

OK



São Paulo
2004

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

**INDICADORES EXERCÍTIOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO
AMBIENTAL DE PROCESSOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA**

CARLOS HUMBERTO MORA BEJARANO

CARLOS HUMBERTO MORA BEJARANO

**INDICADORES EXERÉTICOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO
AMBIENTAL DE PROCESSOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA**

**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 Junior

São Paulo

2004

SUMÁRIO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	IMPACTO AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA	17
3	ANÁLISE EXERGÉTICA	21
3.1	ANÁLISE EXERGÉTICA	21
3.2	PROCESSOS REVERSÍVEIS E IRREVERSÍVEIS	22
3.3	EXERGIA	23
3.4	MEIO AMBIENTE	23
3.5	ESTADO DE REFERÊNCIA RESTRITO	24
3.6	ESTADO MORTO	24
3.7	COMPONENTES DA EXERGIA	24
3.8	BALANÇO DE EXERGIA	26
3.9	RENDIMENTO OU EFICIÊNCIA EXERGÉTICA	28
4	INDICADORES EXERGÉTICOS PARA A AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL	30
4.1	EFICIÊNCIA EXERGÉTICA AMBIENTAL ($\eta_{EXERG,AMB}$)	30
4.2	TAXA DE POLUIÇÃO TOTAL ($R^{POL,T}$)	32
5	ESTUDOS DE CASO	34
5.1	AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE CLORO E PVC	34
5.2	AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇO	38
5.2.1	Processo de produção de aço do alto forno tradicional com e sem injeção de carvão pulverizado	38
5.2.2	Processo de produção de aço convencional integrado, semi-integrado, novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio e do novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	42

5.3	AValiação e Comparação do Impacto Ambiental de uma Planta de Cogeração de uma Indústria de Celulose e Papel com uma Planta de Cogeração de uma Refinaria de Petróleo	47
5.4	AValiação do Impacto Ambiental de uma Refinaria de Petróleo	52
5.5	AValiação do Impacto Ambiental de Processos de Produção de Fertilizantes	54
5.6	AValiação do Impacto Ambiental de duas Estações de Tratamento de Esgoto	58
5.6.1	<i>Descrição das estações de tratamento de esgoto</i>	59
5.6.2	<i>Coleta e tratamento dos dados das Estações de Tratamento de Esgoto, ETEs</i>	62
	Coleta de dados da Estação de Tratamento de Esgoto Barueri	62
	Tratamento dos dados da ETE Barueri	64
	Coleta de dados da Estação de Tratamento de Parque Novo Mundo, ETE PNM	66
	Tratamento dos dados da ETE PNM	68
5.6.3	<i>Análise exergética da ETEs Barueri e Parque Novo Mundo</i>	70
	Exergias dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das Estações de Tratamento de Esgoto Barueri e Parque Novo Mundo	72
	Análise Exergética da ETE Barueri	74
	Análise exergética da ETE Parque Novo Mundo (PNM)	76
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	83
	ANEXO A - DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS BARUERI	90
	ANEXO B - TRATAMENTO BIOLÓGICO DE ESGOTOS POR Lodos ATIVADOS	97
	ANEXO C. DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARQUE NOVO MUNDO	100
	ANEXO D - PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS	109
	ANEXO E - PADRÕES DE EMISSÃO DE EFLUENTES	119
	ANEXO F - MEMORIAL DE CÁLCULO - ESTUDO DE CASO DAS ETEs BARUERI E PARQUE NOVO MUNDO	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação esquemática do impacto ambiental dos processos de conversão de energia (Makarytchev 1997)	11
Figura 3.1 Volume de controle	27
Figura 5.1 Balanço exergético do processo de produção de cloro	36
Figura 5.2 Balanço exergético do processo de produção de PVC	36
Figura 5.3 Balanço exergético e parâmetro ambiental do processo de produção de aço do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	40
Figura 5.4 Balanço exergético e parâmetro ambiental do processo de produção de aço do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	41
Figura 5.5 Balanço exergético do processo de produção de aço convencional integrado	43
Figura 5.6 Balanço exergético do processo de produção de aço semi-integrado	43
Figura 5.7 Balanço exergético do processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio	44
Figura 5.8 Balanço exergético do processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	44
Figura 5.9 Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível	48
Figura 5.10 Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível	49
Figura 5.11 Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	49

