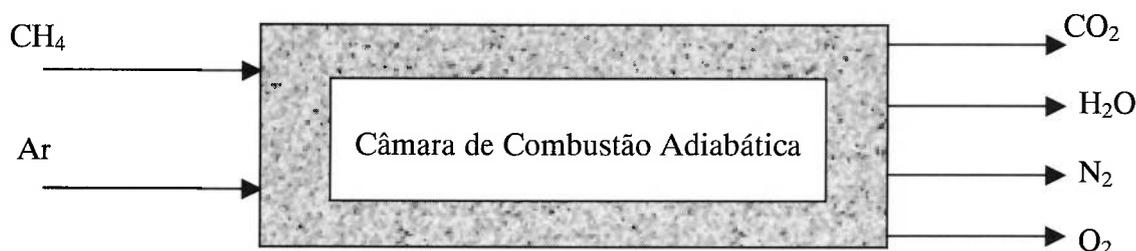
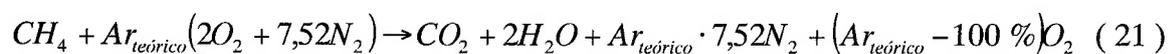


Figura 5.3.- Modelo da Câmara de Combustão do Pós-Queimador

O equacionamento estequiométrico é apresentado na **Equação 21** :



O balanço de energia para este sistema é:

$$\sum_i (m_i h_i)_{reagentes} = \sum_i (m_i h_i)_{produtos} \quad (22)$$

Após cálculos iterativos, chegou-se a 1150% de ar teórico em excesso, para atingir, nas condições apresentadas, a temperatura dos gases de saída de 1295K. Nesta condição, tem-se, para a reação com 1 mol de CH₄ os seguintes produtos:

$$n_{CO_2} = 1$$

$$n_{H_2O} = 2$$

$$n_{N_2} = 86,48$$

$$n_{O_2} = 21$$

Para a vazão de 2,35 Nm³/s de ar contaminado, tem-se um consumo de

$$\dot{V}_{CH_4} = 154,85 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

O único equipamento elétrico deste sistema é um ventilador axial, com potência de 7,5 hp. Tem-se, portanto, a seguinte energia total consumida ao longo de 20 anos de operação, 8,5 x 10⁵ MJ de energia elétrica consumidos.

Ao final do processo de destruição térmica, pode-se garantir que os contaminantes foram oxidados termicamente, restando um fluxo de gases de saída a 200 °C. Para o cálculo da exergia do rejeito, foi considerada apenas a fração térmica, calculada pela **Equação 18**, uma vez que as demais frações são pouco significativas. Desta maneira, tem-se:

$$\dot{B}_{rejeito} = \dot{B}^{ph} = 115,73 \text{ Kw}$$

5.1.2.2. ADSORÇÃO EM COLUNA DE CARVÃO ATIVADO

A adsorção em carvão ativado é um processo largamente utilizado para o tratamento de contaminantes orgânicos. Hidrocarbonetos aromáticos como o benzeno, tolueno e xileno possuem elevada afinidade pelo carvão ativado e são retardados no leito de adsorção durante a passagem do ar contaminado. Outros compostos, como o acetado de n-butila, álcool etílico e acetona, possuem menor afinidade com o carvão, mas também têm sua velocidade de migração reduzida durante a passagem através do leito de adsorção.

A adsorção é um fenômeno físico, no qual ocorre um equilíbrio dinâmico entre as taxas de adsorção e dessorção dos contaminantes a serem tratados. Trata-se de um fenômeno de superfície, altamente influenciado pela qualidade do carvão (granulometria, distribuição e uniformidade dos tamanhos dos poros).

O processo de adsorção é influenciado ainda pela temperatura e umidade relativa do ar a ser tratado. Altas temperaturas e elevado teor de umidade provocam redução da eficiência da adsorção

Para o problema em questão foi idealizado um processo envolvendo três colunas de adsorção ligadas em série, cujo fluxograma pode ser visualizado na **Figura 5.4.**

Adotou-se três colunas com a finalidade de conferir maior flexibilidade ao sistema. O dimensionamento foi feito de tal forma que duas colunas apenas atuando, seriam suficientes para adsorver os contaminantes do fluxo de ar. A terceira coluna tem como função garantir a segurança do sistema. Por outro lado, quando a primeira coluna ficar completamente saturada pelos compostos mais leves, ainda é possível mantê-la em operação, para os compostos mais pesados, maximizando, desta forma, a vida útil do carvão. Uma vez saturada a primeira coluna, esta deve ser substituída por uma nova, e a

seqüência de colunas deve ser alterada, de tal forma que a nova coluna passe a ser a última e a segunda passe a ser a primeira. Manobra-se de maneira análoga quando da saturação das demais colunas.

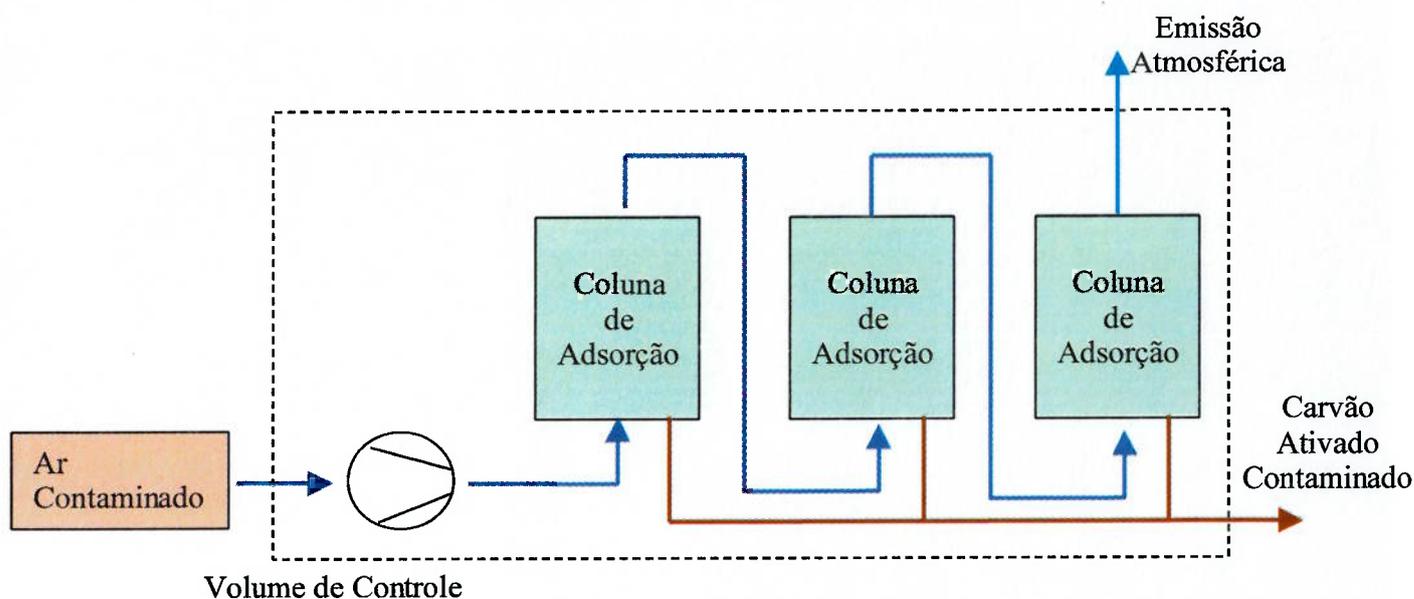


Figura 5.4. - Fluxograma conceitual do processo de adsorção com carvão ativado

Sendo a acetona o composto de menor afinidade com o carvão, 25% de capacidade de adsorção em massa, (COONEY, 1998), adotou-se este valor para a massa total de contaminantes do fluxo. Tem-se desta forma, a massa diária de carvão ativado consumida como:

$$\dot{m}_{CA} = \frac{\dot{m}_{cont}}{\alpha} \quad (23)$$

Ao longo de 20 anos de operação tem-se $m_{CA} = 550$ t de CA.

O único equipamento elétrico deste sistema é um ventilador axial, com potência de 15 hp, o qual consome $1,7 \times 10^6$ MJ ao longo do período de operação do sistema.

Uma vez que foi assumido que 100% da massa de contaminante será adsorvida pelo carvão ativado, tem-se: $\dot{B}_{rejeito} = 0$.

5.1.2.3. BIOFILTRO

O processo de biofiltração envolve o transporte dos gases contaminados para um meio poroso (cascas, maravalha, pedaços de madeira, ou outros) onde se desenvolvem bactérias e fungos responsáveis pelo metabolismo dos compostos orgânicos, os quais são oxidados. O oxigênio para a respiração celular é fornecido pelo próprio ar a ser tratado, sendo necessária, apenas, a adição de nutrientes (correção do fator NPK) e controle da umidade e temperatura. A **Figura 5.5.** apresenta um diagrama ilustrativo do processo idealizado.

O meio poroso torna-se um substrato vivo cuja ação é contínua, não havendo necessidade de substituí-lo, permanecendo ali, por longo tempo. Para o Biofiltro poder ser considerado operacional é necessário um tempo para que os microorganismos se adaptem ao meio poroso e ali se desenvolvam plenamente (Zeisig,1987), sendo que a eficiência do biofiltro será crescente, menor no início, mas com tendência a aumentar após o período de adaptação.

O único equipamento elétrico do sistema de biofiltro é um ventilador axial, com potência de 15 hp, o qual consome $1,7 \times 10^6$ MJ ao longo do período de operação do sistema.

Estimou-se o rendimento do biofiltro no abate das emissões de 90%. Desta maneira, tem-se:

$$\dot{B}_{rejeito} = 10\% \cdot \dot{B}_{conta\ min\ ante} = 2,006\ kW$$

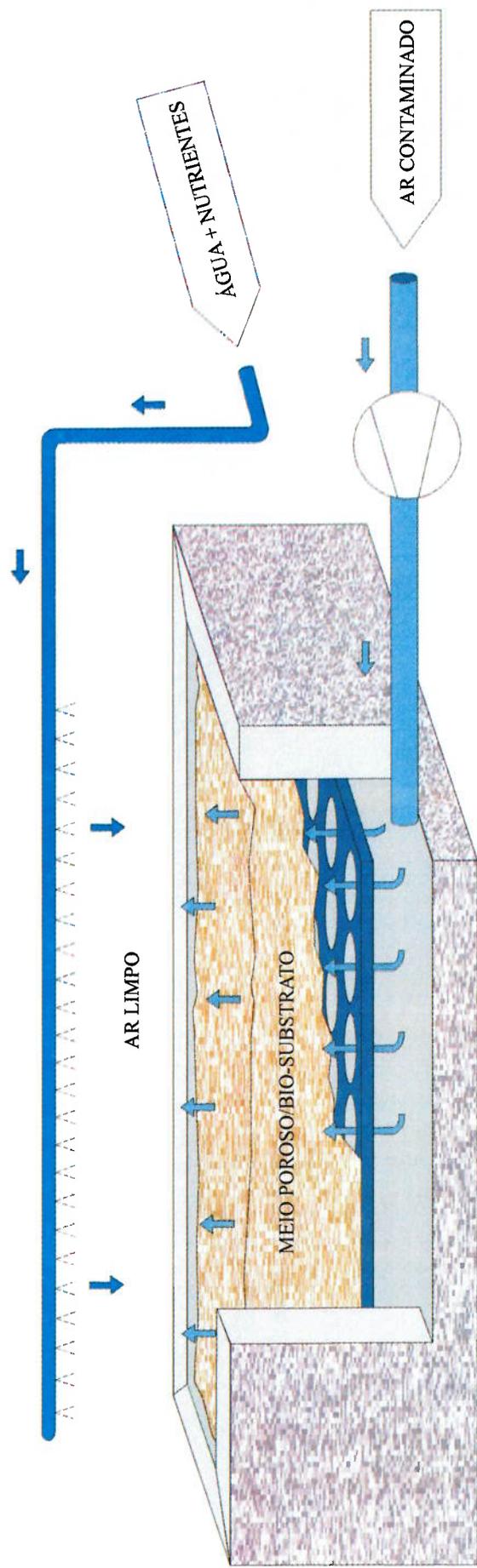


Figura 5.5. - Diagrama Ilustrativo – Processo de Biofiltro

5.1.3. Cálculo da Exergia Acumulada

Para cada um dos processos, considerou-se o Consumo de Exergia Acumulado (CExA) em todos os recursos e utilidades empregados, desde a extração das matérias-primas da ecossfera, manipulação, fabricação e transporte.

O cálculo do consumo de exergia acumulado nos processos avaliados é apresentado na **Tabela 5.2.**, na qual, para cada alternativa de processo, computou-se a quantidade de recursos necessária e multiplicou-se pelo CExA específico de cada recurso. Para os recursos do grupo “utilidades”, necessários durante a operação do sistema, considerou-se um horizonte de 20 anos de funcionamento.

5.1.4. Avaliação dos Resultados

Pode-se observar, que a exergia total requerida é de $8,40 \times 10^6$ MJ (biofiltro) a $7,97 \times 10^9$ MJ (pós-queimador). O consumo de exergia com a construção do pós-queimador ($2,58 \times 10^5$ MJ) e do sistema de adsorção por carvão ativado ($1,76 \times 10^5$ MJ) ficou dentro da mesma ordem de grandeza. Exceção foi o consumo de exergia para construção do biofiltro, ($3,60 \times 10^6$ MJ), significativamente mais elevada. Esta última alternativa, entretanto, apresentou consumo total de exergia acumulado, considerando-se também a fração operacional, significativamente menor.

É interessante ressaltar, que a parcela mais significativa do consumo de exergia das três alternativas avaliadas, foi aquela relacionada ao insumo utilizado por alternativa, a saber, gás natural, carvão ativado e composto, para pós-queimador, coluna de adsorção e biofiltro, respectivamente. Já o consumo de eletricidade das três alternativas, ficou num patamar bastante semelhante, coerente com as potências dos ventiladores envolvidos.

Tabela 5.2.. Consumo de exergia acumulado para os processos de tratamento - Emissões Atmosféricas

Recurso / Utilidade	CEExC Específico	Pós-Queimador		Coluna de C.A.		Biofiltro	
		Quantidade	CEExA [MJ]	Quantidade	CEExA [MJ]	Quantidade	CEExA [MJ]
<i>Materiais Inorgânicos</i>							
tijolo	4,59E+01 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	5,00E+04 kg	2,30E+06
concreto	1,10E+00 MJ / kg	1,20E+04 kg	1,32E+04	1,35E+04 kg	1,49E+04	3,00E+05 kg	3,30E+05
aço	4,59E+01 MJ / kg	2,16E+02 kg	9,91E+03	1,85E+03 kg	8,47E+04	9,85E+02 kg	4,52E+04
aço zincado	5,86E+01 MJ / kg	2,75E+03 kg	1,61E+05	2,50E+02 kg	1,47E+04	0,00E+00 kg	0,00E+00
cerâmica	6,56E+00 MJ / kg	7,35E+03 kg	4,82E+04	0,00E+00 kg	0,00E+00	kg	0,00E+00
<i>Materias Orgânicos</i>							
Polipropileno	8,52E+01 MJ / kg	2,84E+02 kg	2,42E+04	7,00E+02 kg	5,96E+04	1,08E+04 kg	9,20E+05
PVC	6,70E+01 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	1,92E+02 kg	1,29E+04
pintura acrílica	8,23E+01 MJ / kg	2,00E+01 kg	1,65E+03	3,00E+01 kg	2,47E+03	1,00E+01 kg	8,23E+02
carvão ativado	2,47E+02 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	5,50E+05 kg	1,36E+08	0,00E+00 kg	0,00E+00
reativação do carvão ativado	1,23E+02 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	5,50E+05 kg	6,77E+07	0,00E+00 kg	0,00E+00
composto	4,36E+00 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	5,00E+05 kg	2,18E+06
<i>Utilidades*</i>							
gás	3,49E+01 MJ / Nm ³	2,28E+08 Nm ³	7,97E+09	0,00E+00 Nm ³	0,00E+00	0,00E+00 Nm ³	0,00E+00
eletricidade	1,54E+00 MJ / MJ	1,31E+06 MJ	2,02E+06	1,70E+06 MJ	2,62E+06	1,70E+06 MJ	2,62E+06
Subtotal - Construção do sistema			2,58E+05		1,76E+05		3,60E+06
Subtotal - Operação do sistema			7,97E+09		2,06E+08		4,80E+06
TOTAL GERAL			7,97E+09		2,06E+08		8,40E+06

* Considerada a operação por 42.240 horas ou 20 anos

A **Tabela 5.3.** apresenta o rendimento exergetico η_d das alternativas avaliadas. Uma vez que para este estudo de caso, o foco principal dos processos de tratamento foi a destruição da exergia do contaminante, utilizou-se este rendimento.

Tabela 5.3. - Rendimento exergetico das alternativas avaliadas

Parâmetro	Unidade	Alternativas		
		Pós-Queimador	Coluna de C.A.	Biofiltro
$B_{\text{contaminante}}$	MJ	3,05E+06	3,05E+06	3,05E+06
B_{rejeito}	MJ	1,76E+07	0	3,05E+05
B_{produto}	MJ	0	0	0
B_{insumos}	MJ	7,97E+09	2,06E+08	8,40E+06
η_d	%	0,18	1,48	32,7

A alternativa do pós queimador apresenta a situação particular, em que a exergia do contaminante é menor do que a exergia do rejeito. Ou seja, apesar de B_{insumo} ter sido consumido durante um processo que num primeiro momento foi concebido para destruir a exergia de um dado contaminante, ao final deste processo, tem-se um subproduto residual de conteúdo exergetico mais elevado. Entretanto, é consenso que o potencial de causar dano ao meio ambiente de $B_{\text{contaminante}}$, proveniente basicamente de exergia química de compostos orgânicos presentes nas emissões, é bem superior a B_{rejeito} , o qual possui parcela significativa de exergia física do escape dos gases, a qual é praticamente inofensiva ao meio-ambiente. Tal contradição evidencia a limitação do conceito de exergia, quando utilizado isoladamente para avaliação de impacto ambiental.

Pela metodologia adotada, pode-se afirmar que o biofiltro é a alternativa mais adequada para o tratamento das emissões, o que está coerente com a visão de técnicos que primam pelo uso do conceito de sustentabilidade para soluções ambientais.

5.2. REMEDIAÇÃO DE SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA

5.2.1. Descrição do Problema

A contaminação do solo e da água subterrânea por diversos produtos químicos é um dos mais sérios problemas ambientais, o qual tem chamado a atenção da sociedade e das autoridades governamentais de maneira crescente, nos últimos anos.

A contaminação do solo por compostos voláteis pode expor uma população aos vapores destes compostos, colocando em risco, desta forma, sua saúde, além de ser prejudicial ao meio-ambiente. O lençol freático contaminado por este solo pode representar um problema mais sério ainda, uma vez que está em constante movimento, não respeita as fronteiras da superfície e pode comprometer o recurso hídrico de vizinhanças. Quando existe a extração de água para consumo humano no entorno de um sítio contaminado, esse problema pode assumir proporções catastróficas, como relatam noticiários recentes no Brasil.

O presente estudo de caso foi fundamentado numa situação real, de contaminação de solo e água subterrânea por hidrocarbonetos derivados do petróleo, ocorrida em fevereiro de 2001. Nesta ocasião, uma falha de montagem de tubulação permitiu o vazamento para o solo de aproximadamente 8.000 L de óleo diesel de um tanque subterrâneo de um posto de serviços localizado no interior do estado de São Paulo, cuja planta é apresentada na **Figura 5.6**. O vazamento foi detectado pela presença de combustível no poço cacimba, PC-04, o qual supria a demanda de água deste posto.

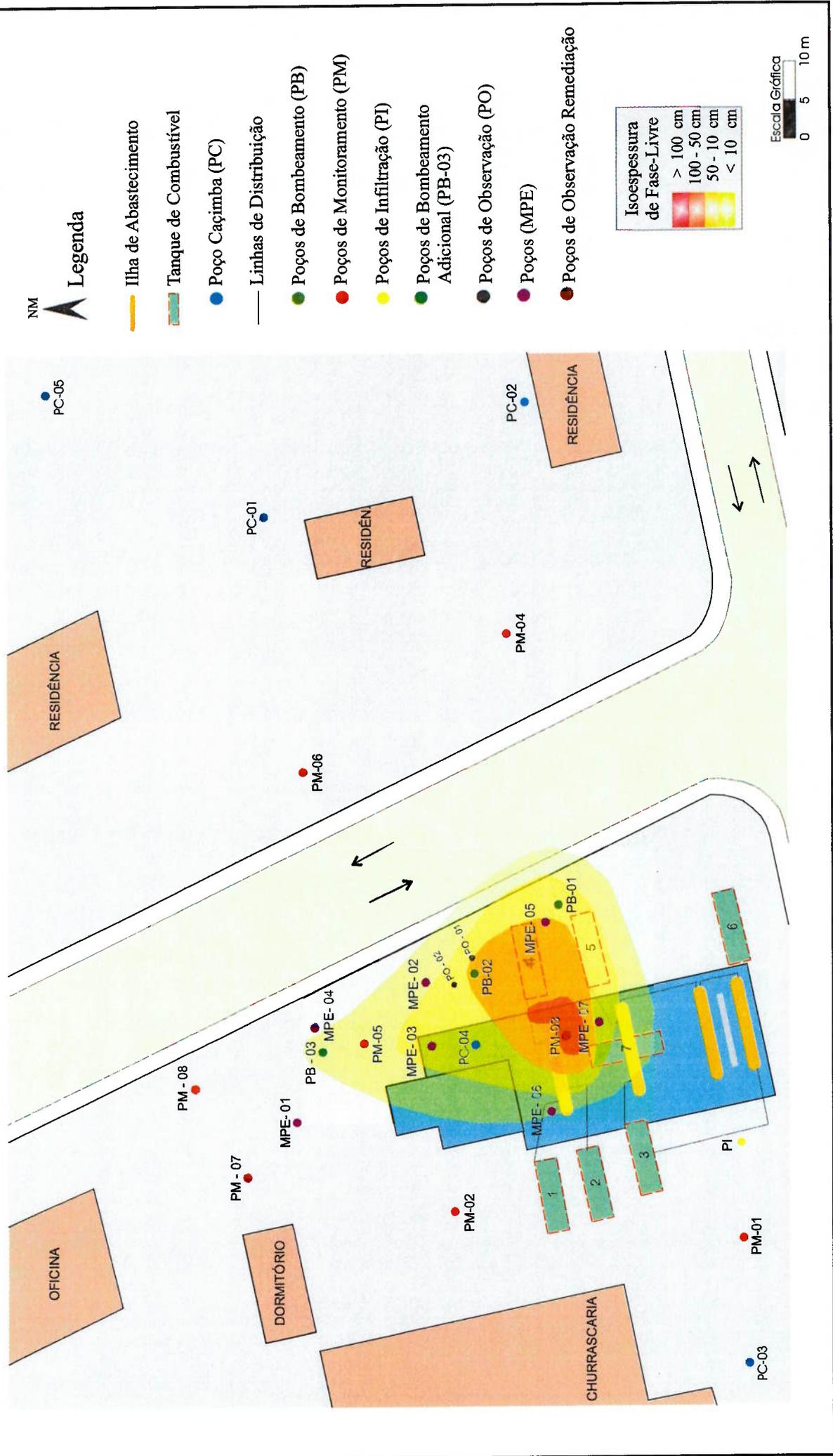


Figura 5.6. - Planta da área estudada e pluma de contaminação

Procedeu-se então a uma investigação ambiental, a qual foi constituída por diversas perfurações verticais no solo, objetivando a coleta e análise de amostras de solo e água subterrânea. O resultado da avaliação geológica desta contaminação é apresentado na **Figura 5.6**. Nela observa-se uma pluma de fase livre de combustível sobrenadante ao freático de 1681 m², com espessuras de até 1,2 m.

A **Tabela 5.4**, apresenta uma estimativa para a distribuição de combustível proveniente de um vazamento, ao longo das zonas não-saturada e saturada do solo, segundo distribuição fracionária utilizada pela agência ambiental norte americana, EPA³, considerando-se o vazamento inicial de 8.000 L informado.

Tabela 5.4. - Distribuição de 8.000 L de combustível num aquífero

Meio	Fase	Volume de Contaminante [L]	% do total	Volume Contaminado	% do total
Solo	Livre	5120	64	673	1
Solo	Residual	2800	35	13.464	20
Água	Dissolvida	80	1	53.183	79
Total		8.000	100	67.320	100

Fonte: Environmental Protection Agency – EPA 1990 - Para litologia predominante de areia fina

Em razão da existência de poços para extração de água para consumo humano a jusante da pluma de contaminação (PC-01, PC-02 e PC-05, **Figura 5.6**.) o nível de exigência de descontaminação da área pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é que a concentração de contaminante na água subterrânea não apresente risco à saúde humana conforme análise de risco conduzida. Tal exigência é condizente com os limites impostos pela portaria do Ministério da Saúde nº 1469, de 19/01/2001, a qual tipifica a qualidade da água para sua potabilidade.

³ Environmental Protection Agency – Agência de Proteção Ambiental Norte Americana

A **Tabela 5.5.** apresenta os resultados analíticos para a concentração de fase dissolvida dos parâmetros avaliados nos poços de monitoramento apresentados na **Figura 5.6.**, bem como os limites a serem atingidos.

Tabela 5.5. – Concentração de Contaminantes na Água Subterrânea

Amostra \ Parâmetro	Benzeno [mg/L]	Tolueno [mg/L]	Etilbenzeno [mg/L]	Xilenos [mg/L]
PM-01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PM-02	<0,001	0,001	<0,001	<0,001
PM-04	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PM-05	0,002	0,003	<0,001	0,014
PM-06	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PC-01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
PM-03	1880	670	10	<0,001
PM-05	1880	670	10	<0,001
PC-04	1880	670	10	<0,001
Limite a ser atingido*	0,0099	20	10	200

* Limite para a rota de exposição "ingestão de água subterrânea" calculado na análise de risco

Observa-se, portanto, que os parâmetros de interesse, cuja concentração deve ser reduzida para a água subterrânea são benzeno e tolueno, na área de abrangência da pluma de contaminação, na qual foram analisados os poços PM-03, PM-05 e PC-04. Já os demais poços, nos quais não foi identificada a presença de contaminante dentro dos limites de detecção analíticos, delimitam a extensão da pluma apresentada na **Figura 5.6.**

Para o solo, adotou-se também o procedimento de análise de risco, embora exista uma diretriz normativa para qualidade do solo do estado de São Paulo (CETESB, 2001), como referência para o limite de descontaminação a ser atingido. O resultado analítico das amostras de solo, para os parâmetros de interesse, bem como os limites admissíveis são apresentados na **Tabela 5.6.**

Tabela 5.6. - Concentração de Contaminantes no Solo

Parâmetro / Amostra	Benzeno [mg/kg]	Tolueno [mg/kg]	Etilbenzeno [mg/kg]	Xilenos [mg/kg]
TR-06-G	0,12	<0,012	<0,012	<0,012
TR-07-A	0,11	0,007	<0,011	0,005
TR-07-G	0,13	0,039	0,022	0,136
Limite a ser atingido	0,011	43	54	>510

* Limite para a rota de exposição "ingestão de água subterrânea proveniente da lixiviação de contaminante presente no solo" calculado na análise de risco

Observa-se portanto, que para o solo, o único parâmetro de interesse a ser monitorado é a concentração de benzeno, cujos valores devem ser reduzidos, através de remediação do solo. Até o limite de 0,011 mg/kg apresentado.

A **Tabela 5.7.** apresenta o cálculo da exergia química média do óleo diesel, uma vez que se partiu de valores médios de sua composição química.

Tabela 5.7. - Cálculo da Exergia Química do Óleo Diesel

Espécie Química	Massa Molecular [g/mol]	Exergia química [kJ/mol]	Concentração no Diesel [% g/g]	Exergia química [kJ/g]	Termo $RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$ [kJ/kg]
Benzeno	78,12	3.304	0,98	42,291	414,46
Tolueno	92,14	3.943	9,90	42,798	4.236,99
Etilbenzeno	106,16	4.588	5,32	43,217	2.299,14
Xilenos Totais	106,17	4.573	6,60	43,073	2.842,84
Octano	114,23	5.413	12,00	47,388	5.686,53
Decano	142,29	6.717	8,00	47,206	3.776,51
Dodecano	170,34	8.029	20,40	47,135	9.615,57
Hexadecano	226,44	10.640	36,80	46,987	17.291,16
TOTAL - b^{ch}			100,00		46.163,19

Fonte: US EPA - http://www.epa.gov/ATHENS/learn2model/part-two/onsite/afuel_onsite.htm

Para este estudo, considerou-se que o problema a ser tratado é o aporte integral dos 8.000L de combustível para o solo natural, o qual se distribui conforme a **Tabela 5.3.**

Para o cálculo da exergia destruída devido à mistura do contaminante no solo e na água subterrânea, apresentado na **Tabela 5.8.** utilizou-se a **Equação (12)**, considerando-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Mistura ideal: $a_i=x_i$;
- Densidade do óleo diesel = 0,89 kg/L; e
- Densidade do solo = 1,50 kg/L.

Desta forma, tem-se:

$$B = 328.682 \text{ MJ}$$

A exergia total do contaminante é o objeto de eliminação por parte dos sistemas de remediação descritos a seguir.

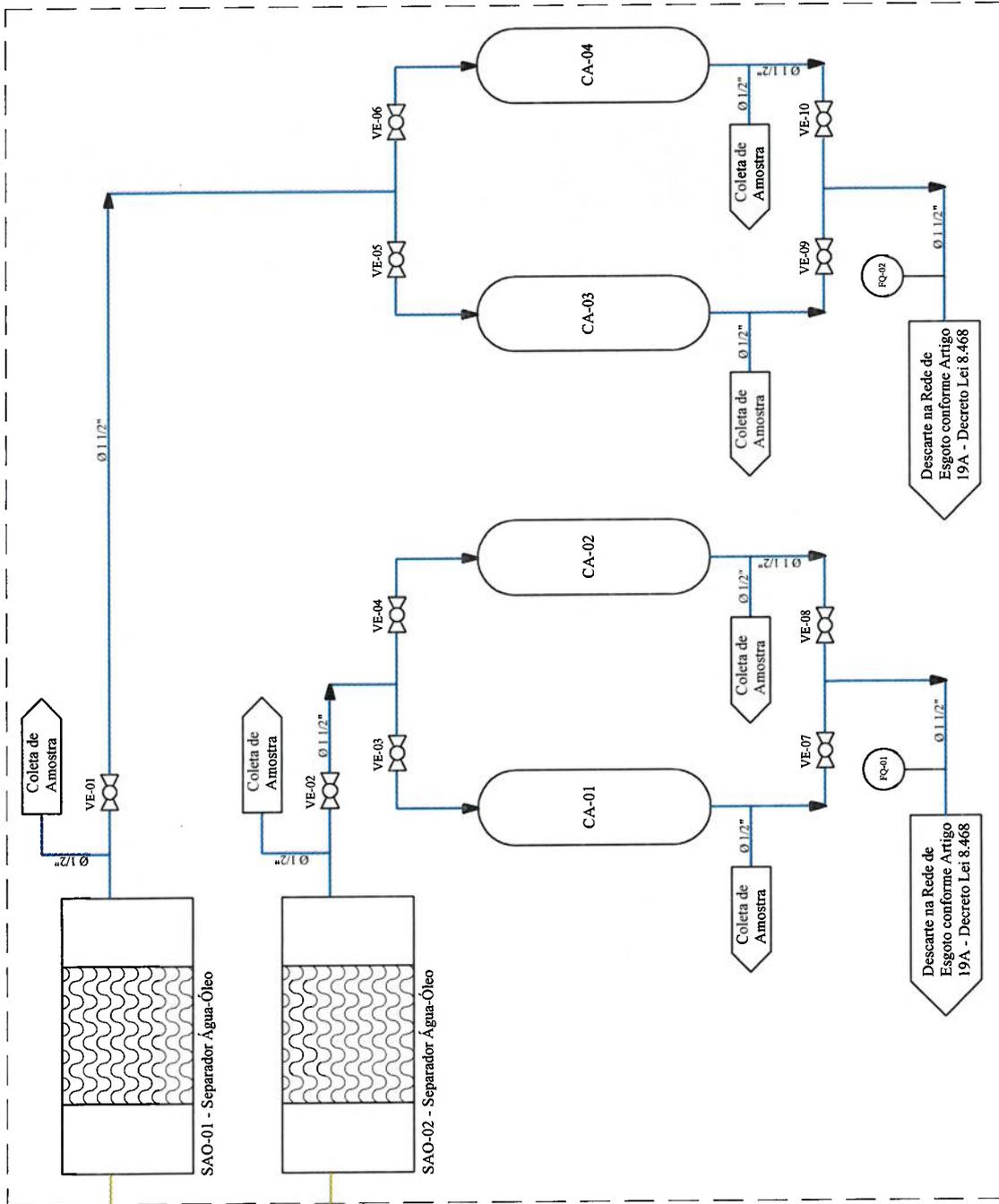
5.2.2. Descrição das Alternativas de Remediação

5.2.2.1. PROCESSO DE BOMBEAMENTO

O processo de bombeamento envolve a instalação de uma malha de poços de extração convenientemente locados na área contaminada, de maneira a permitir que as bombas instaladas nestes poços exerçam influência sobre toda a área. Desta maneira promove-se a remoção do produto contaminante sobrenadante ao freático em taxas bastante expressiva.

A **Figura 5.7.** apresenta um fluxograma do processo em questão. Nela tem-se três poços de bombeamento, os quais recalcam água e contaminante em fase livre para duas caixas separadoras. Nelas é promovida a separação por gravidade do óleo, que é então estocado em tambores e da água, a qual, após passar por colunas de adsorção por carvão ativado, é reinjetada a montante do aquífero contaminado. A **Figura 5.8.** apresenta uma vista geral do sistema instalado. É importante salientar que tais colunas tiveram papel secundário na remediação, uma vez que atuaram exclusivamente na fase dissolvida remanescente da separação da etapa anterior.

Figura 5.7. - Fluxograma do Sistema de Bombeamento



Lavagem

SIMBOLOGIA

- | | | |
|--|-------|--------------------------------------|
| | BP-02 | Poço de Bombeamento |
| | PC-04 | Poço Caçimba |
| | CP-01 | Bomba Pneumática |
| | CA-01 | Sistema 1 (PB-03); Pneumático |
| | | Sistema 2 (PC-04 e PB-02); Auto-Pump |
| | | Mangueira Para Combustível |
| | | Tubo de PVC |



Figura 5.8. – Foto do Sistema de Tratamento Implantado

Para o bombeamento foram utilizadas três bombas pneumáticas de captação superior, as quais são intrinsecamente seguras para operar em ambiente sujeito à atmosfera explosiva, como os poços de bombeamento contendo vapores combustíveis. Tais bombas foram acionadas por um compressor de pistão de 5 cv, o qual operou ininterruptamente, 24 horas por dia, durante todo o período de funcionamento do sistema, consumindo $9,66 \times 10^4$ MJ. A vazão média obtida foi de $3 \text{ m}^3/\text{h}$.

É importante destacar que este processo apresenta elevada eficiência na remoção de produto contaminante presente em fase livre sobre o aquífero freático, mas mostra-se pouco eficaz no tratamento da fase dissolvida do mesmo em água, bem como na remediação do solo contaminado. Portanto, esta técnica é usual no início da remediação, quando é promovida a retirada da parcela mais significativa da contaminação, sendo então substituída por outra técnica que atue prioritariamente na remediação da fase dissolvida do contaminante na água subterrânea, bem como na adsorvida no solo.

A Tabela 5.9. apresenta os resultados de evolução do processo de recuperação obtidos ao longo de um período de 10 meses de operação, os quais são plotados ao longo do tempo na Figura 5.9.

Tabela 5.9. - Dados de Recuperação de Produto

Mês	Período	Recuperação Mensal	Total Recuperado
		[L]	[L]
1	jul/01	550	550
2	ago/01	420	970
3	set/01	350	1320
4	out/01	80	1400
5	nov/01	70	1470
6	dez/01	80	1550
7	jan/02	20	1570
8	fev/02	8	1578
9	mar/02	3	1581
10	abr/02	10	1591

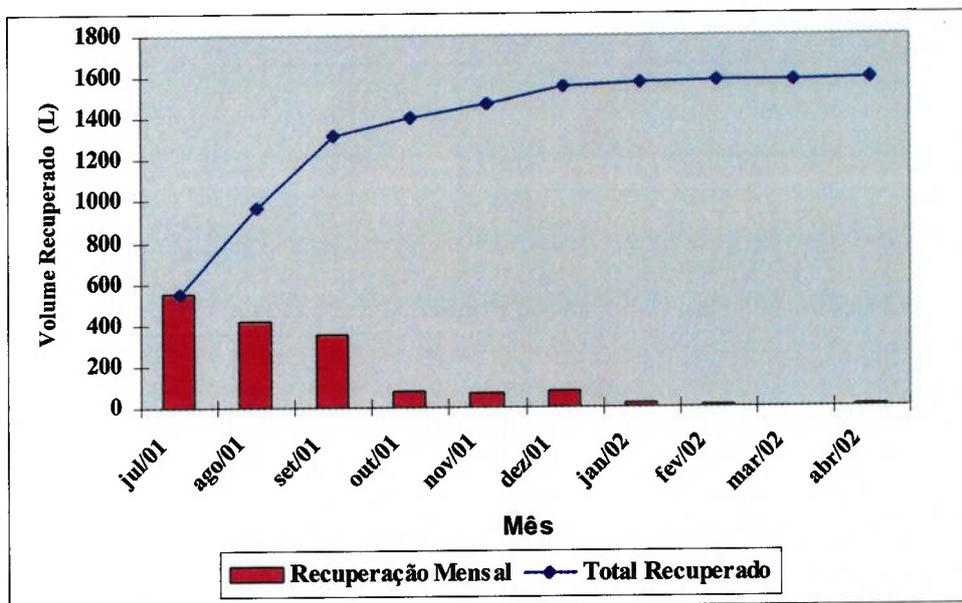


Figura 5.9. - Gráfico de Recuperação x Tempo

Para este sistema são previstos 3 poços de bombeamento de 4", com 12 m de comprimento cada. Tem-se, portanto, 36 metros de poços a serem instalados.

A sondagem a trado manual é conduzida por uma equipe constituída por 3 sondadores. Fez-se uma aproximação, considerando a exergia consumida por um ser humano como sendo igual à energia química contida nos alimentos por ele ingeridos e as seguintes hipóteses:

- a atividade de sondagem a trado manual consome a mesma exergia que correr devagar, ou seja, 0,628 kW segundo Çengel e Boler (1994);
- turno de trabalho de 8 horas diárias; e
- uma equipe tem um rendimento diário médio de 10 metros de sondagem e instalação de poços.

Desta forma, o consumo diário de exergia química por sondador para o exercício de sua atividade é de 18.087 kJ/d. Pode-se calcular a exergia específica por metro de sondagem pela equação:

$$b_{\text{poços}} = \frac{3 \cdot b_{\text{sondador}}}{\eta_{\text{sondagem}}} = 5.426 \text{ kJ / m} \quad (24)$$

Considerou-se ainda que a montagem do sistema levará 5 dias com três trabalhadores e que a operação e supervisão diária do sistema pode ser feita por um único funcionário, durante 50% de uma jornada de trabalho normal.

Já para a operação de sistemas de tratamento, considerou-se o mesmo consumo de exergia que andar, 0.503 kW (Çengel, 1994).

Utilizou-se dados de experiências anteriores com o emprego de carvão ativado para a adsorção de hidrocarbonetos de petróleo, presentes em baixa concentração na água, durante as quais chegou-se a uma capacidade média de 30% de adsorção em massa dos

contaminantes. Desta forma, pela **Equação (23)** calcula-se a o consumo de carvão ativado, o qual, ao longo de 10 meses de operação, corresponde a 2.232 kg.

O único equipamento elétrico deste sistema é um compressor de pistão, com potência de 5 hp, o qual consome $9,66 \times 10^4$ MJ ao longo do período de operação.

Uma vez que o bombeamento atua apenas na porção de contaminante presente na forma de fase livre, a qual representa 64% do total vazado, pode-se afirmar, que esta técnica apresentará uma exergia residual de 36% da presente na condição inicial. Portanto:

$$B_{\text{residual,bombeamento}} = 1,18 \times 10^5 \text{ MJ}$$

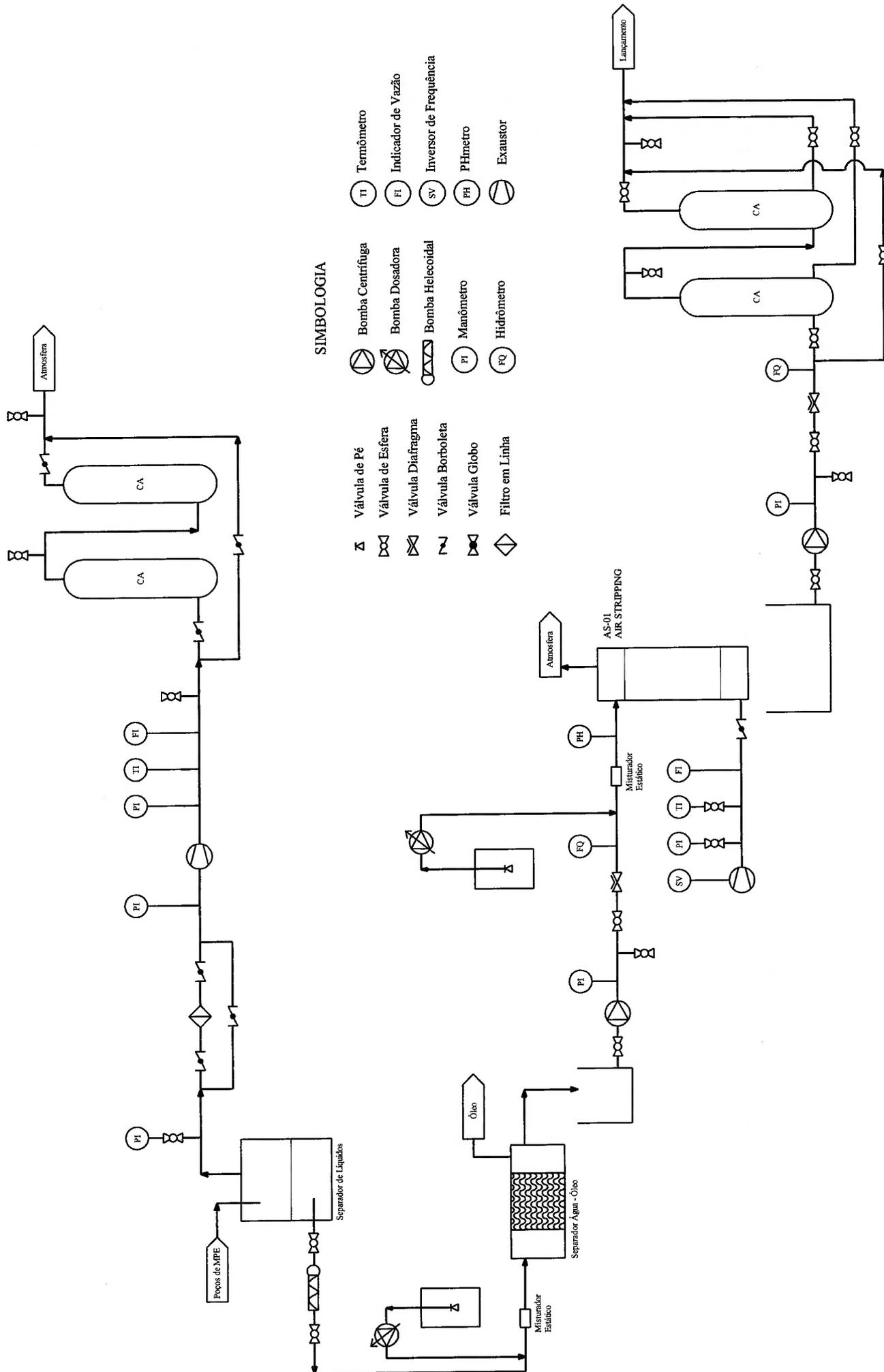
5.2.2.2. EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA

A Extração Multifásica, mais conhecida pela sua sigla em inglês, MPE⁴ compreende uma categoria genérica de tecnologias de remediação *in-situ*, que removem mais de uma fase de fluido através de poços ou trincheiras. Para tanto, são empregadas bombas de alto vácuo, para nível d'água em profundidades de até 7 metros, as quais succionam a fase livre sobrenadante ao lençol freático, a fase de água com contaminantes dissolvidos, bem como arrastam a fase vapor de combustível presente no solo. Desta maneira atua-se simultaneamente em três frentes distintas de remediação, compreendendo as zonas não saturada e saturada do solo e o lençol freático.