Figura 5.12 Balanço energético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível.....	49
Figura 5.13 Balanço energético de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo.....	50
Figura 5.14 Balanço energético e parâmetro ambiental para o caso da refinaria antes da otimização.....	53
Figura 5.15 Balanço energético e parâmetro ambiental para a refinaria após a otimização.....	53
Figura 5.16 Consumo de recursos e energia na produção de: (a) fertilizante CAN e, (b) fertilizante NPK. Fonte: Hovelius; Hansson (1999).....	55
Figura 5.17 Balanço energético do processo de produção do fertilizante CAN.....	56
Figura 5.18 Balanço energético do processo de produção do fertilizante NPK.....	57
Figura 5.19 Fluxograma do processo da ETE Barueri.....	60
Figura 5.20 Fluxograma do processo da ETE Parque Novo Mundo.....	62
Figura 5.21 Balanço energético da ETE Parque Novo Mundo.....	79
Figura 5.22 Balanço energético da ETE Barueri.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Efeitos potenciais do índice de eficiência energética no consumo de energia e nas emissões de CO ₂	5
Tabela 2.2 Valores da eficiência energética e dos índices de impacto ambiental para o processo de cogeração de potência e gás.....	13
Tabela 2.3 Emissões acumuladas de CO ₂ no ano 2100.....	19
Tabela 5.1 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para os processos de produção de cloro e PVC.....	36
Tabela 5.2 Valores dos índices de impacto ambiental para os processos de produção de cloro e PVC.....	37
Tabela 5.3 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para dois processos de produção de aço.....	39
Tabela 5.4 Valores dos parâmetros ambientais para dois processos de produção de aço.....	40
Tabela 5.5 Valores da eficiência energética ambiental, da taxa de poluição total e de outros parâmetros ambientais para dois processos de produção de aço.....	42
Tabela 5.6 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para quatro diferentes processos de produção de aço.....	43
Tabela 5.7 Eficiência energética, exergia das emissões no ar e dos rejeitos aquáticos para quatro processos de produção de aço.....	45
Tabela 5.8 Valores da eficiência energética ambiental, da taxa de poluição total e da eficiência energética para quatro processos de produção de aço.....	45
Tabela 5.9 Valores da eficiência energética ambiental e da taxa de poluição total para seis processos de produção de aço.....	46

Tabela 5.10	Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para cinco diferentes arranjos de uma planta de cogeração	48
Tabela 5.11	Parâmetros ambientais para quatro plantas de cogeração	50
Tabela 5.12	Valores da eficiência exergética ambiental, taxa de poluição total e de outros parâmetros ambientais para cinco plantas de cogeração	51
Tabela 5.13	Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para os dois casos da refinaria	52
Tabela 5.14	Valores da eficiência exergética ambiental, da taxa de poluição total e do parâmetro ambiental (emissões ambientais) para os dois casos da refinaria .	54
Tabela 5.15	Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para dois processos de produção de fertilizantes	56
Tabela 5.16	Valores da eficiência exergética ambiental e da taxa de poluição total para dois processos de produção de fertilizantes.....	57
Tabela 5.17	Etapas do projeto da ETE Parque Novo Mundo	61
Tabela 5.18	Dados da caracterização do esgoto bruto (arfluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Barueri	63
Tabela 5.19	Dados dos consumos e dos subprodutos gerados na ETE Barueri.....	64
Tabela 5.20	Dados da composição química do lodo desidratado gerado na ETE de Barueri	64
Tabela 5.21	Caracterização do esgoto bruto (arfluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Barueri	65
Tabela 5.22	Consumos e subprodutos gerados na ETE Barueri	65
Tabela 5.23	Composição química do lodo desidratado gerado na ETE de Barueri....	66

Tabela 5.24 Dados da caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo	67
Tabela 5.25 Dados dos consumos e dos subprodutos gerados na ETE do Parque Novo Mundo.....	68
Tabela 5.26 Dados da composição química do lodo desidratado gerado na ETE do Parque Novo Mundo	68
Tabela 5.27 Caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo.....	69
Tabela 5.28 Consumos e subprodutos gerados na ETE do Parque Novo Mundo	69
Tabela 5.29 Composição química do lodo desidratado gerado na ETE do Parque Novo Mundo.....	70
Tabela 5.30 Exergia química padrão dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das ETEs em kJ/g.....	73
Tabela 5.31 Exergia química padrão dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das ETEs em kJ/mol	73
Tabela 5.32 Fluxos de exergia associados ao esgoto bruto (afluente) e ao efluente final para a Estação de Tratamento de Esgotos Barueri.....	74
Tabela 5.33 Fluxos de exergia associados aos consumos e aos subprodutos gerados na ETE Barueri.....	75
Tabela 5.34 Fluxos de exergia do lodo desidratado gerado na ETE de Barueri.....	76
Tabela 5.35 Fluxos de exergia do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo	77
Tabela 5.36 Fluxos de exergia dos consumos na ETE do Parque Novo Mundo	78
Tabela 5.37 Fluxos de exergia do lodo desidratado gerado na ETE do Parque Novo Mundo	78