Para profundidades de nível d'água superiores a 7 metros, obtém-se o mesmo efeito agregando-se uma bomba submersa ao sistema, a qual tem por finalidade recalcar as fases livre e dissolvida. A **Figura 5.10.** apresenta um fluxograma do processo descrito e a **Figura 5.11.** uma foto do sistema instalado.

⁴ *Multi-Phase Extraction*

Figura 5.10. - Fluxograma do Processo de MPE



SIMBOLOGIA

- | | | | | | |
|--|-------------------|--|------------------|--|------------------------|
| | Válvula de Pé | | Bomba Centrífuga | | Termômetro |
| | Válvula de Esfera | | Bomba Dosadora | | Indicador de Vazão |
| | Válvula Diafragma | | Bomba Helicoidal | | Inversor de Frequência |
| | Válvula Borboleta | | Manômetro | | PHmetro |
| | Válvula Globo | | Hidrômetro | | Exaustor |
| | Filtro em Linha | | | | |

Considerou-se oito poços de extração, cada um deles dotado de um bomba pneumática submersa, alimentadas por dois compressores de 5 cv cada e submetidos a um vácuo de 100 mbar, proveniente de um soprador de 15 cv. Todo o conjunto permanece ligado ininterruptamente, durante todo o período de remediação, fornecendo uma vazão de aproximadamente 6 m³/h de água subterrânea e 350 Nm³/h de ar com vapores combustíveis extraídos do solo.

De maneira análoga aos exemplos anteriores, computou-se o consumo de carvão ativado pela **Equação (23)**, considerando-se a concentração média de 3,1 mg/kg na saída do separador de água e óleo. Tem-se, portanto, 1.071 kg de CA ao longo dos 18 meses de operação do sistema.

Para o cálculo do consumo de eletricidade, tem-se as cargas listadas na **Tabela 5.10**:



Figura 5.11. Foto do Sistema de Extração Multifásica Instalado

Tabela 5.10. - Cargas Elétricas – MPE

Equipamento	Qtd	Potência [W]
Compressor de Pistão	2	7.450,0
Compressor radial	1	11.175,0
Ventilador axial	1	248,3
Bomba centrífuga	1	745,0
Instrumentação	1	372,5
TOTAL		19.990,8

Considerando-se que o sistema opera 24h / dia durante 18 meses ininterruptos, tem-se um consumo total de $9,33 \times 10^5$ MJ de energia elétrica.

Uma vez que o MPE atua em todas as frentes do contante, atingindo limites de descontaminação satisfatórios para os níveis de risco à saúde humana e ao meio ambiente, considerou-se que a exergia do resíduo desta alternativa tem valor nulo.

5.2.2.3. REMOÇÃO DE SOLO E INCINERAÇÃO

A remoção de solo representa uma técnica pouco utilizada para remediação de áreas contaminadas, uma vez que o solo contaminado retirado precisa ser encaminhado para um destino final adequado para resíduos, o qual invariavelmente eleva significativamente o custo da remediação. Desta forma, salvo raras exceções, trata-se de uma solução pouco viável.

Por outro lado, esta metodologia está restrita apenas à solução do problema de contaminação do solo, permanecendo ainda a água subterrânea a ser tratada, caso esta esteja contaminada. Para o caso em questão, considerando-se a área de pluma de

contaminação de 1.681 m² e uma espessura média de solo contaminado (fase livre e parte da fase dissolvida) de 1,5 m, tem-se um volume total de 2.521,5 m³.

Para a avaliação do consumo de gás e energia elétrica necessários para incineração, considerou-se os dados apresentados na **Tabela 5.11.**, os quais foram fornecidos por uma empresa, que opera 24 h/dia um incinerador para 100 t /dia de resíduos sólido.

Tabela 5.11. - Tabela de consumo de utilidades de um incinerador:

Utilidades	Consumo/dia (100 t/24h)	Consumo por tonelada	Consumo Total
Energia Elétrica	540 MJ	5,4 MJ	16.339,3 MJ
Gás Natural	60 Nm ³ /h	60/4,17 = 14,39 Nm ³ /h	43.541,3 Nm ³ /h
Água Industrial*	10 m ³ /h	10/4,17 = 2,4 m ³ /h	7.261,9 2,4 m ³ /h

* não computada por ter sua exergia considerada como nula

A **Tabela 5.12.** apresenta as hipóteses consideradas para a avaliação do transporte necessário e das quantidades de solo movimentadas.

Tabela 5.12. – Transporte e movimentação de solo para a remoção

Utilidades	Quantidade	Hipóteses
Transporte de carro	400 km	• uma única viagem de um técnico até o local para supervisão do trabalho
Transporte de caminhão	3.025,8 t	• densidade média do solo contaminado 1,2 kg/L • distância de 200km entre o local da obra e o incinerador
Escavação com pá carregadeira	26.896 m ³	• área contaminada x profundidade da contaminação x 2

Uma vez que a remoção de solo elimina apenas o contaminante adsorvido nos grânulos deste, tem-se uma remoção de apenas 35% do volume total de contaminante. Portanto:

$$B_{\text{residual, bombeamento}} = 2,14 \times 10^5 \text{ MJ}$$

5.2.3. Cálculo da Exergia Acumulada

Utilizando-se a mesma técnica empregada nos casos anteriores, foi computada a exergia acumulada, segundo a metodologia proposta por Szargut (1988) para cada alternativa de remediação, sendo o resultado apresentado na **Tabela 5.13**. Para os recursos do grupo “utilidades”, necessários durante a operação dos sistemas, considerou-se horizontes distintos de tempo de operação das alternativas.

É importante ressaltar, que as distintas exergias totais requeridas estão relacionadas a diferentes volumes remediados, conforme cada técnica empregada. Com a finalidade de melhor avaliar a eficiência de cada alternativa, a **Tabela 5.14**. apresente um comparativo em base comum: volume descontaminado.

5.2.4. Avaliação dos Resultados

Pode-se observar que apesar de demandar um consumo acumulado de exergia maior, a tecnologia que emprega a extração multifásica (MPE) apresenta uma maior eficiência de remediação, uma vez que atua simultaneamente em três frentes de contaminação. Deve-se ressaltar que não foram computados os efeitos biocinéticos, os quais tem participação ativa na remediação de sítios por esta tecnologia.

Tabela 5.13. Consumo de exergia acumulado para os recursos e utilidades requeridos nos processos de tratamento

Recurso / Utilidade	CExC Específico	Bombeamento		Extração Multifásica		Remoção de Solo	
		Quantidade	CExA [MJ]	Quantidade	CExA [MJ]	Quantidade	CExA [MJ]
<i>Mão-de-Obra</i> sondagem e instalação poços montagem operador	1,68E+00 MJ / m 1,68E+01 MJ / dia 2,79E+00 MJ / dia	3,60E+01 m 5,00E+00 dia 3,65E+02 dia	6,03E+01 8,38E+01 1,02E+03	9,60E+01 m 1,00E+01 dia 5,40E+02 dia	1,61E+02 1,68E+02 1,51E+03	0,00E+00 m 0,00E+00 dia 0,00E+00 dia	0,00E+00 0,00E+00 0,00E+00
<i>Materiais Inorgânicos</i> aço aço zincado	4,59E+01 MJ / kg 5,86E+01 MJ / kg	2,85E+02 kg 1,80E+01 kg	1,31E+04 1,05E+03	1,02E+03 kg 4,80E+01 kg	4,67E+04 2,81E+03	0,00E+00 kg 0,00E+00 kg	0,00E+00 0,00E+00
<i>Materias Orgânicos</i> Polipropileno PVC pintura acrílica	8,52E+01 MJ / kg 6,70E+01 MJ / kg 8,23E+01 MJ / kg	1,26E+02 kg 4,60E+01 kg 5,00E+00 kg	1,07E+04 3,08E+03 4,12E+02	1,11E+02 kg 4,83E+02 kg 5,00E+00 kg	9,46E+03 3,24E+04 4,12E+02	0,00E+00 kg 0,00E+00 kg 0,00E+00 kg	0,00E+00 0,00E+00 0,00E+00
<i>Utilidades*</i> gás eletricidade transporte de carro transporte por caminhão (28 t) escavação com pá carregadeira carvão ativado reativação do carvão ativado	3,49E+01 MJ / Nm ³ 1,54E+00 MJ / MJ 4,33E+00 MJ / km 3,13E+00 MJ / t.km 8,22E+00 MJ / m ³ 2,47E+02 MJ / kg 1,23E+02 MJ / kg	0,00E+00 Nm ³ 9,66E+04 MJ 4,00E+03 km 5,00E+02 t.km 0,00E+00 m ³ 2,23E+03 kg 2,23E+03 kg	0,00E+00 1,49E+05 1,73E+04 1,57E+03 0,00E+00 5,51E+05 2,75E+05	0,00E+00 Nm ³ 2,42E+05 MJ 7,20E+03 km 4,00E+03 t.km 0,00E+00 m ³ 1,07E+03 kg 1,07E+03 kg	0,00E+00 3,72E+05 3,12E+04 1,25E+04 2,65E+05 1,32E+05	4,35E+04 Nm ³ 1,63E+04 MJ 4,00E+02 km 4,03E+05 t.km 2,69E+04 m ³ 0,00E+00 kg 0,00E+00 kg	1,52E+06 2,52E+04 1,73E+03 1,26E+06 2,21E+05 0,00E+00 0,00E+00
Subtotal - Construção do sistema			2,85E+04		9,21E+04		0,00E+00
Subtotal - Operação do sistema			9,94E+05		8,14E+05		3,03E+06
TOTAL GERAL			1,02E+06		9,06E+05		3,03E+06

* Considerada a operação por

7200 horas ou 10 meses de operação para o bombeamento

12960 horas ou 18 meses de operação para o MPE

24 hs para a incineração dos resíduos

Tabela 5.14. - Comparação da eficiência de remediação de cada alternativa

Técnica	Meio / Fase	Volume Descontaminado [m ³]	% do total	CExC Tabela 5.13. [MJ]	Eficiência Remediação [MJ / m ³]
Bombeamento	solo (fase livre e residual)	673	1	1,02E+06	1520
MPE	solo (fase livre e residual) e água (fase dissolvida)	67.320	100	9,06E+05	13
Remoção / Incineração Solo	Solo / Fase Livre / Residual (parcial)	2.522	4	3,03E+06	1202

O bombeamento, embora bastante empregado no início da remediação para remoção de fase livre, apresenta um rendimento muito baixo se aplicado também para a fase residual, quando comparado a outras tecnologias. Não foi computada aqui a exergia acumulada nas colunas de carvão ativado, uma vez que estas tiveram um papel secundário para o sistema, não apresentando saturação ao longo de todo o período de operação.

Em ambos os casos, nota-se que a parcela mais significativa de exergia consumida é a relativa à operação do sistema, em particular, ao consumo de energia elétrica, o qual corresponde, respectivamente, a 24% e 56% da exergia utilizada ao longo da operação dos sistemas de bombeamento e extração multifásica.

A baixa eficiência térmica da alternativa de remoção e incineração do solo, ratifica o seu raro emprego prático. Esta alternativa faz uso praticamente exclusivo do gás natural, para promover a destruição térmica dos resíduos, sendo este insumo responsável pelo maior consumo exergético (50%).

A **Tabela 5.15.** apresenta o rendimento exergético η_d das alternativas avaliadas. Uma vez que para este estudo de caso, novamente a meta principal foi a destruição da exergia do contaminante, utilizou-se este rendimento.

Tabela 5.15. - Índice e o rendimento exergético das alternativas avaliadas

Parâmetro	Unidade	Alternativas		
		Bombeamento	Extracção Multifásica	Remoção de Solo
Bcontaminante	MJ	3,29E+05	3,29E+05	3,29E+05
Brejeito	MJ	1,18E+05	0,00E+00	2,14E+05
Bproduto	MJ	0	0	0
Binsumos	MJ	1,02E+06	9,06E+05	3,03E+06
η_d	%	21	36	4

O rendimento η_d calculado confirma o escalonamento observado atualmente na seleção de alternativas, o qual tem o MPE como a opção tecnológica mais sofisticada e eficiente, do ponto de vista de níveis de descontaminação e a remoção de solo como a alternativa menos usual, dado o seu resultado parcial na solução do problema e o elevado custo que representa.

Considerando-se por fim, que o MPE é a única técnica que faz uso da biorremediação, pode-se concluir que, a grande diferença no tocante à eficiência exergética de remediação, face às demais técnicas que utilizam exclusivamente processo físicos, é a contribuição da atividade microbiana.

5.3. DESTINO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A geração de resíduos sólidos urbanos (lixo) encontra-se atualmente entre os graves problemas ambientais a serem enfrentados pelas autoridades municipais. Devido às características físicas, químicas e biológicas do lixo, a disposição inadequada pode provocar a contaminação do solo e água (superficial e subterrânea), gerar odores, atrair e provocar a proliferação de agentes patogênicos. Trata-se, portanto, de um problema que envolve aspectos sanitários, ambientais e de saúde pública.

O Estado de São Paulo possui 645 municípios e gerava, em 1998, 18.232 toneladas diárias de lixo domiciliar. Do total destes municípios, apenas 27 dispõem seu lixo de forma adequada, 116 possuem sistemas controlados e 502 (77,8%) depositam seus resíduos sólidos em sistemas considerados inadequados. A **Tabela 5.16.** apresenta uma composição média do lixo domiciliar brasileiro (IPT, 1995).

Tabela 5.16. – Composição Percentual Média do Lixo Domiciliar no Brasil (1999)

Papel / Papelão	24,5
Plásticos	2,9
Material Orgânico	52,5
Metal	2,3
Vidro	1,6
Outros	16,2
Fonte: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (2000)	

Uma alternativa ambientalmente correta para o destino final para resíduos sólidos municipais é a disposição em aterros sanitários, a qual tem sido adotada por diversos municípios brasileiros. Entretanto, dada a extensa ocupação de solo que tal opção resulta, tem-se buscado outras alternativas para solucionar a questão do destino destes resíduos, tais como reciclagem e incineração as quais serão também avaliadas no presente trabalho.

5.3.1. Descrição do Problema

A **Tabela 5.17.** apresenta as características de aproveitamento de cada componente do lixo urbano:

Tabela 5.17. – Potencial de Aproveitamento dos Componentes do Lixo Urbano

Componente	Putrescível	Reciclável	Combustível
Borracha		X	X
Couro	X		X
Madeira	X	X	X
Matéria orgânica	X	X	
Metais ferrosos		X	
Metais não-ferrosos		X	
Papel	X	X	X
Papelão	X	X	X
Polipropileno		X	X
Polietileno		X	X
PVC			
Trapos		X	X
Vidro		X	

Fonte: IPT, 1995

Para a finalidade deste estudo, considerou-se apenas a avaliação específica pela massa dos seguintes componentes: papel, papelão, polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC). Desta maneira, a exergia química, bem como o consumo de exergia acumulado dos elementos analisados é apresentados na **Tabela 5.18.** (Szargut e De Wulf).

Tabela 5.18. – Conteúdo exergético dos materiais avaliados

Produto	Exergia da matéria-prima [MJ/kg]	CExA [MJ/kg]
Papelão	19,50	70,84
Papel	16,50	69,16
PE	46,50	86,00
PP	46,40	85,20
PVC	19,70	67,00

5.3.2. Descrição das Alternativas de Tratamento

5.3.2.1. ATERRO

A solução mais antiga e ainda ambientalmente aceita no Brasil como destinação final para resíduos sólidos urbanos, consiste na sua disposição em aterros sanitários, devidamente projetados e concebidos visando minimizar os possíveis impactos ambientais e à saúde pública.

A **Figura 5.12.** apresenta um desenho esquemático de um aterro sanitário moderno. Nele tem-se, no sentido vertical a partir da base, uma camada impermeabilizante, a qual pode ser confeccionada por solo argiloso compactado, com o auxílio de mantas geosintéticas específicas. Esta camada tem por finalidade proteger o solo e o aquífero freático de contaminações advindas da percolação do chorume gerado pelo lixo disposto no aterro. Sobre esta camada é construído então um dreno de base, que tem a finalidade de encaminhar os líquidos percolados a um tratamento adequado, removendo-os da massa de resíduos dispostos e contribuindo para manutenção de propriedades geotécnicas do maciço adequadas.

O lixo é então disposto sobre a camada drenante de base e camadas drenantes intermediárias, sendo as áreas destas sucessivamente reduzidas, de maneira a garantir-se a confecção de taludes estáveis, mesmo após o acentamento e a compactação das camadas de lixo dispostas. De maneira análoga, entre camadas de dreno de percolado, são instalados drenos para gás, o qual é gerado pela decomposição anaeróbia da fração orgânica do lixo. Esta drenagem é passiva, sendo o gás do aterro, constituído basicamente por metano e gás carbônico. O gás é conduzido, por diferença de densidade, para a porção superior do aterro, onde sua combustão é promovida, de maneira a evitar-se o despejo de um gás altamente problemático para o efeito estufa (o metano) e reduzir o risco de explosão durante a operação.

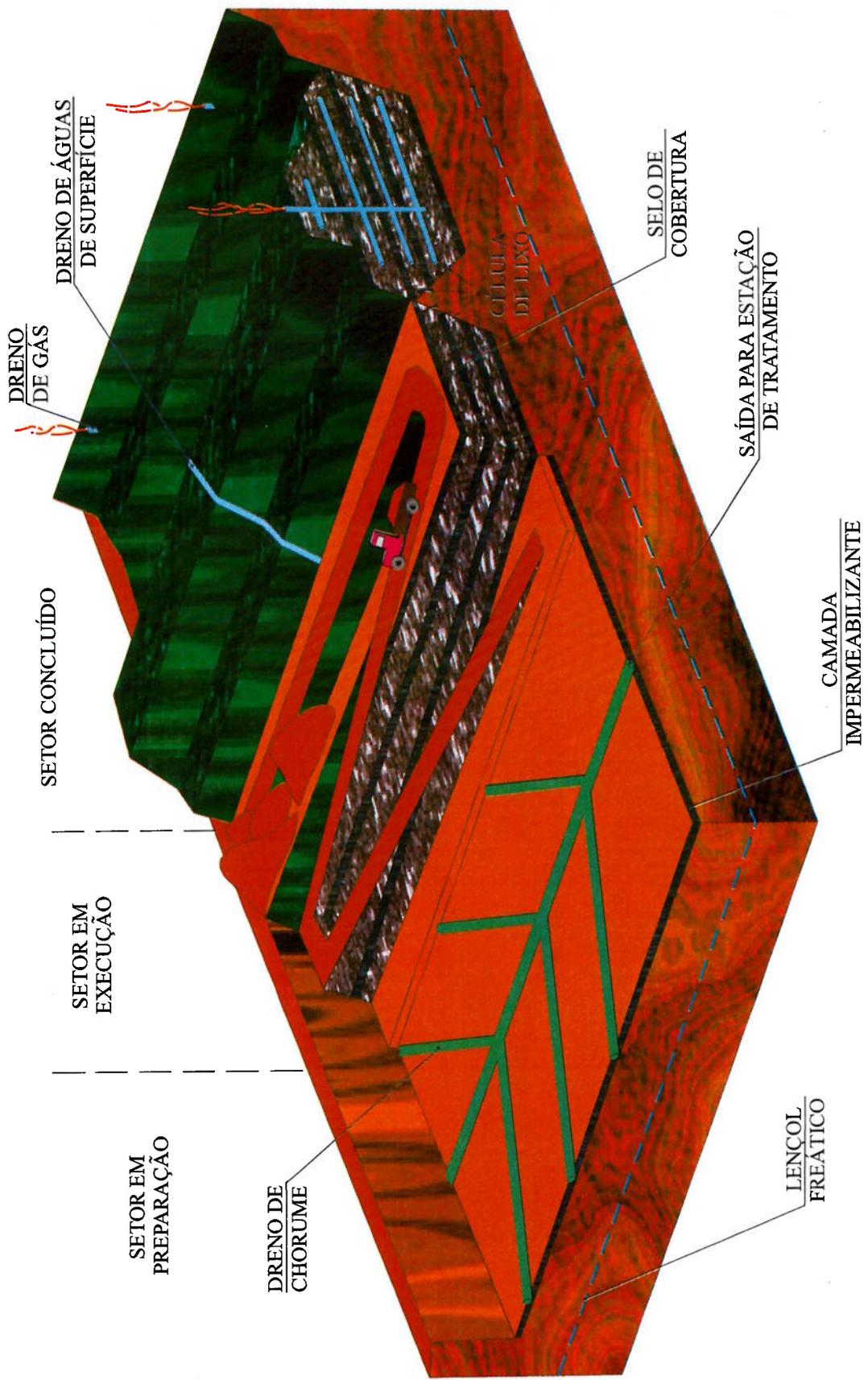


Figura 5.12. - Corte Esquemático de um aterro sanitário moderno

A drenagem dos gases tem também por finalidade melhorar as propriedades geomecânicas do maciço, contribuindo para sua estabilidade.