Tabela 5.38 Valores dos fluxos de energia de entrada, saída, destruída e perdida para as Estações de Tratamento de Esgoto do Parque Novo Mundo e Barueri	79
Tabela 5.39 Valores da eficiência exergetica ambiental e da taxa de poluição total para as Estações de Tratamento de Esgoto do Parque Novo Mundo e Barueri ..	80
Tabela 5.40 Valores da eficiência exergetica ambiental e da taxa de poluição total para as Estações de Tratamento de Esgoto do Parque Novo Mundo e Barueri ..	81
Tabela 6.1 Resumo comparativo dos valores da eficiência exergetica ambiental e da taxa de poluição total para os estudos de caso analisados.....	84
Tabela E-1 Classes de uso de corpos d'água	119
Tabela E-2 Limites dos parâmetros de qualidade de acordo com a Resolução CONAMA 20/86	120
Tabela E-3 Limites dos parâmetros de qualidade de acordo com o Decreto Estadual 8468/76.....	122
Tabela E-4 Limites de emissão conforme a Resolução CONAMA 20/86 e Decreto Estadual 8468/76	123
Tabela F-1 Cálculo do fluxo exergetico associado à vazão afluente da ETE Parque Novo Mundo.....	124
Tabela F-2 Cálculo do fluxo exergetico associado à vazão efluente da ETE Parque Novo Mundo.....	125
Tabela F-3 Cálculo do fluxo exergetico associado à vazão afluente da ETE Barueri	126
Tabela F-4 Cálculo do fluxo exergetico associado à vazão efluente da ETE Barueri	127
Tabela F-5 Cálculo do fluxo exergetico associado ao lodo desidratado produzido na ETE Parque Novo Mundo	128

Tabela F-6 Cálculo do fluxo exergético associado ao lodo desidratado produzido na ETE Barueri..... 129

LISTA DE ABBREVIATURAS E SIGLAS

CIPC	Conferência Internacional pela Mudança Climática
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>a</i>	atividade
<i>b</i>	exergia específica (kJ/kg)
<i>B</i>	fluxo de exergia (kW)
<i>DBO</i>	demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)
<i>DQO</i>	demanda química de oxigênio (mg/L)
<i>g</i>	aceleração da gravidade (m ² /s)
<i>h</i>	entalpia específica (kJ/kg),
<i>H</i>	fluxo de entalpia (kJ/s)
<i>m</i>	massa (kg)
<i>n_i</i>	número de moles da espécie <i>i</i>
<i>NTK</i>	nitrogênio kjeldahl (mg/L)
<i>p</i>	pressão (bar)
\dot{Q}	taxa de calor (kJ/s)
<i>R</i>	constante do(s) Gás(es) (l/ mol K); taxa de recurso
<i>s</i>	entropia específica (kJ/kgK)
<i>S</i>	entropia (kJ/K)
<i>SS</i>	sólidos em suspensão (mg/L)
<i>SST</i>	sólidos em suspensão total (mg/L)
<i>SSV</i>	sólidos em suspensão voláteis (mg/L)
<i>ST</i>	sólidos totais (mg/L)
<i>T</i>	temperatura (K)
<i>U</i>	fluxo de energia interna (J)

Símbolos Latinos

v velocidade (m/s)

ν volume específico (m³/kg),

V volume (m³)

W trabalho (kJ)

x_i fração molar do componente i

z elevação (m)

Simbolos Gregos

Δ variação

ξ exergia

η eficiência exergética

μ potencial químico (J/mol)

σ entropia produzida (kJ/K)

Subscritos

amb ambiental

cin cinética

desat desativação

e entrada, externo

exerg exergético

f física

n referência padrão para cálculo de exergia

o referência para cálculo da exergia

prep preparação

pot potencial

prod,final cinética

qui química

rec,nat recursos naturais

rej rejeitos

remoç remoção

s saída

Superscrito

– molar

s sistema

* estado de referência restrito

. taxa de variação temporal

o referencial/ estado de referência padrão

RESUMO

O impacto ambiental associado aos processos de conversão de energia é hoje uma preocupação mundial devido às mudanças drásticas nos ecossistemas do planeta, provocadas por diversos fenômenos atmosféricos que surgem como resultado de tal impacto. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o impacto ambiental dos processos de conversão de energia a partir dos dados gerados pela análise exergética, calculando e aplicando índices de impacto ambiental para diferentes tipos de processos.