Finalmente, após atingida a cota superior de projeto, o aterro é coberto por uma camada impermeabilizante, a qual pode novamente ser constituída por argila compactada, ou por material geossintético, sendo, sobre esta camada, dispostos drenos para as águas pluviais, as quais devem ser completamente segregadas dos líquidos percolados e desviadas do maciço de resíduos.

Para o cálculo do consumo exergético acumulado para a disposição em aterro, considerou-se os valores específicos por m³ ocupado do aterro e a densidade média de 0,8 t/m³. Após a obtenção deste valor específico médio, foi procedido o cálculo de CExA para cada um dos produtos de estudo, considerando-se as respectivas densidades e taxa de compactação.

Para elaboração deste estudo de caso, considerou-se um período de operação de 10 anos e que o aterro demande 10 funcionários, sendo a exergia diária consumida por cada um deles 5.586 kJ/d, conforme considerações apresentadas no estudo de caso 5.1.

Foi prevista a utilização de concreto para ancoragem de mantas, tubos pré-moldados para a drenagem passiva de gás, base de equipamentos da estação de tratamento de percolados e do sistema de aproveitamento de biogás. A **Tabela 5.19.** apresenta a potência elétrica dos equipamentos em operação no aterro.

Tem-se, portanto, a seguinte energia total consumida ao longo de 10 anos de operação de $1,99 \times 10^7$ MJ.

Tabela 5.19. - Lista de Cargas Elétricas do Aterro

#	Item	Potência [kW]
	ETE	
1	Aerador chorume	14,92
2	Bomba centrífuga	3,73
3	Compressores	29,84
4	Bomba de fuso	5,60
5	Bombas dosadoras	0,75
	Aproveitamento Biogás	
6	Compressor radial	7,46
7	Instrumentação	0,75
TOTAL		63,04

Com relação ao transporte, foram feitas as hipóteses apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 5.20. Lista de Transportes Utilizados

Meio de Transporte	Atividade	Massa transportada [t]	Distância [km]	Trabalho realizado [t.km]
Caminhão	Transporte de lixo	100 t/d	1	365.000
Caminhão	Transporte de solo para terraplenagem inicial	30.000	0,5	15.000
Caminhão	Transporte de solo para cobertura intermediária	20.000	1	20.000
Caminhão	Transporte de solo para cobertura final	10.000	2	20.000
Carro	Circulação interna do aterro	-	10km/d	-
TOTAL				420.000

O trabalho total calculado de 420.000 t.km será utilizado para o cálculo da exergia acumulada no processo de disposição em aterro, empregando-se, conforme a

metodologia adotada, os valores de CExA específicos apresentados na **Tabela 4.1.** De maneira análoga procedeu-se à avaliação da movimentação de solo, sendo consideradas as quantias listadas na **Tabela 5.21.**

Tabela 5.21. - Relação das Quantidades de Solo Movimentadas

Máquina	Atividade	Quantidade [m3]	Justificativa
Pá carregadeira	transporte de lixo	365.000	100 ton /d * 365 d/a * 10 a
Pá carregadeira	extração de solo para terraplenagem e cobertura	60.000	
Trator de compactação	compactação do lixo a ser depositado	365.000	100 ton /d * 365 d/a * 10 a
Trator de compactação	compactação do solo da base	100.000	
Trator de compactação	compactação do solo da cobertura	30.000	
Total Pá carregadeira		425.000	
Total Trator de compactação		495.000	

Para aproveitamento energia química do biogás, proveniente da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos, foi considerada a instalação de um sistema de co-geração de energia elétrica e calor. Rettenberger (1987) propôs a seguinte formulação para o prognóstico da geração de biogás:

$$G(t) = A \cdot C_{org} \cdot (B \cdot T + C) \cdot (1 - 10^{-k \cdot t}) \quad (25)$$

onde:

G(t) = geração específica de gás até o tempo t, contada a partir da data de disposição do resíduo, m³/t;

A = constante igual a 1,868 m³/t de carbono;

C_{org} = concentração de carbono do lixo = 200 kg / t

B = constante igual a 0,014 K⁻¹;

C = constante adimensional igual a 0,28;

k = constante cinética igual a 0,045 ano⁻¹;

T = temperatura, K; e

t = tempo, anos.

Foram consideradas as seguintes hipóteses:

- A concentração de metano no biogás permanece estável em 60% durante o período de disposição de resíduos, decaindo progressivamente 1% ao ano, a partir do término da disposição;
- Rendimento térmico para conversão da energia química do gás em energia elétrica: 34% (dado do fabricante);
- Potência de refrigeração do motor: 34% da potência primária. Trocador de calor para água de refrigeração operando entre 70°C e 90°C (dado do fabricante);
- Potência dos gases de escape a 400°C: 16% da potência primária (dado do fabricante);
- Para o sistema ser economicamente viável, considerou-se uma potência instalada mínima de 500 kW_{el}. Para esta condição, o sistema de co-geração estaria operando entre o 2º e o 22º ano de vida do aterro, totalizando 21 anos (2003 a 2023) conforme ilustrado na **Figura 5.13.**; e
- Considerou-se a instalação incremental de dois módulos de 500 kW_{el} cada, até uma potência máxima instalada de 1,5 MW_{el}, a qual estaria operando entre o 8º e o 13º ano de vida do aterro.

A **Tabela 5.22.** apresentada os resultados do prognóstico da geração de biogás nas condições descritas e a **Figura 5.13.** apresenta um gráfico deste prognóstico ao longo do tempo.

Tem-se, portanto, para o período avaliado (2003 a 2023) uma potência elétrica média fornecida pelo sistema de 1.096 kW_{el}.

Deve-se salientar, que os valores apresentados são apenas para as substâncias orgânicas de rápida decomposição, papel e papelão. Segundo Tchobanoglous (1993), plásticos (PE, PP e PVC) possuem uma degradação lenta, sendo a sua produção de biogás irrelevante.

Com relação à exergia térmica, considerou-se apenas os gases de escape, que estão a 400°C e correspondem a 16% da potência primária. Tem-se, portanto, para a temperatura ambiente de 27 °C:

$$\mathbf{b}^{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) = 135,69 \text{ kJ / kg} \quad (26)$$

Considerando-se a vazão mássica dos gases de escape de 2.888 kg/h, fornecida pelo fabricante do motor (MWM – Deutz) tem-se:

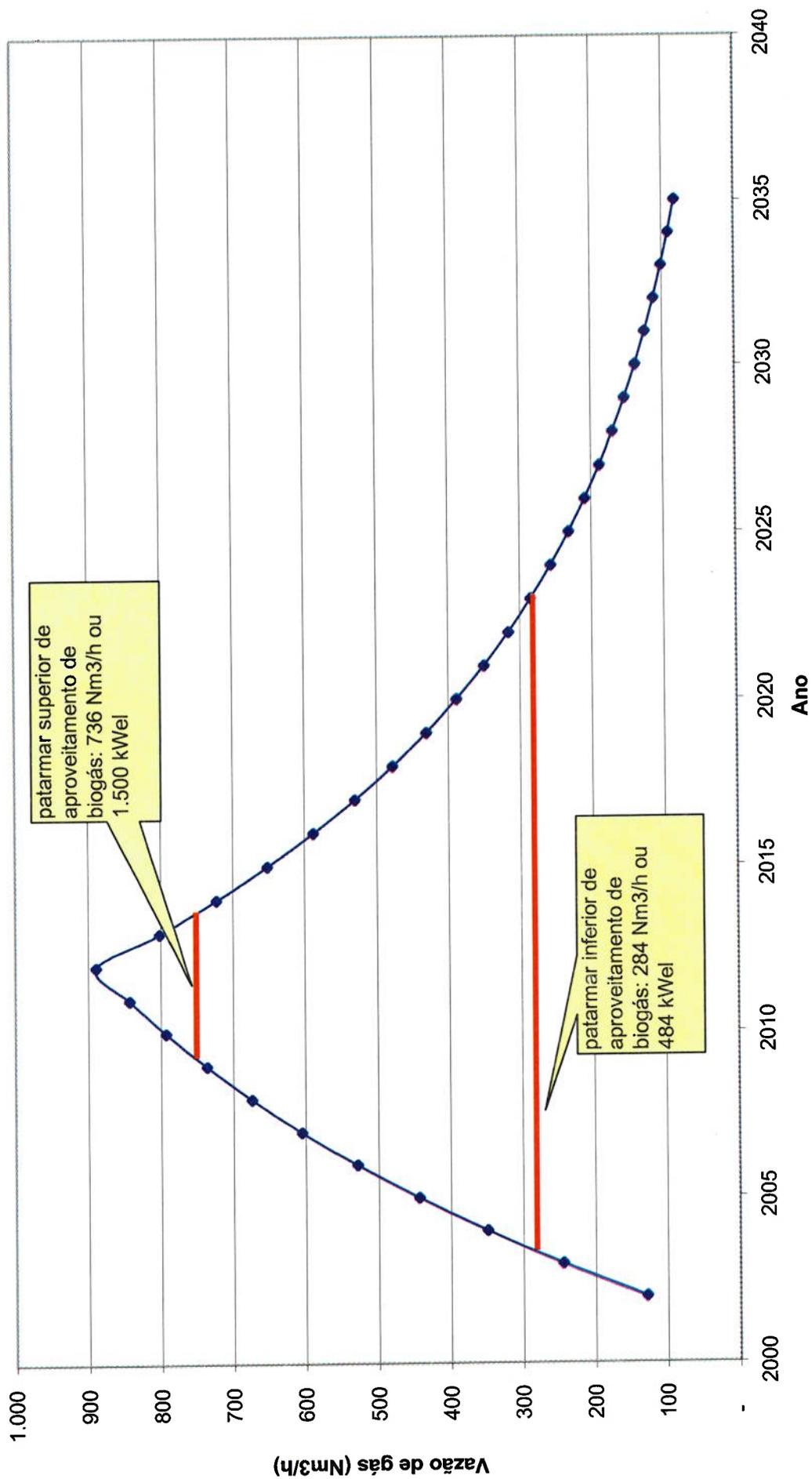
$$\dot{\mathbf{B}}^{ph} = 108,86 \text{ kW}$$

Tabela. 5.22. Prognóstico de Geração de Biogás

ANO	IDADE	GERAÇÃO DE GÁS ESPECÍFICA ACUMULADA (m3/t)	GERAÇÃO DE GÁS ANUAL (m3)	QUANTIDADE DE LIXO DEPOSTA NO ANO (t)	GERAÇÃO DE GÁS ANUAL (m3)	QUANTIDADE DE LIXO ACUMULADA (t)	GERAÇÃO DE GÁS ESPECÍFICA PONDERADA (m3/t)	Teor de CH4	Poder calorífico (kWh/Nm3)	Vazão de gás (Nm3/h)	Potência primária (kW)	Potência elétrica (kW)	Potência de refrigeração (kW)	Potência Água de escape (kW)
2002	1	31	1.127,461	36.500	1.127,461	36.500	30,9	60%	6	129	772	263	263	124
2003	2	59	2.143,947	36.500	2.143,947	73.000	29,4	60%	6	245	1.468	499	499	235
2004	3	84	3.060,382	36.500	3.060,382	109.500	27,9	60%	6	349	2.096	713	713	335
2005	4	106	3.886,613	36.500	3.886,613	146.000	26,6	60%	6	444	2.662	905	905	426
2006	5	127	4.631,519	36.500	4.631,519	182.500	25,4	60%	6	529	3.172	1.079	1.079	508
2007	6	145	5.303,104	36.500	5.303,104	219.000	24,2	60%	6	605	3.632	1.235	1.235	581
2008	7	162	5.908,587	36.500	5.908,587	255.500	23,1	60%	6	674	4.047	1.376	1.376	648
2009	8	177	6.454,472	36.500	6.454,472	292.000	22,1	60%	6	737	4.421	1.503	1.503	707
2010	9	190	6.946,627	36.500	6.946,627	328.500	21,1	60%	6	793	4.758	1.618	1.618	761
2011	10	202	7.390,339	36.500	7.390,339	365.000	20,2	60%	6	844	5.062	1.721	1.721	810
2012	11	213	7.790,377	36.500	7.790,377	401.500	19,4	60%	6	889	5.336	1.814	1.814	854
2013	12	223	7.023,579	0	7.023,579	401.500	17,5	60%	6	802	4.811	1.636	1.636	770
2014	13	232	6.332,256	0	6.332,256	401.500	15,8	59%	5,9	723	4.265	1.450	1.450	682
2015	14	240	5.708,980	0	5.708,980	401.500	14,2	58%	5,8	652	3.780	1.285	1.285	605
2016	15	247	5.147,051	0	5.147,051	401.500	12,8	57%	5,7	588	3.349	1.139	1.139	536
2017	16	254	4.640,433	0	4.640,433	401.500	11,6	56%	5,6	530	2.966	1.009	1.009	475
2018	17	260	4.183,680	0	4.183,680	401.500	10,4	55%	5,5	478	2.627	893	893	420
2019	18	265	3.771,885	0	3.771,885	401.500	9,4	54%	5,4	431	2.325	791	791	372
2020	19	270	3.400,623	0	3.400,623	401.500	8,5	53%	5,3	388	2.057	700	700	329
2021	20	274	3.065,904	0	3.065,904	401.500	7,6	52%	5,2	350	1.820	619	619	291
2022	21	278	2.764,130	0	2.764,130	401.500	6,9	51%	5,1	316	1.609	547	547	257
2023	22	282	2.492,060	0	2.492,060	401.500	6,2	50%	5	284	1.422	484	484	228
2024	23	285	2.246,769	0	2.246,769	401.500	5,6	49%	4,9	256	1.257	427	427	201
2025	24	288	2.025,622	0	2.025,622	401.500	5,0	48%	4,8	231	1.110	377	377	178
2026	25	290	1.826,243	0	1.826,243	401.500	4,5	47%	4,7	208	980	333	333	157
2027	26	293	1.646,488	0	1.646,488	401.500	4,1	46%	4,6	188	865	294	294	138
2028	27	295	1.484,426	0	1.484,426	401.500	3,7	45%	4,5	169	763	259	259	122
2029	28	297	1.338,315	0	1.338,315	401.500	3,3	44%	4,4	153	672	229	229	108
2030	29	298	1.206,587	0	1.206,587	401.500	3,0	43%	4,3	138	592	201	201	95
2031	30	300	1.087,824	0	1.087,824	401.500	2,7	42%	4,2	124	522	177	177	83
2032	31	301	980,750	0	980,750	401.500	2,4	41%	4,1	112	459	156	156	73
2033	32	302	884,216	0	884,216	401.500	2,2	40%	4	101	404	137	137	65
2034	33	304	797,184	0	797,184	401.500	2,0	39%	3,9	91	355	121	121	57
2035	34	305	718,718	0	718,718	401.500	1,8	38%	3,8	82	312	106	106	50

Período de Aproveitamento do Biogás

Figura 5.13. - Curva teórica de geração de biogás ao longo do tempo



Para fins de cálculo da exergia do produto, considerou-se apenas as componentes térmica e elétrica provenientes do sistema de cogeração, desprezando-se a componente química presente nos gases de escape. Desta maneira, para papel e papelão, tem-se:

$$\dot{\mathbf{B}}_{\text{produto}} = \mathbf{B}^{\text{elétrico}} + \mathbf{B}^{\text{ph}} = 1204,73 \text{ kW} \quad (27)$$

Para o aporte de 100 t/d de resíduo considerado tem-se uma exergia do produto convertido ($\dot{\mathbf{B}}_{\text{produto}}$) de 1,041 MJ / kg.

Para os demais materiais, PP, PE e PVC, a ExPC foi considerada nula, uma vez a que a contribuição dos mesmos para a geração de biogás é irrelevante.

5.3.2.2. RECICLAGEM

A reciclagem é uma atividade econômica que faz parte de um conjunto de ações integradas que visam um melhor gerenciamento do lixo. Essas ações são o resultado de uma série de atividades, pelas quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, coletados, separados e processados para serem utilizados como matéria-prima na manufatura de novos produtos.

A Reciclagem pode trazer inúmeros benefícios, entre eles:

- Diminuição da quantidade de lixo a ser aterrada;
- Preservação de recursos naturais;
- Economia de energia;
- Diminuição de impactos ambientais;
- Novos negócios;
- Geração de empregos diretos e indiretos.

Deve-se enfatizar que a possibilidade de reciclar materiais só existe se houver demanda significativa pelos produtos gerados pelo processamento destes. Assim, antes da implantação da segregação de materiais, visando a sua reciclagem, é importante checar se existem esquemas para haver o escoamento desses materiais (venda ou doação). Somente uma análise do mercado de recicláveis, principalmente o da região, ditará quais os produtos do lixo que poderão ser aproveitados industrialmente.

Cabe destacar a existência de uma sazonalidade de preços para a venda de materiais reciclados e que esta não é igual para todos os tipos de material. Por isso, é aconselhável o planejamento dos estoques de materiais e a verificação de um local para o seu armazenamento, uma vez que a flutuação no mercado comprador prejudica o fluxo de saída dos mesmos. Além disso, é necessário avaliar qualitativamente e quantitativamente o perfil dos resíduos sólidos gerados em diferentes pontos do município. Essa caracterização permitirá estruturar melhor o projeto de coleta, pois muitos municípios apresentam perfis bem distintos ao longo de seus domínios.

Em relação ao processo de separação dos materiais a serem reciclados, há, basicamente, dois meios a seguir:

- Coleta seletiva: onde a separação dos materiais é efetuada na fonte do gerador (população), com posterior coleta dos materiais separados;
- Usinas de triagem: é a divisão dos materiais em usinas de triagem, após a coleta normal e transporte do lixo.

TRIAGEM

As Usinas de Triagem são usadas para a separação dos materiais recicláveis do lixo proveniente da coleta e transporte usual. Conjuntamente com a Usina de Triagem, é comum existir a compostagem da fração orgânica do lixo, uma vez que esta última requer uma separação prévia. A instalação de uma Usina de Triagem, sem a compostagem da fração orgânica do lixo, pode vir a ser um processo oneroso e sem grande retorno do ponto de vista ambiental.

As Usinas de Triagem oferecem uma maneira de reduzir sensivelmente a quantidade de resíduos enviados ao aterro, atingindo taxas de 50%, quando bem gerenciadas. Assim como no caso da coleta seletiva, deve haver um mercado para os materiais separados, tanto orgânicos quanto inorgânico.

As principais vantagens de uma Usina de Triagem são:

- Não requerer alteração do sistema convencional de coleta, apenas a mudança no destino do caminhão que passa a parar em uma Usina de Triagem, ao invés de seguir direto para o aterro;
- Possibilita o aproveitamento da fração orgânica do lixo, pela sua compostagem;

Já os pontos negativos de uma Usina de Triagem são:

- Investimento inicial em equipamentos que vão constituir a Usina (existem vários tipos de equipamentos de separação, e ainda há debates sobre as melhores técnicas de operação);
- Necessidade de técnicos capacitados para operar a usina (investimento em treinamento);

- A qualidade dos materiais separados da “fração orgânica” e potencialmente recicláveis não é tão boa quanto da coleta seletiva, devido à contaminação por outros componentes do lixo. Por exemplo, no caso do papel, a contaminação, na maioria das vezes, impede a sua reciclagem.

Para este estudo de caso, considerou-se uma unidade com as seguintes características:

- Capacidade para processar 100 t/d de resíduo sólido;
- Elementos constituintes: esteira para transporte do lixo, na qual seria feita uma triagem manual dos resíduos passíveis de reciclagem;
- Mão-de-obra utilizada: 40 funcionários
- Período de operação: 12 h/dia durante 10 anos;
- Localização a 500 m de um aterro;
- Energia elétrica consumida durante a operação: $2,43 \times 10^6$ MJ , para as cargas elétricas apresentadas na **Tabela 5.23**.