Neste trabalho propõe-se a eficiência exergética como um índice de impacto ambiental, que compreende os aspectos de rendimento energético e impacto ambiental dos processos de conversão de energia. Além da eficiência exergética ambiental é usada a taxa de poluição total para avaliar o impacto ambiental destes processos.

Para testar o método proposto, foram levantados dados na literatura e a partir deles os parâmetros de impacto ambiental foram calculados. Finalmente, foi aplicada a metodologia da análise do impacto ambiental a duas Estações de Tratamento de Esgoto.

A análise dos resultados mostrou que este método pode ser usado para quantificar o desempenho ambiental e, posteriormente, ser empregado como uma função objetivo para otimizar o desempenho ambiental dos processos.

ABSTRACT

The environmental impact associated to the energy conversion processes is, nowadays, a world concern due to the drastic changes in our planet ecosystems, caused by some atmospheric phenomena that arise as result of that impact. This work evaluates the environmental impact of the energy conversion processes based on data generated by the exergetic analysis, calculating and applying environmental impact indexes for different types of processes.

In this work it is proposed the exergetic efficiency as an environmental impact index that contains the aspects of energetic efficiency and environmental impact of the energy conversion processes. Besides the environmental exergetic efficiency it is used the total pollution rate to evaluate the environmental impact of these processes.

To test the proposed method, were data lifted up in the literature and starting from them the environmental impact parameters were calculated. Finally, the methodology of the environmental impact analysis was applied to two Wastewater Treatment Plants.

The analysis of the results have shown that this method can be used to quantify the environmental performance and, later, to be used as an objective function to optimize the environmental performance of the processes.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas ambientais crescem continuamente. Um número significativo destes é causado ou relacionado à produção, transformação e uso final da energia. Entre estes problemas destacam-se: o esgotamento dos recursos naturais, o efeito estufa, a chuva ácida, bem como os impactos sobre a camada de ozônio. O impacto ambiental das emissões e rejeitos associados aos processos de conversão de energia é reduzido pelo aumento da eficiência da utilização das fontes de energia.

Os processos de conversão de energia são os grandes responsáveis pela exploração dos recursos naturais e da poluição dos ecossistemas terrestres. Conforme dados da OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), no final da última década, o setor industrial nos países desenvolvidos foi responsável por 50% do efeito estufa, por 40 a 50% das emissões de óxido de enxofre e por 25% das emissões de óxido de nitrogênio. Em relação à poluição da água a indústria é responsável por 60% da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pela presença de material em suspensão e por 90% dos resíduos tóxicos na água, além do despejo de 75% do lixo orgânico (SEBRAE, 1996, apud; Benvenuti; Frank, 2000).

Alguns pesquisadores têm sugerido que a quantificação desse impacto pode ser melhor conduzida pelo emprego do conceito de exergia (Rosen; Dincer (1997); Dincer; Rosen (1998); Gong (1999); Rosen; Dincer (2001); Rosen (2002); Wall; Dincer; Rosen (1998); Gong (1999); Rosen; Dincer (2001); Rosen (2002); Wall; Gong (2001); Wall (2002)). Outros foram além e calcularam esse impacto baseando-se na exergia (Bastanoni (1998); Botero (2000); Costa; Schaeffer; Worrell (2001); Creys; Carey (1997); Gong; Wall (2001); Makarytchev (1997); Petela; Hutny; Price (2002); Rosen; Dincer (1999); Szargut (2002); Valero; Arauzo (1991)). Segundo Szargut (1988), a exergia é definida como a quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, por meio de processos reversíveis envolvendo interação apenas com esses componentes.

A exergia é apropriada como uma medida comum da qualidade da matéria-prima e dos fluxos, e como uma medida de emissões desperdiçadas e de seu potencial para causar prejuízos ambientais. Makarytchev (1997), apresentou uma avaliação do

impacto ambiental da cogeração de um gás combustível e de potência elétrica a partir do carvão, usando os dados gerados pela análise exergética para quantificar esse impacto em termos de índices de eficiência ambiental e riscos.