Tabela 5.23. - Lista de Cargas Elétricas da Unidade de Triagem

#	Item	Potência [kW]
1	Correias transportadoras	14,92
2	Prensa (sistema hidráulico)	7,46
3	Exaustor	0,75
TOTAL		23,5

De maneira análoga a apresentada no estudo de caso 5.2., calculou-se a exergia consumida para a triagem de resíduos, considerando-se que esta demanda o mesmo esforço físico adotado para a sondagem. Desta maneira, tem-se para esta atividade $b_{\text{triagem}} = 0,629$ kW.

Foi considerado que o lixo é descarregado diretamente no silo de alimentação da correia de triagem. Entretanto, é necessário o transporte do material separado pela triagem até a usina de reciclagem, a qual foi considerada a 50 km de distância.

RECICLAGEM DE PLÁSTICO

Os plásticos estão presentes nas embalagens de refrigerante, de material de limpeza, de margarina, canos, tubos, sacos plásticos e etc. Seu tempo de decomposição é de aproximadamente 470 anos. Uma tonelada de plástico reciclada, economiza 130 quilos de petróleo, que pode se tornar mangueiras, cordas, sacos, pára-choques, etc. A embalagem do refrigerante, que também é conhecida por PET, pode virar, por exemplo, uma vassoura ou tecido para manufatura de uma calça jeans. No Brasil, o consumo de plástico chega a 10 quilos por pessoa durante um ano. Porém, apenas 15% de todo plástico produzido está sendo reciclado.

A reciclagem de plásticos, tipo PE, PP e PVC, é feita normalmente seguindo-se a seqüência apresentada na **Figura 5.14**.

Seleção: operação de separação de materiais, normalmente feita de maneira manual. Os diferentes produtos poderão ser estudados através das nomenclaturas fornecidas pela Associação Brasileira das Indústrias Químicas – ABIQUIM. As máquinas, opcionalmente utilizadas, são: moega receptora e esteira selecionadora.

Lavagem, Trituração e Secagem: processos compostos por um tanque de lavagem, um triturador e um secador centrifugo. Nesta etapa o material é lavado, triturado e seco.

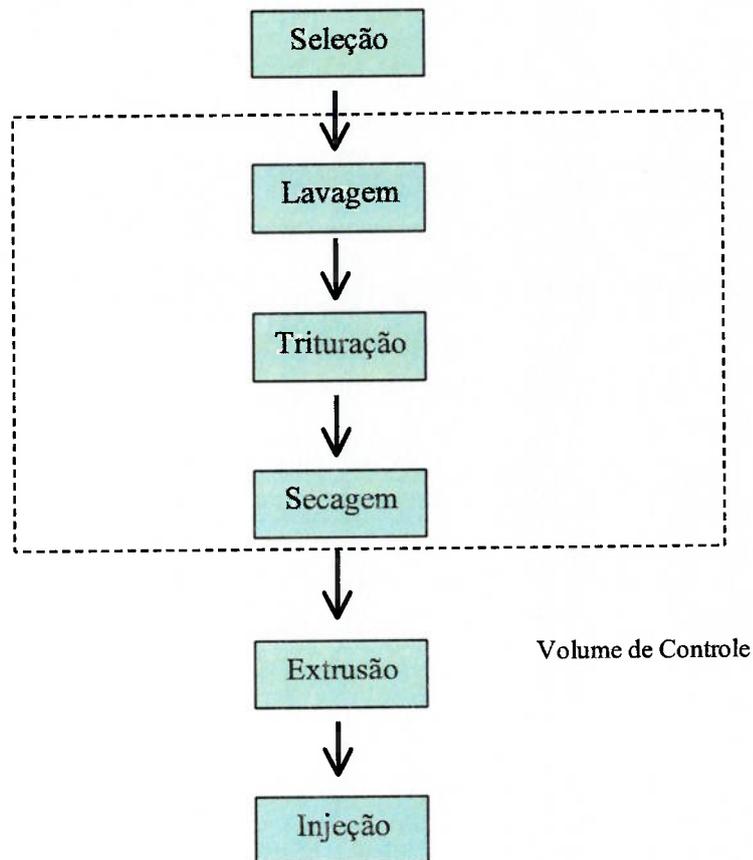


Figura 5.14. - Fluxograma de Processo para Reciclagem de Plástico

Extrusão: Após os materiais estarem devidamente secos, serão colocados numa máquina extrusora, onde serão feitos os fios de plásticos e em seguida peletizados (granulados).

Injeção: Após peletizados, os materiais são encaminhados para alimentação de uma injetora, que é uma máquina que serve para fazer um produto final do material reciclado.

Já a reciclagem de filmes plásticos é feita de forma idêntica, obedecendo ao mesmo sistema acima citado, somente com a diferença de que, após lavados, triturados e secos,

os mesmos serão aglutinados (em um aglutinador) para serem utilizados diretamente nas extrusoras ou injetoras.

Para o cálculo da exergia acumulada no processo de reciclagem de plásticos, considerou-se as seguintes hipóteses:

- O material para processamento já foi selecionado durante a etapa de triagem;
- O produto da reciclagem são os *pelets*, os quais deverão ser encaminhados para extrusão e injeção conforme a aplicação desejada;
- O processo requer 4 operadores;
- O consumo de água no processo de lavagem é de 1 m³/h;
- O consumo de gás no processo de secagem é de 30 m³/t de resíduo seco;
- Cargas elétricas apresentadas na **Tabela 5.24.**

Tabela 5.24. - Lista de Cargas Elétricas da Unidade de Reciclagem de Plásticos

#	Item	Potência [kW]
1	lavador	7,46
2	tritador	14,92
3	secador	1,49
4	correia transportadora	1,49
TOTAL		25,36

RECICLAGEM DE PAPEL / PAPELÃO

Produzido a partir das fibras celulósicas da madeira, o papel demora 3 meses para se decompor. É um material 100% reciclável e a cada 50 quilos de papel destinado para a reciclagem, deixa-se de sacrificar uma árvore, gastando a metade da água e energia necessária se fosse produzir a mesma quantidade de papel.

Normalmente os papéis coletados são selecionados, compactados e direcionados às fábricas de papéis, que utilizam os materiais na fabricação de papéis novos.

O Brasil reciclou, no ano de 1998, 35% do papel existente (produção mais importação menos exportação). Considerando que nem todos os papéis existentes são recicláveis e que parte não está disponível para reciclagem (como os utilizados em livros e documentos), este percentual é razoavelmente bom e tem aumentado significativamente.

A **Figura 5.15.** apresenta um fluxograma conceitual do processo de reciclagem de papel.

Para o cálculo da exergia acumulada no processo de reciclagem de plásticos, considerou-se as seguintes hipóteses:

- O material para processamento já foi selecionado durante a etapa de triagem;
- O processo requer 6 operadores;
- O consumo de água no processo de limpeza é de 2 m³/h;
- O consumo de gás no processo de secagem é de 100 m³/t de papel seco;
- Cargas elétricas apresentadas na **Tabela 5.25.**

Tabela 5.25. - Lista de Cargas Elétricas da Unidade de Reciclagem de Plásticos

#	Item	Potência [kW]
1	cortador	2,98
2	lavador	5,60
3	misturador / refino	7,46
4	calandra	11,19
5	enroladeira	7,46
TOTAL		34,69

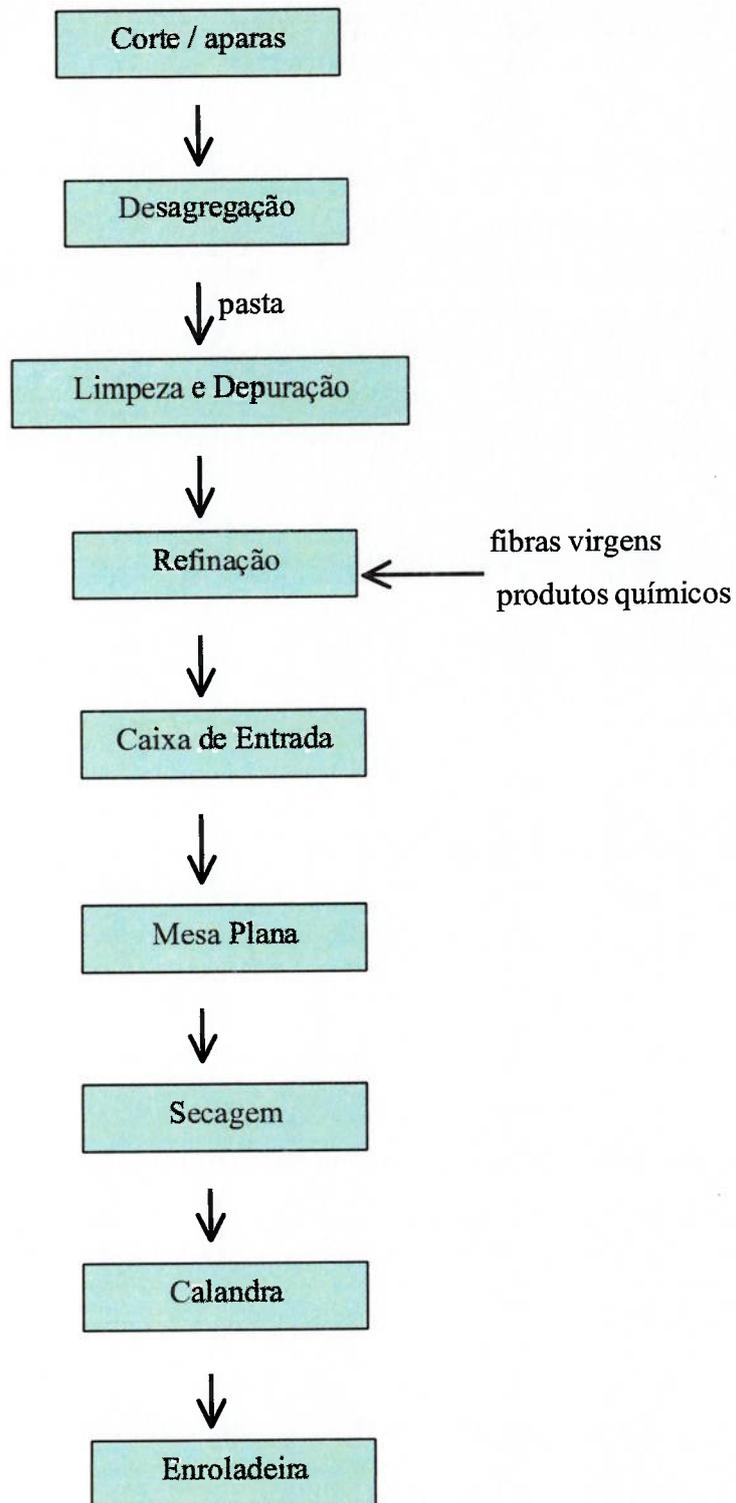


Figura 5.15. - Fluxograma de Processo para Reciclagem de Papéis

5.2.2.3. INCINERAÇÃO

Uma grande parte do lixo urbano dos Estados Unidos e da Europa é tratada em usinas de incineração. Esse tratamento térmico pode ser classificado como sendo de alta ou baixa temperatura. O tratamento a alta temperatura normalmente ocorre a temperaturas acima de 500 °C e objetivam, principalmente, a destruição ou remoção da fração orgânica presente no resíduo, com uma redução significativa de sua massa (70%) e volume (90%), bem como a sua assepsia.

O tratamento a baixa temperatura acontece a temperaturas em torno de 100 °C e visa, principalmente, a assepsia do resíduo sólido, razão pela qual são empregados somente para o tratamento de resíduos hospitalares. A energia contida nos resíduos, nestes processos, pode ser parcialmente aproveitada, podendo gerar energia elétrica, água quente e vapor, ou combustíveis alternativos, auxiliando na redução do custo operacional do tratamento térmico.

O rendimento da combustão do lixo, que não pode ser incompleta, é função de uma mistura ótima ar - combustível e da máxima transferência de calor gerado pelos materiais a serem incinerados, o que significa que um controle minucioso é imprescindível. Os equipamentos de controle de poluição são parte integrante das usinas de incineração e, obviamente, encarecem o tratamento, além de ocuparem grandes áreas.

Os remanescentes da incineração são gases (CO_2 , CO , SO_x , N_2 , NO_x , O_2), água, escórias (de 15 a 20% do total, constituídas de metais ferrosos, cinzas, material incombustível). Além da disposição em aterro, outra destinação adequada é sua reutilização como material de cobertura dos aterros sanitários ou para correção do solo.

Nos processos a batelada simples, são utilizados queimadores a óleo ou a gás, podendo ocorrer grandes variações nas condições de operação. A fumaça e os compostos voláteis

passam da câmara de combustão à de resfriamento, os gases da combustão são resfriados em trocadores de calor (alguns são lavados), a cinza é precipitada gravimetricamente e removida.

Os processos contínuos, maiores e mais complexos, necessitam de equipamentos auxiliares. Carga e descarga são mecanizadas. Antes de levado à câmara de combustão, o lixo é seco, onde, em seguida, é incinerado, à medida que passa por uma grelha, a qual revolve os resíduos, melhorando o contato com o comburente, removendo cinzas e escórias. Os gases resultantes são resfriados num trocador de calor, filtrados (em precipitadores eletrostáticos, ciclones) e lançados na atmosfera. As cinzas e escórias devem ser adequadamente aproveitadas ou dispostas.

Atualmente a incineração é um processo bastante difundido, com um número elevado de unidades, muitas de grande porte, em operação comercial em todo o mundo. Países com pequena disponibilidade de áreas adequadas para aterros, como Japão, Suécia e Suíça, não somente apresentam um grande número de unidades em funcionamento, como têm apresentado uma tendência acentuada de crescimento desta forma de disposição ao longo dos anos. Esse fato é devido à incorporação às novas unidades de incineração, de sistemas de recuperação de energia e de tratamento de gases de combustão mais eficientes, tornando-os mais seguros do ponto de vista ambiental.

A **Figura 5.16.** apresenta uma unidade de incineração para resíduos sólidos urbanos.



Figura 5.16. - Foto de Usina de Incineração

Para o cálculo do balanço térmico, considerou-se 100 t/d de lixo doméstico, com a seguinte característica:

Tabela 5.26. - Composição do Lixo

Componente	Fração
Material Combustível;	54,6
Material não Combustível	24,0
Água	21,4

Fonte: Tchobanoglous, 1993

Tabela 5.27. - Composição Elementar Média

Elemento	Fração Mássica
Carbono	27,4
Hidrogênio	3,6
Oxigênio	23,0
Nitrogênio	0,5
Enxofre	0,1
Água	21,4
Inertes	24,0
TOTAL	100%

Fonte: Tchobanoglous, 1993

Foram consideradas as seguintes hipóteses:

- Poder calorífico do lixo bruto: 8 MJ/kg
- O resíduo remanescente contém 5% de carbono não oxidado
- Temperatura de entrada do ar: 295 K
- Temperatura de saída do ar: 723 K
- Calor específico do lixo: 1,0467 kJ/kg K
- Entalpia de vaporização da água: $h_{liq} = 2,419$ MJ / kg
- Perda por radiação: 0,5%
- Todo oxigênio presente no lixo corresponde a moléculas de água
- A quantidade de ar teórica foi calculada na **Tabela 5.28.**:

Tabela 5.28. - Cálculo da Quantidade de Ar Teórica

Elemento	Reação	Quantidade de ar teórico* [kg de ar / kg de elemento]
Carbono	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	11,52
Hidrogênio	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	34,56
Enxofre	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	4,31

*considerando-se que o ar seco contém 23,15% de O_2 em massa

- Poder calorífico do carbono é de 32,6 MJ/kg
- O hidrogênio disponível para combustão é numericamente igual à percentagem de hidrogênio no lixo, menos 1/8 da percentagem de oxigênio. Segundo Tchobanoglous, computa-se desta maneira o hidrogênio não passível de combustão, relativo às moléculas de “água ligada” presentes no material combustível seco.
- Umidade no ar combustível é de 1%

Considerando-se que a massa total de resíduos é de 25,26 t/d, calculou-se a massa de carbono no resíduo pela equação abaixo:

$$M_{\text{carbono no resíduo}} = M_{\text{total de resíduos}} - M_{\text{total de inertes}} = 1,26 \text{ t/d de carbono} \quad (28)$$

Cálculo da massa de hidrogênio disponível e da “água ligada”:

Porcentagem de hidrogênio disponível = 0,725%

Massa de hidrogênio disponível para combustão = 725 kg /d

Hidrogênio disponível na “água ligada” = 2.875 t/d

$$\text{Água ligada} = \text{hidrogênio} + \text{oxigênio da água ligada} = 25.875 \text{ t/d} \quad (29)$$

A **Tabela 5.29.** apresenta o cálculo do consumo de ar:

Tabela 5.29. - Cálculo do Consumo de Ar

Elemento	Cálculo	Consumo de ar [kg/d]
Carbono	$(27.400 - 1.260) * 11,52$	301.133
Hidrogênio	$725 * 34,56$	25.056
Enxofre	$100 * 4,31$	431
Total		326.620

Massa de ar teórico total = 326.620 t kg/d

Massa de ar, considerando 100% em excesso: 653.240 kg/d

Umidade (1%) = 6.53 kg/d

Massa de ar total = 718.564 kg/d

Massa de água produzida pela combustão do hidrogênio disponível:

$$H_2O = \frac{18gH_2O}{2gH_2} \cdot 725kg/d = 6.525 \text{ kg/d de } H_2O \quad (30)$$

A Tabela 5.30. apresenta o balanço térmico para o processo de combustão:

Tabela 5.30. - Balanço térmico para o processo de combustão

Item	Cálculo	Valor [MJ/d]
Entrada total de energia	100.000 kg/d * 8 MJ/kg	8 x 10 ⁵
Perda de calor pelo carbono não queimado (resíduo)	1.260 kg/d * 32,6 MJ/kg	-41.076
Perda por radiação	8*10 ⁵ MJ/d*0,5%	-4.000
Umidade inerente (água)	21.400 kg/d*2,419 MJ/kg	-51.767
Umidade relativa à “água ligada” (lixo seco)	25.875 kg/d*2,419 MJ/kg	-62.592
Umidade relativa à combustão do hidrogênio disponível	725 kg /d *2,419 MJ/kg	-1.754
Entalpia sensível do resíduo*	25,26 t/d*1,0467 kJ/(kg K)*(723-295)K	-11.316
Total de Perdas		-172.504
Entalpia disponível nos gases de escape		627.495
Eficiência da Combustão		78%

*Considerou-se o valor médio de literatura, de 25,26% em massa para as cinzas

Para a operação do incinerador são necessários dois técnicos, durante toda a operação, a qual é prevista para ocorrer ininterruptamente, 24 horas por dia, com três turnos de operação.

A **Tabela 5.31.** apresenta as cargas elétricas dos equipamentos do incinerador.

Tabela 5.31. - Lista de Cargas Elétricas do Incinerador

#	Item	Potência [kW]
	Incinerador	
1	Alimentação da Grelha	40
2	Movimentação da Grelha	20
	Tratamento das Emissões	
4	Exaustores	20
	Co-Geração	
6	Compressor radial	10
7	Instrumentação	1
TOTAL		91,0

Tem-se, portanto, $9,43 \times 10^6$ MJ de energia consumida ao longo de 10 anos de operação.

Com relação ao transporte, foram feitas as hipóteses apresentadas na tabela **Tabela 5.32.:**

Tabela 5.32. - Lista de Transportes Utilizados

Meio de Transporte	Atividade	Massa transportada [t]	Distância [km]	Trabalho realizado [t.km]
Caminhão	Transporte de lixo	100 t/d * 3.650 d	0,2	73.000
Caminhão	Transporte de cinzas para o aterro	25,26 t/d * 3.650 d	0,5	46.100
TOTAL				119.100

Uma vez que as cinzas podem ser consideradas resíduos inertes e, portanto, passíveis de disposição em aterros convencionais (classe II), adotou-se o valor calculado no item anterior (aterro), de 0,191 MJ/kg de resíduo depositado em aterro (apresentado na **Tabela 5.32.**).

Para a geração de cinzas estimada de 25,26 t/d , tem-se:

$$CE_{\text{A cinza}} = 1,76 \times 10^7 \text{ MJ}$$

Uma vez que o incinerador de resíduos sólidos urbanos trabalha em regime auto-térmico, considerou-se um queimador a gás natural apenas para a partida do sistema e fonte de energia secundária, para evitar-se oscilações bruscas no perfil de temperaturas do forno.

Como dado prático fornecido pelo fabricante, foi adotado o consumo médio de 11 Nm³ de gás por tonelada de resíduo incinerado. Para as 100 t/d consideradas, tem-se:

$$\dot{V}_{\text{comb}} = 45,83 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Considerou-se a existência de um sistema de co-geração, para aproveitamento do rejeito térmico oriunda da queima dos resíduos, com as seguintes hipóteses:

- Aproveitamento do calor disponível nos gases de escape, calculado no balanço térmico: 627.495 MJ/d = 7,26 MW;
- Temperatura de saída dos gases: 800°C (dado do fabricante);

Para o cálculo da exergia térmica, considerou-se apenas os gases de escape, que estão a 800°C. Tem-se, portanto:

$$b^{ph} = h - h_0 - T_0(s - s_0) = 432,2 \text{ kJ / kg} \quad (31)$$

Uma vez que a vazão mássica dos gases de escape é de 8,32 kg/s, tem-se:

$$\dot{B}^{ph} = 3,596 \text{ MW}$$

De maneira análoga ao exemplo anterior, para fins de cálculo da exergia do produto, considerou-se apenas a componente térmica, desconsiderou-se a componente química presente nos gases de escape. Desta maneira, tem-se:

$$\dot{B}_{\text{produto}} = B^{ph} = 4,0237 \text{ MW}$$

É importante salientar que o cálculo acima foi efetuado a partir do poder calorífico médio do resíduo sólido urbano, de 8 MJ/kg.

Para avaliar-se a contribuição de cada resíduo na exergia do produto disponível, considerou-se o poder calorífico individual, conforme cálculo da **Tabela 5.33.**:

Tabela 5.33. – Contribuição específica em base exergética do produto dos resíduos avaliados

Material	Poder Calorífico MJ/kg	Ex _{Produto} MJ/kg
Lixo doméstico (média)	8,00	3,48
Papelão	16,38	7,12
Papel	15,81	6,88
PE	43,47	18,91
PP	42,84	18,64
PVC	22,69	9,87

5.3.3. Cálculo da Exergia Acumulada

Utilizando-se a mesma técnica empregada no caso anterior, foi computada a exergia acumulada, segundo a metodologia proposta por Szargut (1988) para os processos avaliados, cujo resultado é apresentado na **Tabela 5.34**. Para cada alternativa de processo, calculou-se a quantidade de recursos necessária e multiplicou-se pelo CExA específico de cada recurso.

Tabela 5.34. Consumo de exergia acumulada nos processos de tratamento de lixo urbano

Recurso / Utilidade	CExC Específico	Aterro		Reciclagem (Triagem)		Incineração	
		Quantidade	CExA [MJ]	Quantidade	CExA [MJ]	Quantidade	CExA [MJ]
<i>Mão-de-Obra</i> operário	6,98E-01 MJ / h	2,88E+05 h	2,01E+05	1,15E+06 h	8,04E+05	1,75E+05 h	1,22E+05
<i>Materiais Inorgânicos</i> tijolo	4,59E+01 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	1,00E+04 kg	4,59E+05	1,50E+04 kg	6,89E+05
concreto	1,10E+00 MJ / kg	3,03E+05 kg	3,33E+05	5,00E+03 kg	5,50E+03	3,75E+04 kg	4,13E+04
aço	4,59E+01 MJ / kg	1,55E+04 kg	7,12E+05	1,25E+04 kg	5,74E+05	4,73E+04 kg	2,17E+06
aço zincado	5,86E+01 MJ / kg	2,43E+03 kg	1,42E+05	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
cerâmica	6,56E+00 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	2,00E+04 kg	1,31E+05
<i>Materiais Orgânicos</i> Polietileno	8,60E+01 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
Polipropileno	8,52E+01 MJ / kg	1,56E+04 kg	1,33E+06	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
PVC	6,70E+01 MJ / kg	4,10E+02 kg	2,75E+04	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
pintura acrílica	8,23E+01 MJ / kg	2,00E+01 kg	1,65E+03	0,00E+00 kg	0,00E+00	5,00E+01 kg	4,12E+03
carvão ativado	2,47E+02 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
reativação do carvão ativado	1,23E+02 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
composto	4,36E+00 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00
<i>Utilidades*</i> gás	3,49E+01 MJ / Nm ³	0,00E+00 Nm ³	0,00E+00	0,00E+00 Nm ³	0,00E+00	4,07E+06 Nm ³	1,42E+08
eletricidade	2,86E+00 MJ / MJ	1,99E+07 MJ	5,68E+07	2,43E+06 MJ	6,96E+06	9,43E+06 MJ	2,70E+07
transporte de carro	4,33E+00 MJ / km	8,76E+05 km	3,79E+06	0,00E+00 km	0,00E+00	0,00E+00 km	0,00E+00
transporte por caminhã (28 t)	3,13E+00 MJ / t.km	4,20E+05 t.km	1,31E+06	1,44E+07 t.km	4,51E+07	1,19E+05 t.km	3,73E+05
escavação com pá carregadeira	8,22E+00 MJ / m ³	4,25E+05 m ³	3,49E+06	0,00E+00 m ³	0,00E+00	0,00E+00 m ³	0,00E+00
compactação com trator	8,22E+00 MJ / m ³	4,95E+05 m ³	4,07E+06	0,00E+00 m ³	0,00E+00	0,00E+00 m ³	0,00E+00
disposição de cinzas	2,03E-01 MJ / kg	0,00E+00 kg	0,00E+00	0,00E+00 kg	0,00E+00	9,22E+07 kg	1,87E+07
TOTAL GERAL CONSUMIDO			7,22E+07		5,39E+07		1,91E+08
Massa de resíduo Tratado (kg)			3,56E+08		2,88E+08		3,56E+08
CExA específica (MJ/kg)			2,03E-01		1,87E-01		5,37E-01

* Considerada a operação por

87600 horas ou 10 anos de operação ininterrupta para aterro e do incinerador

28800 horas ou 10 anos de operação de 10 horas diárias, para reciclagem

A **Tabela 5.35.** apresenta o valor do CExA para a disposição do aterro de cada um dos materiais analisados, corrigidos pela densidade, uma vez que o volume que o material ocupa no aterro é o fator determinante para definir a capacidade do aterro.

Tabela 5.35. - CExA específico por produto para disposição em aterro

Material	Densidade kg/L	CExA MJ/kg
Papelão	0,177	1,08E+00
Papel	0,43	4,44E-01
PE	0,95	2,01E-01
PP	0,9	2,12E-01
PVC	1,4	1,36E-01

Para a reciclagem, na **Tabela 5.34.**, foi considerada apenas a etapa de triagem do lixo, em esteiras transportadoras, por meio do emprego de catadores. A **Tabela 5.36.** apresenta o cálculo da exergia acumulada pela mesma metodologia utilizada anteriormente, para cada processo de reciclagem dos distintos materiais considerados.

5.3.4. Avaliação dos Resultados

Para comparar as alternativas avaliadas, computou-se a exergia acumulada calculada nas **Tabelas 5.34. e 5.36.** para 1 kg de cada resíduo listado na **Tabela 5.18.**, bem como a exergia contida no produto remanescente de cada processo de tratamento. Os resultados e o rendimento exergético dos processos de tratamento avaliados são apresentados na **Tabela 5.37.**

Tabela 5.36. Balanço de exergia acumulada para reciclagem de 500 kg/d de diversos resíduos por 10 anos

Recurso / Utilidade	CExC Específico	Papel / Papelão		Plástico	
		Quantidade	CExA [MJ]	Quantidade	CExA [MJ]
<i>Mão-de-Obra*</i> operador	1,81E+00 MJ / h	1,73E+05 h	3,13E+05	1,15E+05 h	2,09E+05
<i>Materiais Inorgânicos</i> concreto	1,10E+00 MJ / kg	1,50E+04 kg	1,65E+04	7,50E+03 kg	8,25E+03
aço	4,59E+01 MJ / kg	8,50E+03 kg	3,90E+05	7,00E+03 kg	3,21E+05
<i>Utilidades*</i> água e tratamento	1,80E+00 MJ / Nm ³	5,76E+03 Nm ³	1,04E+04	2,88E+03 Nm ³	5,18E+03
gás	3,49E+01 MJ / Nm ³	4,32E+05 Nm ³	1,51E+07	2,88E+05 Nm ³	1,01E+07
eletricidade	2,86E+00 MJ / MJ	3,60E+06 MJ	1,03E+07	2,63E+06 MJ	7,52E+06
TOTAL GERAL CONSUMIDO			2,58E+07		1,79E+07
Massa de resíduo Tratado (kg)			1,44E+06		1,44E+06
CExA específica (MJ/kg)			1,79E+01		1,24E+01

* Considerada a operação por

28.800 horas ou 10 anos de operação de 10 horas diárias

Tabela 5.37. - Comparação da Exergia contida nos produtos residuais dos processos de tratamento avaliados

Produto	ExMP	CExa	Alternativas											
			Aterro				Reciclagem				Incineração			
			B _{insumos}	Produto	B _{produto}	η_p	B _{insumos}	Produto	B _{produto}	η_p	B _{insumos}	Produto	B _{produto}	η_p
Papelão	19,5	70,8	1,15	C & E	1,04	5%	18,09	Papelão	19,50	52%	0,54	C & E	7,12	36%
Papel	16,5	69,2	0,47	C & E	1,04	6%	18,09	Papel	16,50	48%	0,54	C & E	6,88	40%
PE	46,5	86,0	0,21	C & E	0,00	0%	12,62	PE	46,50	79%	0,54	C & E	18,91	40%
PP	46,4	85,2	0,23	C & E	0,00	0%	12,62	PP	46,40	79%	0,54	C & E	18,64	40%
PVC	19,7	67,0	0,15	C & E	0,00	0%	12,62	PVC	19,70	61%	0,54	C & E	9,87	49%

Pode-se observar, que os rendimentos calculados para os processos de tratamento situam-se em patamares similares, para os diferentes materiais avaliados. Desta maneira, tem-se primeiramente um escalonamento das alternativas de maior eficiência exergética, sendo elas, por ordem decrescente, reciclagem, incineração e disposição em aterro.

Na disposição em aterro verifica-se um rendimento nulo para os materiais plásticos, em decorrência da ausência de atividade de biodegradação e a conseqüente inexistência de gás proveniente destes resíduos, para o fornecimento de produtos para a sociedade. Mesmos os materiais com matéria orgânica biodegradável (papel e papelão) retornam um produto de baixo valor exergético.

A incineração aproveita, por meio da combustão direta, boa parte da exergia contida nos resíduos, a qual é convertida em energia elétrica e calor de processo, com rendimentos significativamente mais elevados do que a disposição em aterros. De todas as alternativas avaliadas, esta foi a que apresentou menor variação para os rendimentos dos diferentes materiais considerados ($\eta_p = 36\%$ para papel a $\eta_p = 49\%$ para o PVC).

Dentre as alternativas avaliadas, a reciclagem é a que apresenta os mais elevados rendimentos, uma vez que os produtos oriundos deste processo são os que apresentam o maior conteúdo exergético agregado (papel, papelão e plásticos reciclados), mesmo sendo necessário um maior consumo de exergia para sua conversão. Pode-se por fim fazer uma distinção entre os plásticos, com maior rendimento, produtos convertidos de maior valor exergético e processos de menor consumo, em relação ao papel papelão.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho propõe uma metodologia científica com critérios bem definidos para quantificar o desempenho de alternativas tecnológicas para mitigar o impacto ambiental, numa base única: a exergia. Desta maneira, é possível comparar o custo exergético para a implantação do processo e sua operação, com os contaminantes que se pretende eliminar. O método da análise da exergia acumulada para os processos permite sua avaliação ao longo de um período de operação e não apenas instantaneamente. Deve-se ressaltar também a flexibilidade de cenários e situações aos quais esta metodologia é aplicável, podendo-se comparar danos e custos ambientais de cenários bem distintos. Tal característica permite a avaliação do impacto ambiental e seu custo para a sociedade de uma maneira mais uniforme, possibilitando até, como proposto por Gong (1999) e Wall (1997), a cobrança de sanções e taxas correspondentes segundo um critério bem definido.

Este trabalho aplicou a metodologia de análise exergética de ciclo de vida proposta por Szargut (1988), complementada pela avaliação dos rendimentos exergéticos η_d e η_p , para processos voltados à destruição e ao aproveitamento da exergia dos contaminantes, respectivamente, para três estudos de caso que englobaram os meios suscetíveis a impactos ambientais: ar (estudo de caso 5.1.), água (estudo de caso 5.2.) e solo (estudos de caso 5.2. e 5.3.).

Os critérios de mérito propostos, rendimento exergético para destruição do contaminante e para a conversão em produto, mostraram resultados coerentes com as opções tecnológicas que primam pela sustentabilidade de soluções ambientais.

Para todas as alternativas avaliadas, os insumos consumidos durante a operação desempenharam um papel preponderante no computo da exergia acumulada em cada

processo, com destaque para as utilidades gás e eletricidade. A exergia consumida para a instalação dos processos teve ordem de grandeza menos significativas.

Os estudos de caso envolvendo o tratamento de emissões atmosféricas e a remediação de solo e água subterrânea contaminados, respectivamente, foram avaliados segundo o índice η_d uma vez que o foco destes processos foi a eliminação da exergia contida nos contaminantes. Nenhum dos processos em questão apresentou algum subproduto útil para a sociedade. Mesmo que em alguns deles houvesse o aproveitamento de rejeitos térmicos, como seria possível no processo do pós-queimador, ou na pirólise para ativação do carvão ativado saturado, envolvido em ambos os estudos, os produtos oriundos seriam de menor significância face o objetivo principal destes processos. Entretanto, a metodologia aplicada para o cálculo de η_d apresentaria a distorção de fornecer rendimentos menores para processos em que houvesse produto útil retornando para a sociedade. Esse aspecto poderia ser explorado e corrigido numa continuidade deste trabalho.

Nas situações em que o objetivo foi a destruição da exergia do contaminante, os processos envolvendo atividade biológica foram os que apresentaram maiores rendimentos, tais como o biofiltro (estudo de caso 5.1.) e a extração multifásica (estudo de caso 5.2.). Já aqueles envolvendo a destruição térmica através do consumo de insumos (gás natural, principalmente) apresentaram os menores rendimentos, como na remoção e incineração do solo (estudo de caso 5.2.) e o pós-queimador e a adsorção em carvão ativado (estudo de caso 5.1).

O estudo de caso 2 apresentou uma situação particular, em que os processos disponíveis e avaliados atuam sobre meio e porção da contaminação distintos. Os rendimentos calculados na **Tabela 5.15.** apresentaram o bombeamento como a melhor opção, embora este atue apenas nas fases livre e residual do contaminante no solo. O MPE é uma

solução tecnológica mais recente, que vem sendo empregada em substituição ao bombeamento, uma vez que atua também na fase dissolvida em água, apresentando custos e prazos de remediação menores. Entretanto o η_d calculado na **Tabela 5.15.** para o MPE é inferior ao do bombeamento. A **Tabela 5.14.**, que apresenta a eficiência da remediação específica por volume descontaminado, corrige esta distorção. Tal situação evidencia a necessidade de uma ponderação específica para comparar processos que desempenham tarefas distintas.

Os processos para tratamento de resíduos sólidos urbanos foram os únicos avaliados pelo índice rendimento do produto, η_p , uma vez que estes processos conseguem devolver produtos úteis para a sociedade, como calor para processo, energia elétrica e materiais reciclados.

O escalonamento obtido com o η_p , o qual identifica a reciclagem como a melhor alternativa e o aterro sanitário como a pior, ficou bastante coerente com a noção de sustentabilidade que ambientalistas e instituições governamentais têm procurado difundir. O maior conteúdo exergético e conseqüente valor agregado dos produtos reciclados explicam o elevado η_p obtido, mesmo que este processo envolva um maior consumo de exergia. No extremo oposto, o aterro aparece como uma alternativa de baixo consumo exergético específico, mas que por outro lado fornece pouco ou nenhum produto para a sociedade.

Atualmente as escolhas de alternativas de processo para mitigação do impacto ambiental são feitas com um foco preponderante sobre o custo, negligenciando-se muitas vezes a sustentabilidade das tecnologias empregadas. O conceito de sustentabilidade, com o emprego da exergia, ganha um caráter quantitativo muito valioso, para uma análise mais

técnica, racional e universal de soluções ambientais, em detrimento a critérios mais abstratos ora empregados, como “bom senso” e “ecologicamente correto / sustentável”.

Para complementar o trabalho, propõe-se algumas linhas de pesquisa que permitam estender e explorar os conceitos aqui desenvolvidos:

- Dar continuidade ao desenvolvimento de uma metodologia para análise exergética do impacto ambiental, procurando encontrar uma forma de quantificar o impacto de uma maneira universal, independentemente do processo de tratamento;
- Aprofundar a análise conduzida para o problema da contaminação do solo e da água subterrânea, procurando melhor quantificar o termo da exergia de mistura dos contaminantes nestes meios;
- Conduzir uma análise exergética mais detalhada do problema do lixo, com particular atenção para o aterro sanitário, considerando-se no modelo o horizonte de tempo da degradação dos materiais no solo e a operação por períodos prolongados, pós cobertura do mesmo (monitoramento, etc.)
- Incluir uma análise termoeconômica na metodologia apresentada para avaliação de processos mitigadores de impacto ambiental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NRB 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação..** Brasil: ABNT, 1987.
- ARONS, J. DE SWAN; VAN DEN BERG, M. M.; VAN DER KOOI, H. J., DEWULF, J.; VAN, VAN LANGENHOVEN, H; MULDER, J. Illustrations Towards Quantifying Sustainability of Technology. **Green Chemistry**, Holanda: University of Technology, 2000, 2, 108-114.
- ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites.** annual book. USA : ASTM, 1995. 51p. (E 1739-95)
- AYRES, R. U.; AYRES, L.W.; MARTINÀS, K. **Eco-Thermodynamics: Exergy and Life Cycle Analysis.** Fontainebleau, França: INSEAD, 1996, 48p.
- AYRES, R. U.; AYRES, L.W.; MARTINÀS, K. Waste Potential Entropy: The Ultimate Ecotoxic. **Èconomique Appliquè.** Fontainebleau, França: INSEAD, 1995
- BEJAN, A; TSATSARONIS, G; MORAN, M. **Thermal design and optimization.** New York: John Wiley & Sons, 1996
- CALLEN, H. **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics.** New York: John Wiley & Sons, 1985
- CEMPRE – COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** São Paulo: IPT, 1995 - 2ª edição.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLER, M.A. **Thermodynamics: An Engineering Approach.** Nova York: Mac Graw Hill, 1994, 987p.
- CETESB. **Relatório de estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo.** São Paulo : CETESB, 2001 231p.
- COONEY, D.O. **Adsorption Desing for Wastewater Treatment.** Nova York: Lewis Publishers, 1998, 190p.
- CORNELISSEN, R.L. **Thermodynamics, and sustentainable Development.** Tese de PhD.Universidade de Twente. Enschede: Cornelissen, 1997, 150p.

DEWULF, J.; VAN LANGENHOVEN, H.; Dirckx, J. Exergy Analysis in the Assessment of the Sustainability of Waste Gas Treatment Systems. **The Science of the Total Environment**. Bélgica, Elsevier: 2000

DEWULF, J.; VAN LANGENHOVEN. Assessment of the Sustainability of Technology by Means of a Thermodynamically Based Life Cycle Analysis. **Environ Science & Pollution Research**. Landsberg, Alemanha: Ecomed Publishers, 2001

FÖRSTNER, U. **Umweltschutz Technik**. Hamburg, Alemanha: Springer-Verlag, 1995.

GAGGIOLI, R., A. Reflections on the History and Future of Exergy. **ECOS' 99**. Instituto de Tecnologia de Tokio. Tokyo, Japão: 1999, 5-13p.

GONG, M. **On Exergy as an Environmental Indicator**. Göteborg, Suécia: Chalmers University of Technology, 1999. 65p.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Artigo 18, decreto lei estadual 8.468**. São Paulo: Imprensa Oficial, 1976

GOVERNO FEDERAL - MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria 1496 – Padrão de Potabilidade para Água**. Brasil: Gráfica Oficial, 2000.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Londres, Inglaterra: Butterworths, 1985.

LOWE, E.A. WARREN J.L., MORGAN S.R. **Discovering Industrial Ecology – An Executive Briefing and Sourcebook**. Columbus, OH: Battelle, 1997. 191p.

OLIVEIRA JÚNIOR, S. **Análise Termodinâmica e Termoeconômica de Processos de Conversão de Energia**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996

ONU - THE WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**. Oxford University Press, Nova York, EUA: 1987. 383p.

ONU – WCED, Relatório Brundtland, 1987

RETTENBERGER, G. — **Gashaushalt von Deponien: Ablagerung von Abfällen**, EF-Verlag für Energie und Umwelt – Berlin, 1987.

SCIUBBA, E. **An Application of a General Energetic Model To The Analysis of The Sustainability Of Complex Systems**. Washington DC: ASME, 1995.

SZARGUT, J., MORRIS, D. R. **Cumulative Exergy Consumption and Cumulative Degree of Perfection of Chemical Process.** Nova York: International Journal Energy Res. Vol. 11, 1987, pp.245-261

SZARGUT, J., MORRIS, D. R., AND STEWARD, F. R. **Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes.** Hwmisphere Publishing Corporation. Nova York: 1988.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL A., S. **Integrated Solid Waste Management.** Mc Graw Hill International Editions. Nova York: 1993.

VAN DEN BERG, M. M.; VAN DER KOOI, H. J., ARONS, J. DE SWAN. A **Thermodynamic Basis for Sustainability.** ECOS'99. Tokyo, Japão: Tokyo Institute of Technology: 1999. 270-275p.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1976. 565p.

WALL, G. **Exergy – A Useful Concept.** Göteborg, Suécia: Chalmers Univesity of Technology: 1986. 46p.

WALL, G. Exergy, Ecology and Democracy – Concepts of a Vital Society or A Proposal for An Exergy Tax. **Conference on Exergy Syustems and Ecology.** Cracóvia, Polônia: Int. Publ. Proc: 1993. 5-9p.

WALL, G. **Exergy: A Useful Concept within Resource Accounting.** Göteborg, Suécia: Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, 1977.

WALL, G.; GONG, M. **On Exergetics, Economics and Optimization of Technical Process to Meet Environmental Conditions** Göteborg, Suécia: Chalmers Univesity of Technology, 1997

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTIG L. **Environmental Assessment of Products: Scientific Background.** Dordrecht , Alemanha: Kluwer Academic Publ, 1997.