Nessa linha de pesquisa, e com o objetivo de avaliar quantitativamente o impacto ambiental dos processos de conversão de energia a partir dos dados gerados pela análise exergética, neste trabalho são definidos e calculados índices de impacto ambiental que englobam aspectos de eficiência exergética e ambiental para diferentes tipos de processos. Para testar o método proposto, os dados foram levantados na literatura e a partir deles os parâmetros do impacto ambiental foram calculados. Finalmente, como uma aplicação do método proposto, foi realizado um estudo de caso de duas Estações de Tratamento de Esgoto. Este método pode ser uma ferramenta útil na procura da otimização do desempenho ambiental de processos que envolvem conversão de energia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Diversos autores têm estudado o desenvolvimento das teorias biofísicas que ligam as teorias termodinâmicas e a energia com seu entorno. No século XIX, Carnot escreveu sua memória sobre a eficiência das máquinas de vapor. Posteriormente, Clausius deu à primeira e segunda leis da termodinâmica sua formulação clássica com as que se formaliza o nascimento da Termodinâmica. Por outro lado, Podolinski apud Botero (2000) tentou medir a relação entre a energia usada e a obtida na agricultura, considerando o fluxo da energia fornecida pelo sol (Martínez; Aliet; Schlupmann 1992 apud Botero 2000).

A análise do fluxo de energia de Podolinski apud Botero (2000) foi usada posteriormente por vários autores como Cottrell (1955) apud Botero (2000), Odum (1971) apud Botero (2000), Pimentel (1974) apud Botero (2000) e Cleveland (1984) apud Botero (2000) para desenvolver outras teorias. Posteriormente, no início do século XX, Soddy (1926) apud Botero (2000), aplicou as leis da termodinâmica ao processo econômico, enfatizando que a energia solar é a que possibilita todos os processos de vida. Soddy apud Botero (2000) afirmou que a riqueza real estava presente num fluxo de energia solar que era consumida ao chegar na terra e esta não podia ser realmente acumulada, era uma energia incorporada em certos objetos sujeita à segunda lei.

No início do século XX, apareceram os escritos de Lotka apud Botero (2000) nos quais propôs que o processo de evolução combinado com as leis da termodinâmica formava uma lei natural que explicava todo o comportamento humano. Para Lotka apud Botero (2000), a sobrevivência estava governada pelas leis da termodinâmica, porque só os organismos mais eficientes para capturar a energia disponível (energia) e transformá-la, conseguiriam conservar sua espécie.

Cottrell (1955) apud Botero (2000), assim como Lotka afirmava que os organismos capturam a energia radiante do sol como um meio que os permite manter os padrões que os diferenciam uns dos outros, e que a seleção natural favorece aqueles que podem maximizar a absorção de fluxos energéticos através de seus sistemas.

Um dos ensaios mais famosos que relacionou o tema econômico e a termodinâmica foi realizado por Kenneth Boulding (1966) apud Botero (2000), denominado 'The Economics of the Coming Spaceship Earth' (A economia da nave espacial Terra), no qual apresentava a Terra como uma grande nave espacial que ia realizar uma longa viagem com uma fonte de energia externa: a energia solar. Dita nave teria um volume determinado de recursos antes de partir, mas na medida que estes recursos se esgotassem também se esgotariam as esperanças de vida daqueles que estariam dentro da nave, a não ser que encontrassem algum modo de reciclar a água, os materiais e gerar seu próprio alimento (Botero 2000).

A explicação de porque não é possível reciclar todos os resíduos é dada pela segunda lei da termodinâmica. Boulding (1966) não diz nada a respeito, foi Nicolas Georgescu Roegen (1971) quem deu relevância econômica à segunda lei, afirmando que podem ser reciclados alguns rejeitos gerados pela economia, mas a energia não pode ser reciclada.

Nos anos 70, devido às crises do petróleo, incrementou-se a pesquisa dedicada a explicar as relações entre o meio ambiente, energia e a economia. Uns dos trabalhos que mais impacto causou foi realizado por Georgescu-Roegen (1971) apud Botero (2000), matemático romeno nascido em 1906, que publicou sua obra 'The Entropy Law and the Economic Process'. No seu trabalho, ele enfatizava que a matéria esta sujeita a uma dissipação irrevogável.

Também no início dos anos 70 apareceram obras importantes que apresentavam a relação dos fluxos de energia com o entorno no qual eles ocorrem. Uma delas foi a de Odum (1971) apud Botero (2000), que desenvolveu uma metodologia sistemática usando os fluxos de energia para analisar o sistema combinado homem e natureza. Odum combinou as teorias da seleção natural de Darwin e a hipótese de Lotka da seleção natural como um processo de maximização energética numa 'lei geral da energia': este critério da seleção natural é a maximização do trabalho útil obtido a partir de uma transformação energética (Botero 2000).