**ANEXO A – MEMORIAL DE CÁLCULO –
ESTUDO DE CASO 1**

MEMORIAL DE CÁLCULO – PÓS-QUEIMADOR

Chaminé

A tabela abaixo apresenta o dimensionamento preliminar da chaminé :

Tabela A.1. - Dimensionamento preliminar da chaminé	
Altura adotada [m]:	5,5
Altura da base [m]	1,0
Altura total [m]	6,5
Diam. interno [m]	1,0
Espessura de aço [m]	0,005
Espessura de refratário [m]	0,200
Diam. externo [m]	1,410
Densidade aço [kg/m ³]	7800
Densidade refratário [kg/m ³]	1500
Volume aço [m ³]	0,143
Volume de refratário [m ³]	4,8984
Peso do aço [kg]	1.114
Peso do refratário [kg]	7.348

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela A.2. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Pós-Queimador					
#	Material	Densidade kg/m³	Volume m³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Concreto	2500	4,8000	12.000	Base do queimador: (4x4x0,3m)
2	Aço	7800	0,0128	216	Total
		7800	0,0149	100	Estrutura do Queimador
				116	Ventilador Aeromack VSE-40 - 116kg
2	Aço Zincado			2.745,4	Total
		7800	0,143	1.114	Chaminé
		7800	0,113	881,4	Dutos de recalque
		7800	0,0962	750	trocadores de calor
3	Cerâmica	1500	4,8984	7.348	Refratário
4	Pintura Acrílica	1321	0,0151	20	4 galões
5	Polipropileno	900	0,3156	284	20 m de duto de 1m de diâmetro x 5mm

MEMORIAL DE CÁLCULO – SISTEMA DE ADSORÇÃO POR CARVÃO ATIVADO

Colunas

Considerou-se que as trocas de carvão ativado das colunas devam ocorrer mensalmente. Adotou-se portanto, partindo-se da premissa de 22 dias de trabalho ao mês, uma massa de 2.292,3 kg. A **Tabela 4.1.2.3.** abaixo apresenta o dimensionamento preliminar da coluna:

Tabela A.3. - Dimensionamento preliminar da coluna de adsorção

Parâmetro	Valor
massa de CA [kg]	2300
densidade do CA [kg/L]	0,5
Volume mínimo da coluna [m ³]	4,6
Altura da coluna [m]	3,5
Diam. interno [m]	1,3
Volume útil da coluna [m ³]	4,65
Superfície da coluna (fundo plano) [m ²]	16,95
Espessura de aço [m]	0,005
Volume aço [m ³]	0,085
Densidade aço [kg/m ³]	7800
Peso total da coluna [kg]	661

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela A.4. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Concreto	2500	5,4000	13500	Base das colunas (6x3x0,3m)
2	Aço	7800	0,0847	661	Total
		7800	0,0385	300	Colunas
		7800	0,0173	135	Suporte colunas
		7800	0,0962	750	Ventilador Aeromack VCT-460
					Tubulação
3	Aço Zincado	7800	0,1430	1000	Chaminé
4	Pintura Acrílica	1982	0,0151	30	6 galões

MEMORIAL DE CÁLCULO – BIOFILTRO

Leito de Filtragem:

Segundo informações fornecidas por um fabricante, o biofiltro terá as características apresentadas na **Tabela 4.1.2.5.**:

Parâmetro	Valor
Largura [m]	20
Comprimento [m]	30
Altura [m]	2,5
Altura da coluna de substrato	2,0
Volume de substrato [m ³]	1250
Densidade do substrato [kg/L]	0,4
Massa de substrato [t]	500

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Tijolo	2000	25	50000	Paredes
2	Concreto	2500	120	300000	Base do leito de filtragem (20m x 30m x 0,2 m)
3	Aço	7800	0,0128	100	Total
		7800	0,0173	135	Suporte de tubulação
		7800	0,0962	750	Ventilador Aeromack VCT-460
					Tubulação de ar
4	Polipropileno	900	12	10800	Suporte de 20x30x0,02m
5	PVC	1600	0,1200	192	Tubulação de água e nutrientes
6	Pintura Acrílica	661	0,0151	10	2 galões

**ANEXO B – MEMORIAL DE CÁLCULO –
ESTUDO DE CASO 2**

cÁLCULO DA EXERGIA DO CONTAMINANTE

A tabela abaixo apresenta o cálculo do termo da exergia da mistura do contaminante

$$\cdot RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$$

•

Tabela .B.1. - Cálculo do Termo de Exergia de Mistura

Meio	Fase	Volume Contaminado [m3]	Conc. Média [kg/kg]	Termo de Exergia da mistura [kJ]
Solo	Livre	673	4,5139E-03	-1,496E+00
Solo	Residual	13.464	1,2339E-04	-1,098E+00
Água	Dissolvida	53.183	8,9252E-07	-4,234E-02
TOTAL $b_{mistura}^{ch}$				-2,636E+00

b^{ch} = exergia química específica do óleo diesel = 46.163,19 kJ / kg

$V_{\text{óleo}}$ = Volume de óleo diesel inserido no meio-ambiente = 8.000 L

$\rho_{\text{óleo}}$ = densidade do óleo diesel = 0,89 kg/L

Processo de Bombeamento

Colunas

O sistema é composto por 4 colunas são de aço carbono, as quais, vazias, pesam 5 kg cada. As trocas de carvão ativado das colunas devem ocorrer mensalmente.

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela B.2. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Aço			285	Total
		7800	0,0179	140	Separador água - óleo
		7800	0,0026	20	Filtros de carvão ativado
		7800	0,0160	125	Compressor Schulz 5hp
2	Aço zincado	7800	0,0023	18	3 bombas - Clean AP4
4	Polipropileno			126	Total
		900	0,0044	4	Tambores para armazenamento de óleo
		900	0,1356	122	Mangueiras
5	PVC	1400	0,0329	46	Tubulação de encamisamento das mangueiras
6	Pintura Acrílica	330	0,0151	5	1 galão

EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA

Mão de Obra

De maneira análoga ao caso anterior, considerando-se que os poços de extração também serão de 4", tem-se a mesma exergia específica de 1.676 kJ/m de poço instalado. Foi prevista a instalação de 8 poços com 12 metros cada, totalizando 96 metros.

Torre de Stripping

Segundo informações fornecidas pelo fabricante, a torre de stripping terá as seguintes características:

Tabela B.3. - Características da Torre de Stipping

Altura	1,5 m
Diâmetro	0,5 m
Material	Poliprolileno
Diâmetro da base	1,0 m
Altura da base	0,8 m
Espessura da parede	10 mm
Ventilador	Aeromack – VCE –03 – 1/3 hp
Rendimento	90% na remoção de hidrocarbonetos da água

Colunas

O sistema é composto por 4 colunas são de aço carbono, as quais, vazias, pesam 5 kg cada. As trocas de carvão ativado das colunas devem ocorrer a cada 4 meses.

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela B.4. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Adsorção CA

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Aço			1018	Total
		7800	0,0513	400	Separador água - óleo
		7800	0,0026	20	Filtros de carvão ativado
		7800	0,0321	250	dois compressores de pistão Schulz 5hp
		7800	0,0015	12	Ventilador axial 1/3 hp
		7800	0,0160	125	Compressor radial CRE-06 - 15hp
		7800	0,0269	210	Desumidificador (0,4 m3)
		7800	0,0269	1	Bomba centrífuga
2	Aço zincado	7800	0,0062	48	8 bombas - Clean AP4
3	Polipropileno			111	Total
		900	0,0044	4	Tambores para armazenamento de óleo
		900	0,0467	42	Torre de stripping
		900	0,0722	65	Tubulação extração de água

4	PVC			483	Total
		1400	0,0136	19	Tubulação de ar comprimido
		1400	0,3314	464	Tubulação extração de ar comprimido
5	Pintura Acrílica	330	0,0151	5	1 galão

REMOÇÃO E INCINERAÇÃO DE SOLO

Movimentação de solo:

Área da pluma de contaminação: 1.681 m²

espessura média de solo contaminado (fase livre e parte da fase dissolvida) : 1,5 m

volume total de solo a ser removido: 2.521,5 m³.

Consumo de gás e energia elétrica para incineração:

A tabela abaixo apresenta os dados fornecidos por uma empresa, que opera um incinerador para 100 t /dia de resíduos sólido, operando 24 hs/dia:

Tabela B.5. - Tabela de consumo de utilidades de um incinerador:

Utilidades	Consumo/dia (100 t/24hs)	Consumo por tonelada	Consumo Total
Energia Elétrica	540 MJ	5,4 MJ	16.339,3 MJ
Gás Natural	60 Nm ³ /h	60/4,17 = 14,39 Nm ³ /h	43.541,3 Nm ³ /h
Água Industrial*	10 m ³ /h	10/4,17 = 2,4 m ³ /h	7.261,9 2,4 m ³ /h

* não computada por ter sua exergia considerada como nula

Tranporte de carro: Considerou-se uma única viagem de um técnico até o local para supervisão do trabalho (400 km).

Tranporte de caminhão: Para o solo contaminado, considerou-se uma densidade média de 1,2 kg/L, totalizando 3.025,8 t; e uma distância de 200km entre o local da obra e o incinerador.

Escavação com pá carregadeira: considerou-se todo o volume de solo a ser movimentado para abertura e fechamento da vala, a qual tem 1.681 m² e uma profundidade de 8m. Desta maneira, tem-se: 1.681 m² x 8m x 2 = 26.896 m³ de solo a ser manuseado pela pá carregadeira.

**ANEXO C – MEMORIAL DE CÁLCULO –
ESTUDO DE CASO 3**

ATERRO

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela B.6. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Aterro

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Concreto			303.113	Total
		2.500	15,0000	37.500	Ancoragem de mantas
		2.500	94,245	235.613	Drenos de Gás
				20.000	base de equipamentos da estação de tratamento de percolados
				10.000	base de equipamentos do sistema de aproveitamento de gás
2	Aço			15.516	Total
		7.800	0,0128	100	Tubulação
		7.800	0,0533	416	Bombas e Equipamentos ETE
		7.800	1,9231	15.000	Sistema de Co-Geração
2	Aço Zincado			2.426	Total
		7.800	0,1430	1.200	Chaminé
		7.800	0,0161	126	Dutos de recalque
			1.100	trocadores de calor	
3	Cerâmica	1.600	4,8984	7.348	Refratário
4	Pintura Acrílica	1.321	0,0151	20	4 galões
5	Polipropileno			15.624	Total
		900	15,0000	13.500	Manta de impermeabilização da lagoa
		900	0,5000	450	Impermeabilização de drenos de percolado
		900	1,8600	1.674	Tubulação para encaminhamento percolado
6	PVC	1.400	0,2929	410	Tubulação ETE

TRIAGEM

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela B.7. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Triagem

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Tijolo	2000	5,0000	10.000	Galpão de Triagem
2	Concreto			5.000	Total
		2500	1,0000	2.500	Base de Equipamentos
		2500	1,0000	2.500	Colunas do Galpão
3	Aço			12.500	Total
		7800	0,1282	1.000	Silo de Estocagem
		7800	0,4487	3.500	Correia Transportadora
		7800	0,3846	3.000	Estrutura Galpão
		7800	0,6410	5.000	Prensas
5	Pintura Acrílica	1321	0,0151	20	4 galões

RECLAGEM DE PLÁSTICO

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela B.8. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Reciclagem de Plástico

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Tijolo	2000	0,0000	-	Galpão de Triagem
2	Concreto			7.500	Total
		2500	2,0000	5.000	Base de Equipamentos
		2500	1,0000	2.500	Colunas do Galpão
3	Aço			7.000	Total
		7800	0,1282	1.000	lavador

	7800	0,2564	2.000	tritador
	7800	0,1923	1.500	secador
	7800	0,1282	1.000	correia transportadora
	7800	0,1923	1.500	empilhadeira

RECICLAGEM DE PAPEL / PAPELÃO

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

**Tabela B.9. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Reciclagem de Papel /
Papelo**

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Tijolo	2000	0,0000	-	Galpão de Triagem
2	Concreto	2500	4,0000	10.000	Total
		2500	2,0000	5.000	Base de Equipamentos
					Colunas do Galpão
3	Aço			8.500	Total
		7800	0,2564	2.000	cortador
		7800	0,1923	1.500	lavador
		7800	0,1923	1.500	misturador / refino
		7800	0,1282	1.000	caixa de entrada
		7800	0,3205	2.500	mesa plana
		7800	0,6410	5.000	calandra
		7800	0,3846	3.000	enroladeira

INCINERAÇÃO

Materiais orgânicos e inorgânicos utilizados:

Tabela B.10. – Relação de materiais orgânicos e inorgânicos – Incineração

#	Material	Densidade kg/m ³	Volume m ³	Massa kg	Obs - Utilização
1	Tijolo	2000	7,5000	15.000	Fosso de recebimento do lixo
2	Concreto			37.500	Total
		2500	5,0000	12.500	Base de Equipamentos
		2500	10,0000	25.000	Estruturas / armação
3	Aço			47.300	Total
		7800	0,0641	500	Tubulação
		7800	1,9744	15.400	Câmara de Combustão
		7800	3,4615	27.000	Grelha móvel
		7800	0,0513	400	Bases e Suporte
		7800	0,3205	2.500	Filtros
		7800	0,1923	1.500	Sistema de Co-Geração
4	Cerâmica	1600	4,8984	20.000	Refratário
5	Pintura Acrílica	3303	0,0151	50	10 galões

**APÊNDICE I – VALORES ORIENTATIVOS PARA SOLO E ÁGUA
SUBTERRÂNEA**

Valores orientadores para solos e para águas subterrâneas no Estado de São Paulo.

Substância	VALORES ORIENTADORES					Águas Subt.(mg.l ⁻¹)
	Solos (mg.kg ⁻¹)					
	Referência	Alerta	Agrícola APM _{Max}	Intervenção Residencial	Industrial	
Alumínio	—	—	—	—	—	200 ⁽²⁾
Antimônio	<0,5	2,0	5,0	10,0	25	5 ⁽¹⁾
Arsênio	3,50	15	25	50	100	10 ⁽¹⁾
Bário	75	150	300	400	700	700 ⁽¹⁾
Cádmio	<0,5	3	10	15	40	5 ⁽¹⁾
Chumbo	17	100	200	350	1200	10 ⁽¹⁾
Cobalto	13	25	40	80	100	30 ⁽⁵⁾
Cobre	35	60	100	500	700	2000 ⁽¹⁾
Cromo	40	75	300	700	1000	50 ⁽¹⁾
Ferro	—	—	—	—	—	300 ⁽²⁾
Manganês	—	—	—	—	—	100 ⁽²⁾
Mercúrio	0,05	0,5	2,5	5	25	1 ⁽¹⁾
Molibdênio	<25	30	50	100	120	250 ⁽⁵⁾
Níquel	13	30	50	200	300	50 ⁽⁴⁾
Prata	0,25	2	25	50	100	50 ⁽³⁾
Selênio	0,25	5	—	—	—	10 ⁽¹⁾
Vanádio	275	—	—	—	—	—
Zinco	60	300	500	1000	1500	5000 ⁽²⁾
Benzeno	0,25	—	0,6	1,5	3,0	5 ⁽¹⁾
Tolueno	0,25	—	30	40	140	170 ⁽²⁾
Xilenos	0,25	—	3,0	6,0	15	300 ⁽¹⁾
Estireno	0,05	—	15	35	80	20 ⁽¹⁾
Naftaleno	0,20	—	15	60	90	100 ⁽⁵⁾
Diclorobenzeno	0,02	—	2,0	7,0	10,0	40 ⁽⁵⁾
Hexaclorobenzeno	0,0005	—	0,1	1,0	1,5	1 ⁽¹⁾
Tetracloroetileno	0,10	—	1,0	1,0	10	40 ⁽¹⁾
Tricloroetileno	0,10	—	5,0	10	30	70 ⁽¹⁾
1,1,1 Tricloroetano	0,01	—	8,0	20	50	600 ⁽⁵⁾
1,2 Dicloroetano	0,5	—	0,5	1,0	2,0	10 ⁽¹⁾
Cloreto de Vinila	0,05	—	0,1	0,2	0,7	5 ⁽¹⁾
Pentaclorofenol	0,01	—	2,0	5,0	15,0	9 ⁽¹⁾
2,4,6 Triclorofenol	0,2	—	1,0	5,0	6,0	200 ⁽¹⁾
Fenol	0,3	—	5,0	10,0	15,0	0,1 ⁽³⁾
Aldrin e Dieldrin	0,00125	—	0,5	1,0	5,0	0,03 ⁽¹⁾
DDT	0,0025	—	0,5	1,0	5,0	2 ⁽¹⁾
Endrin	0,00375	—	0,5	1,0	5,0	0,6 ⁽¹⁾
Lindano (d-BHC)	0,00125	—	0,5	1,0	5,0	2 ⁽¹⁾

1 - Padrão de Potabilidade da Portaria 1.469 do Ministério da Saúde para Substâncias que apresentam risco à saúde

2 - Padrão de Potabilidade da Portaria 1.469 do Ministério da Saúde para aceitação de consumo (critério organoléptico).

3 - Padrão de Potabilidade da Portaria 36 do Ministério da Saúde;

4 - Comunidade Econômica Européia

5 - Com base no valor de intervenção para solos no Cenário Agrícola/Área de Proteção Máxima (APMax)

— não estabelecido

APÊNDICE II – PADRÃO DE QUALIDADE PARA ÁGUA

DECRETO Nº 8.468, DE 8 DE SETEMBRO DE 1976

Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente

TÍTULO II

Da Poluição das Águas

SEÇÃO I

Dos Padrões de Qualidade

Art. 18 - Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nas coleções de água, desde que obedeam às seguintes condições:

I - pH entre 5,0 (cinco inteiros), e 9,0 (nove inteiros);

II - temperatura inferior a 40°C (quarenta graus Celsius);

III - materiais sedimentáveis até 1,0 ml/l (um milímetro por litro) em teste de uma hora em "cone imhoff";

IV - Substâncias solúveis em hexana até 100 mg/l (cem miligramas por litro);

V - DBO 5 dias, 20°C no máximo de 60 mg/l (sessenta miligrama por litro). Este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluentes de sistema de tratamento de águas residuárias que reduza a carga poluidora em termos de DBO 5 dias, 20°C do despejo em no mínimo 80% (oitenta por cento);

VI - concentrações máximas dos seguintes parâmetros:

a) - Arsênico - 0,2 mg/l (dois décimos de miligrama por litro);

b) - Bário - 5,0 mg/l (cinco miligramas por litro);

c) - Boro - 5,0 mg/l (cinco miligramas por litro);

d) - Cádmio - 0,2 mg/l (dois décimos de miligrama por litro);

e) - Chumbo - 0,5 mg/l (cinco décimos de miligrama por litro);

f) - Cianeto - 0,2 mg/l (dois décimos de miligrama por litro);

- g) - Cobre - 1,0 mg/l (um miligrama por litro);
- h) - Cromo hexavalente - 0,1 mg/l (um décimo de miligrama por litro);
- i) - Cromo total - 5,0 mg/l (cinco miligramas por litro);
- j) - Estanho - 4,0 mg/l (quatro miligramas por litro);
- k) - Fenol - 0,5 mg/l (cinco décimos de miligrama por litro);
- l) - Ferro solúvel (Fe^{2+}) - 15,0 mg/l (quinze miligramas por litro);
- m) - Fluoretos - 10,0 mg/l (dez miligramas por litro);
- n) - Manganês solúvel (Mn^{2+}) - 1,0 mg/l (um miligrama por litro);
- o) - Mercúrio - 0,01 mg/l (um centésimo de miligrama por litro);
- p) - Níquel - 2,0 mg/l (dois miligramas por litro);
- q) - Prata - 0,02 mg/l (dois centésimos de miligrama por litro);
- r) - Selênio - 0,02 mg/l (dois centésimos de miligrama por litro);
- s) - Zinco - 5,0 mg/l (cinco miligramas por litro).

VII - outras substâncias, potencialmente prejudiciais, em concentrações máximas a serem fixadas, para cada caso, a critério da CETESB;

(1) VIII - regime de lançamento com vazão máxima de até 1,5 (um vírgula cinco) vezes a vazão média diária.

§ 1º - Além de obedecerem aos limites deste artigo, os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características em desacordo com o enquadramento do mesmo, na Classificação das Águas.

§ 2º - Na hipótese de fonte de poluição geradora de diferentes despejos ou emissões individualizados, os limites constantes desta regulamentação aplicar-se-ão a cada um destes, ou ao conjunto após a mistura, a critério da CETESB.

§ 3º - Em caso de efluente com mais de uma substância potencialmente prejudicial, a CETESB poderá reduzir os respectivos limites individuais, na proporção do número de substâncias presentes.

(2) § 4º - Resguardados os padrões de qualidade do corpo receptor, a CETESB poderá autorizar o lançamento com base em estudos de impacto ambiental, realizado pela entidade responsável pela emissão, fixando o tipo de tratamento e as condições desse lançamento.

(1) **Art.19** - Onde houver sistema público de esgotos, em condições de atendimento, os efluentes de qualquer fonte poluidora deverão ser nele lançado.

(1) Com redação dada pelo Decreto nº 15.425, de 23.07.80

(2) Acrescentado pelo Decreto nº 15.425, de 23.07.80

§ 1º - Caso haja impossibilidade técnica de ligação ao sistema público, o responsável pela fonte de poluição deverá comprová-la perante a CETESB, mediante a apresentação de atestado nesse sentido, expedido pela entidade responsável pela operação do sistema, não se constituindo esse atestado condição definitiva para a não-ligação da fonte ao referido sistema.

§ 2º - Quando o sistema público de esgotos estiver em vias de ser disponível, a CETESB poderá estabelecer condições transitórias de lançamento em corpos de água, levando em consideração os planos e cronogramas aprovados pelo Governo Federal ou Estadual, eventualmente existentes.

§ 3º - Evidenciada a impossibilidade técnica do lançamento em sistema público de esgotos, os efluentes poderão, a critério da CETESB, ser lançados transitoriamente em corpos de águas, obedecidas às condições estabelecidas neste Regulamento.

§ 4º - A partir do momento em que o local onde estiver situada a fonte de poluição for provido de sistema público de coleta de esgotos, e houver possibilidade técnica de ligação a ele, o responsável pela fonte deverá providenciar o encaminhamento dos despejos líquidos à rede coletora.

(1) **Art. 19-A** - Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados em sistema de esgotos, provido de tratamento com capacidade e de tipo adequados, conforme previsto no _ 4º deste artigo se obedecerem às seguintes condições:

I - pH entre 6,0 (seis inteiros) e 10,0 (dez inteiros);

II - temperatura inferior a 40º C (quarenta graus Celsius);

III - materiais sedimentáveis até 20 ml/l (vinte mililitros por litro) em teste de 1 (uma) hora em "cone Imhoff";

IV - ausência de óleo e graxas visíveis e concentração máxima de 150 mg/l (cento e cinquenta miligramas por litro) de substâncias solúveis em hexano;

V - ausência de solventes gasolina, óleos leves e substâncias explosivas ou inflamáveis em geral;

VI - ausência de despejos que causem ou possam causar obstrução das canalizações ou qualquer interferência na operação do sistema de esgotos;

VII - ausência de qualquer substância em concentrações potencialmente tóxicas a processos biológicos de tratamento de esgotos;

VIII - concentrações máximas dos seguintes elementos, conjuntos de elementos ou substâncias:

a) - arsênico, cádmio, chumbo, cobre, cromo hexavalente, mercúrio, prata e selênio -1,5 mg/l (um e meio miligrama por litro) de cada elemento sujeitas à restrição da alínea e deste inciso;

b) - cromo total e zinco 5,0 mg/l (cinco miligramas por litro) de cada elemento, sujeitas ainda à restrição da alínea e deste inciso;

c) - estanho - 4,0 mg/l (quatro miligramas por litro) sujeita ainda à restrição da alínea e deste inciso;

d) - níquel - 2,0 mg/l (dois miligramas por litro), sujeita ainda à restrição da alínea e deste inciso;

e) - todos os elementos constantes das alíneas "a" a "d" deste inciso, excetuando o cromo hexavalente - total de 5,0 mg/l (cinco miligramas por litro);

(1) Acrescentado pelo Decreto nº 15.425, de 23.07.80

f) - cianeto - 0,2 mg/l (dois décimos de miligrama por litro);

g) - fenol -5,0 mg/l (cinco miligramas por litro);

h) - ferro solúvel - (Fe²⁺) -15,0 mg/l (quinze miligramas por litro);

i) - fluoreto -10,0 mg/l (dez miligramas por litro);

j) - sulfeto -1,0 mg/l (um miligrama por litro);

l) - sulfato -1000 mg/l (mil miligramas por litro).

IX - regime de lançamento contínuo de 24 (vinte e quatro) horas por dia, com vazão máxima de até 1,5 (uma vez e meia) a vazão diária;

X - ausência de águas pluviais em qualquer quantidade:

§ 1º - desde que não seja afetado o bom funcionamento dos elementos do sistema de esgotos, a entidade responsável pela sua operação poderá, em casos específicos, admitir a alteração dos valores fixados nos incisos IV e VIII, deste artigo, devendo comunicar tal fato à CETESB.

§ 2º - Se a concentração de qualquer elemento ou substância puder atingir valores prejudiciais ao bom funcionamento do sistema, à entidade responsável por sua operação será facultado, em casos específicos, reduzir os limites fixados nos incisos IV e VIII deste artigo, bem como estabelecer concentrações máximas de outras substâncias potencialmente prejudiciais, devendo comunicar tal fato à CETESB.

§ 3º - Se o lançamento dos efluentes se der em sistema público de esgotos, desprovido de tratamento com capacidade e de tipos adequados, serão aplicáveis os padrões de emissão previstos no artigo 18 e nos incisos V, VI, VIII, alíneas "j" e "l" e X, deste artigo, e, ainda, nas normas decorrentes deste Regulamento.

§ 4º - Para efeito de aplicação do disposto neste artigo, considera-se o sistema público de esgotos provido de tratamento com capacidade e de tipo adequados quando, a critério da CETESB, tal tratamento atender às finalidades pretendidas, ou existir plano e cronograma de obras já aprovados pelo Governo Federal ou Estadual.

(1) **Art. 19-B** - Os efluentes líquidos, excetuados os de origem sanitária, lançados nos sistemas públicos de coleta de esgotos, estão sujeitos a pré-tratamento que os enquadre nos padrões estabelecidos no artigo 19-A deste Regulamento.

Parágrafo Único - O lodo proveniente de sistemas de tratamento das fontes de poluição industrial, bem como o material proveniente da limpeza de fossas sépticas, poderá, a critério e mediante autorização expressa da entidade responsável pela operação do sistema, ser recebido pelo sistema público de esgotos, proíbe sua disposição em galerias de águas pluviais ou em corpos de água.

(1) **Art. 19-C** - Os efluentes líquidos provenientes de indústrias deverão ser coletados separadamente, através de sistemas próprios independentes, conforme sua origem e natureza, assim destinados:

I - à coleta e disposição final de águas pluviais;

II - à coleta de despejos sanitários e industriais, conjunta ou separadamente, e

III - às águas de refrigeração.

(1) Acrescentado pelo Decreto nº 15.425, de 23.07.80

§ 1º - Os despejos referidos no inciso II deste artigo, deverão ser lançados à rede pública através de ligação única, cabendo à entidade responsável pelo sistema público admitir, em casos excepcionais, o recebimento dos efluentes por mais de uma ligação.

§ 2º - A incorporação de águas de refrigeração dos despejos industriais só poderá ser feita mediante autorização expressa da entidade responsável pelo sistema público de esgotos, após verificação da possibilidade técnica do recebimento daquelas águas e o estabelecimento das condições para tal, vedada a utilização de água de qualquer origem com finalidade de diluir efluentes líquidos industriais.

(1) **Art. 19-D** - O lançamento de efluentes em sistemas públicos de esgotos será sempre feito por gravidade e, se houver necessidade de recalque os efluentes deverão ser lançados em caixa de quebra-pressão da qual partirão por gravidade para a rede coletora

(1) **Art. 19-E** - O lançamento de despejos industriais à rede pública de esgoto será provido de dispositivo de amostragem e/ou medição na forma estabelecida em normas editadas pela entidade responsável pelo sistema.

(1) **Art. 19-F** - Para efeito de aplicação das sanções cabíveis, as entidades responsáveis pelos sistemas públicos de esgotos comunicarão à CETESB as infrações constatadas, no tocante ao lançamento de despejos em suas respectivas redes em desconformidade com o estatuído neste Regulamento.

APÊNDICE III – PADRÃO DE QUALIDADE PARA AR

DECRETO Nº 8.468, DE 8 DE SETEMBRO DE 1976

**Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976,
que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da
Poluição do Meio Ambiente**

TÍTULO III
Da Poluição do Ar

CAPÍTULO I
Das Normas Para Utilização e Proteção do Ar

SEÇÃO I
Das Regiões de Controle de Qualidade do Ar

CAPÍTULO II
Dos Padrões

SEÇÃO I
Dos Padrões de Qualidade

Art. 29 - Ficam estabelecidos para todo o território do Estado de São Paulo os seguintes Padrões de Qualidade do Ar:

I - para partículas em suspensão:

a) - 80 (oitenta) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior - concentração média geométrica anual; ou

b) - 240 (duzentos e quarenta) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior - concentração média de 24 (vinte e quatro) horas consecutivas, podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano.

II - para dióxido de enxofre:

a) - 80 (oitenta) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior - concentração média aritmética anual; ou

b) - 365 (trezentos e sessenta e cinco) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior concentração média de 24 (vinte e quatro) horas consecutivas, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano.

III - para monóxido de carbono:

a) -10.000 (dez mil) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior - concentração da máxima média de 8 (oito) horas consecutivas, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano; ou

b) - 40.000 (quarenta mil) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior concentração da máxima média de 1 (uma) hora, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano.

IV - para oxidantes fotoquímicos: 160 (cento e sessenta) microgramas por metro cúbico, ou valor inferior concentração da máxima média de 1 (uma) hora, não podendo ser ultrapassada mais de uma vez por ano.

§ 1º - Todas as medidas devem ser corrigidas para a temperatura de 25°C (vinte e cinco graus Celsius) e pressão de 760 mm (setecentos e sessenta milímetros) de mercúrio.

§ 2º - Para a determinação de concentrações das diferentes formas de matéria, objetivando compará-las com os Padrões de Qualidade do Ar, deverão ser utilizados os métodos de análises e amostragem definidos neste regulamento ou normas dele decorrentes, bem como Estações Medidoras localizadas adequadamente, de acordo com critérios da CETESB.

§ 3º - A frequência de amostragem deverá ser efetuada no mínimo por um período de 24 (vinte e quatro horas) a cada 6 (seis) dias, para dióxido de enxofre e partículas em suspensão, e continuamente para monóxido de carbono e oxidantes fotoquímicos.

§ 4º - Os Padrões de Qualidade do Ar, para outras formas de matéria, serão fixados por decreto.

Art. 30 - Para os fins do parágrafo 2º do artigo anterior, ficam estabelecidos os seguintes métodos:

I - para partículas em suspensão: Método de Amostrador de Grandes Volumes, ou equivalente, conforme Anexo I deste Regulamento;

II - para dióxido de enxofre: Método de Pararosanilina ou equivalente, conforme Anexo 2 deste Regulamento;

III - para monóxido de carbono: Método de Absorção de Radiação Infravermelho não Dispersivo, ou equivalente, conforme Anexo 3 deste Regulamento;

IV - para oxidantes fotoquímicos (como Ozona): Método da Luminescência Química, ou equivalente, conforme Anexo 4 deste Regulamento.

Parágrafo Único - Consideram-se Métodos Equivalentes todos os Métodos de Amostragem de Análise que, testados pela CETESB, forneçam respostas equivalentes aos métodos de referência especificados nos Anexos deste Regulamento, no que tange às características de confiabilidade, especificidade, precisão, exatidão, sensibilidade, tempo de resposta, desvio de zero, desvio de calibração, e de outras características consideráveis ou convenientes, a critério da CETESB.

SEÇÃO II

Dos Padrões de Emissão

(1) **Art. 31** - Fica proibida a emissão de fumaça, por parte de fontes estacionárias, com densidade colorimétrica superior ao Padrão 1 da Escala de Ringelmann, salvo por:

I - um único período de 15 (quinze) minutos por dia, para operação de aquecimento de fornalha;

II - um período de 3 (três) minutos, consecutivos ou não, em qualquer fase de 1 (uma) hora

(2) **Parágrafo Único** - Em qualquer fase de 1 (uma) hora, quando da realização da operação de aquecimento de fornalha, o período referido no inciso II deste artigo já está incluído no período de 15 (quinze) minutos referido no inciso I

(3) **Art. 32** - Nenhum veículo automotor a óleo diesel poderá circular ou operar no território do Estado de São Paulo emitindo pelo tubo de descarga fumaça com densidade calorimétrica superior ao Padrão 2 da Escala Ringelmann, ou equivalente, por mais de 5 (cinco) segundos consecutivos, exceto para partida a frio.

(4) **§ 1º** - Caberá à CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental e à Polícia Militar do Estado de São Paulo sob a orientação técnica da CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, fazer cumprir as disposições deste artigo, impondo aos infratores as penalidades previstas no artigo 80 deste Regulamento.

(3) **§ 2º** - Não se aplica o disposto nos artigos 83, 87, 92, 94 e 98 deste Regulamento às infrações previstas neste artigo

(5) **§ 3º** - Constatada a infração, o agente credenciado da CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental ou da Polícia Militar lavrará, no ato, o Auto de Infração e imposição de penalidade de multa, contendo a identificação do veículo, o local, hora e data da infração e a penalidade aplicada.

(3) 1 - o recolhimento das multas aplicadas em decorrência deste parágrafo, deverá ser feito em qualquer agência do BANESPA S/A. - Banco do Estado de São Paulo, e na falta desta, junto à Caixa Econômica do Estado de São Paulo S/A.- CEESP, ou em estabelecimento bancário, autorizado, através de guia Modelo RD-1 - Multas de Trânsito em Código a ser definido.

(4) § 4º - As multas impostas por infração das disposições deste artigo serão publicadas no "Diário Oficial" do Estado, para ciência do infrator.

(4) § 5º - Não será renovada a licença de trânsito de veículo com débito de multas impostas por infração das disposições deste artigo.

(3) 1 - para controle das multas aplicadas em função do licenciamento dos veículos, será implantado um sistema integrado entre a CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Secretaria da Fazenda, Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo - PRODESP e o Departamento Estadual de Trânsito - DETRAN dará as informações necessárias."

Art. 33 - Fica proibida a emissão de substâncias odoríferas na atmosfera, em quantidades que possam ser perceptíveis fora dos limites da área de propriedade da fonte emissora.

(2) **Parágrafo Único** - A constatação da percepção de que trata este artigo será efetuada por técnicos credenciados da CETESB.

(1) Padrões Homologados pela Portaria SEMA nº 2, de 19.01.77

(2) Com redação dada pelo Decreto nº 15.425, de 23.07.80

(3) Com redação dada pelo Decreto nº 29.027, de 18.10.88

(4) Com redação dada pelo Decreto nº 28.313, de 04.04.88

(5) Com redação dada pelo Decreto nº 28.429, de 27.05.88

(2) **Art. 33-A** - Fica proibida a emissão de poluentes pelas fontes poluidoras existentes em 9 de setembro de 76, instaladas nos municípios da RCQA 1, em quantidades superiores aos padrões de emissão constantes do Anexo 6.

§ 1º - A CETESB poderá, a seu critério, exigir que as fontes de poluição referidas no "caput" deste artigo controlem suas emissões, utilizando a melhor tecnologia prática disponível ou se transfiram para outro local, quando situada em desconformidade com as normas municipais de zoneamento urbano ou com o uso do solo circunvizinho.

§ 2º - Os padrões de emissão constantes do Anexo 6 vigorarão pelo período mínimo de 10 (dez) anos, para as fontes de poluição que adotarem as medidas de controle necessárias para atendê-los.

(1) **Art. 33-B** - As fontes de poluição instaladas no Município de Cubatão e existentes em 9 de setembro de 1976, deverão observar os "Padrões de Emissão" constantes do Anexo 8, ficando proibida emissão de poluentes em quantidades superiores.

§ 1º - A CETESB poderá exigir que as fontes de poluição referidas neste artigo controlem suas emissões, utilizando a melhor tecnologia prática disponível, ou que se transfiram para outro local, quando situadas em desconformidade com as normas de zoneamento urbano ou sejam incompatíveis com o uso do solo circunvizinho.

§ 2º - Os sistemas de controle da poluição do ar deverão estar providos de instrumentos que permitam a avaliação de sua eficiência instalados em locais de fácil acesso para fins de fiscalização.

§ 3º - Caberá às fontes de poluição demonstrar a CETESB que suas emissões se encontram dentro dos limites constantes do Anexo 8.

Art. 2º - As fontes de poluição, a que se refere este Decreto deverão submeter à apreciação da CETESB, no prazo de 120 (cento e vinte) dias a contar da publicação, seus projetos de sistemas de controle dos poluentes e de equipamentos que possibilitem a aferição de sua eficiência operacional, acompanhados do respectivo cronogramas de implantação.

§ 1º - Os padrões de emissão constantes do anexo 8, vigorarão pelo período mínimo de 10 (dez) anos, contados da vigência deste Decreto, para as fontes de poluição que adotarem todas as medidas necessárias para atendê-lo

Art. 3º - O Anexo 8, referido neste Decreto, passa a integrar o Regulamento aprovado pelo Decreto n. 8.468, de 8 de setembro de 1976.

SEÇÃO III

Dos Padrões de Condicionamento e Projeto para Fontes Estacionárias

Art. 34 - O lançamento de efluentes provenientes da queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos deverá ser realizado através de chaminé.

Art. 35 - Toda fonte de poluição do ar deverá ser provida de sistema de ventilação local exaustora e o lançamento de efluentes na atmosfera somente poderá ser realizado através de chaminé, salvo quando especificado diversamente neste Regulamento ou em normas dele decorrentes.

(1) Acrescentado pelo Decreto 18.386, de 22.01.82, retificado em 01.04.82 e que dispõe em seus artigos 2º e 3º:

(2) Com redação dada pelo Decreto nº 15.425, de 23.07.80

Parágrafo Único - As operações, processos ou funcionamento dos equipamentos de britagem, moagem, transporte, manipulação, carga e descarga de material fragmentado ou particulado, poderão ser dispensados das exigências referidas neste artigo, desde que realizados a úmido, mediante processo de umidificação permanente.

Art. 36 - O armazenamento de material fragmentado ou particulado deverá ser feito em silos adequadamente vedados, ou em outro sistema de controle de poluição do ar de eficiência igual ou superior, de molde a impedir o arraste, pela ação dos ventos, do respectivo material

Art. 37 - Em áreas cujo uso preponderante for residencial ou comercial, ficará a critério da CETESB especificar o tipo de combustível a ser utilizado por novos equipamentos ou dispositivos de combustão.

Parágrafo Único - Incluem-se nas disposições deste artigo os fornos de panificação e de restaurantes e caldeiras para qualquer finalidade.

Art. 38 - As substâncias odoríferas resultantes das fontes a seguir enumeradas deverão ser incineradas em pós-queimadores, operando a uma temperatura mínima de 750°C (setecentos e cinquenta graus Celsius), em tempo de residência mínima de 0,5 (cinco décimos) segundos, ou por outro sistema de controle de poluentes, de eficiência igual ou superior:

I - torrefação e resfriamento de café, amendoim, castanha de caju e cevada;

II - autoclaves e digestores utilizados em aproveitamento de matéria animal;

III - estufas de secagem ou cura para peças pintadas, envernizadas ou litografadas;

IV - oxidação de asfalto;

V - defumação de carnes ou similares;

VI - fontes de sulfeto de hidrogênio e mercaptanas;

VII - regeneração de borracha.

§ 1º - Quando as fontes enumeradas nos incisos deste artigo se localizarem em áreas cujo uso preponderante for residencial ou comercial, o pós-queimador deverá utilizar gás como combustível auxiliar. Em outras áreas, ficará a critério da CETESB a definição do combustível.

§ 2º- Para efeito de fiscalização, o pós-queimador deverá estar provido de indicador de temperatura na câmara de combustão, em local de fácil visualização.

Art. 39 - As emissões provenientes de incineradores de resíduos sépticos e cirúrgicos hospitalares deverão ser oxidadas em pós-queimador que utilize combustível gasoso, operando a uma temperatura mínima de 850°C (oitocentos e cinqüenta graus Celsius e em tempo de residência mínima de 0,8 (oito décimos) segundos, ou por outro sistema de controle de poluentes de eficiência igual ou superior.

Parágrafo único - Para fins de fiscalização, o pós-queimador a que se refere este artigo deverá conter marcador de temperatura na câmara de combustão, em local de fácil visualização.

Art. 40 - As operações de cobertura de superfícies realizadas por aspersão, tais como pintura ou aplicação de verniz a revólver, deverão realizar-se em compartimento próprio provido de sistema de ventilação local exaustora e de equipamento eficiente para a retenção de material particulado.

Art. 41 - As fontes de poluição, para as quais não foram estabelecidos padrões de emissão, adotarão sistemas de controle de poluição do ar baseados na melhor tecnologia prática disponível para cada caso.

Parágrafo único - A adoção da tecnologia preconizada neste artigo, será feita pela análise e aprovação da CETESB de plano de controle apresentado por meio do responsável pela fonte de poluição, que especificará as medidas a serem adotadas e a redução almejada para a emissão.

Art. 42 - Fontes novas de poluição do ar, que pretendam instalar-se ou funcionar, quanto a localização, serão:

I - obrigadas a comprovar que as emissões provenientes da instalação ou funcionamento não acarretarão, para a Região ou Sub-Região tida como saturada, aumento nos níveis dos poluentes que as caracterizem como tal;

II - proibidas de instalar-se ou de funcionar quando, a critério da CETESB, houver o risco potencial a que alude o inciso V do artigo 3º deste Regulamento, ainda que as emissões

provenientes de seu processamento estejam enquadradas nos incisos I, II, III e IV do mesmo artigo.

§ 1º - Para configuração do risco mencionado no inciso II, levar-se-á em conta a natureza da fonte, bem como das construções, edificações ou propriedades, passíveis de sofrer os efeitos previstos no inciso V do artigo 39.

§ 2º - Ficará a cargo do proprietário da nova fonte comprovar, sempre que a CETESB o exigir, o cumprimento do requisito previsto no inciso I.