Odum (1971) apud Botero (2000), propôs o termo "emergia" para realizar a contabilidade energética e o definiu como o trabalho investido na obtenção de um

produto ou um serviço. A energia é uma medida da energia gasta no passado, “*uma memória da energia*”. A análise de energia é uma técnica de análise quantitativa que permite determinar os valores, dos recursos e dos produtos em unidades comuns de joules de energia solar, “*joules solares*”. Este método de avaliação é válido para o caso dos recursos renováveis (aqueles nos quais a radiação solar está ligada à sua produção), enquanto que no caso dos recursos não renováveis como os minerais nos quais a radiação solar não está ligada à sua produção, a análise energética torna-se muito mais complexa porque é necessário considerar as energias relacionadas aos ciclos sedimentários e à formação das camadas da crosta terrestre (Botero 2000).

Em uma outra aplicação dos conceitos termodinâmicos na solução dos problemas ambientais Phylipson et al. (2002), definiram o índice de eficiência energética (EEI), como a razão do consumo de energia específica atual pelo consumo de energia específica da melhor tecnologia de referência, para avaliar o efeito de um acordo do governo Holandês com sua indústria. O acordo propõe que a indústria holandesa se comprometa a atingir a maior eficiência energética existente entre os outros países do mundo, e o governo se abstém de incrementar políticas climáticas adicionais. Os resultados dos efeitos potenciais deste acordo no consumo de energia e nas emissões de CO₂, para o ano 2012 são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Efeitos potenciais do índice de eficiência energética no consumo de energia e nas emissões de CO₂

SECTOR	Aumento do Índice de eficiência energética (%/ano)	Economia energética (PJ)	Redução de emissões de CO ₂ (Mt)
Amônia	0,2 - 0,5	10-22	0,3-1,1
Etileno	0,5	17-21	1,3-1,6
Ferro e Aço	0,2 - 0,5	0	0
Eletricidade (gás)	53 - 55	-4* - 50	-0,6* - 2,8
Eletricidade	39	30 - 37	2,9-3,6
Total	-	48 - 130	4-9

* o número negativo indica um aumento no consumo de energia ou nas emissões quando o crescimento da produção excede em valor a melhoria da eficiência energética.

Da análise destes resultados, Phylipsen et al. (2002) concluíram que as reduções alcançadas em termos de consumo de energia e emissões de CO₂, são menores que aquelas obtidas de uma continuação de políticas existentes de acordos a longo prazo.

Chen et al. (2004) apresentaram uma otimização ecológica para máquinas térmicas irreversíveis de Carnot. Eles consideraram como função objetivo, o critério de otimização ecológica proposto por Angulo-Brown (1991), com a modificação proposta por Yan (1993) apud Chen et al. (2004). O critério ecológico proposto por Angulo-Brown (1991), definido como $E' = P - T_L \sigma$, onde T_L é a temperatura do reservatório térmico de baixa temperatura, P é a potência produzida e σ é a taxa de geração de entropia. Yan (1993) apud Chen et al. (2004) mostrou que se era usada a temperatura do ambiente T_0 , o resultado do critério era mais razoável, $E = P - T_0 \sigma$, onde o termo $T_0 \sigma$ representa a perda de potência que é produzida pela geração de entropia no sistema e seus arredores (exergia destruída). A partir deste último critério Chen et al. (2004) otimizaram a função ecológica e validaram esta metodologia por meio de um exemplo numérico. Da análise dos resultados observaram que a otimização da função ecológica faz diminuir grandemente a taxa de geração de entropia do ciclo e aumentar a eficiência térmica com uma pequena diminuição da potência produzida, assim concluíram que a otimização da função ecológica não só representa um acordo entre a potência produzida e a taxa de geração de entropia mas também entre a potência produzida e a eficiência térmica.

A preocupação pela busca da efetividade, do aumento da eficiência e da redução de custos no projeto e operação de um sistema de energia levou os pesquisadores a procurar entender as causas reais das ineficiências e o custo real das fontes de energia. Neste contexto surgiram as primeiras pesquisas sobre o desenvolvimento da análise de exergia, que foi iniciado por Bosjakovic. O termo “*exergia*” foi criado por Kant como uma nova palavra para definir a “capacidade de trabalho”, expressão esta utilizada inicialmente por Bosjakovic (Tsatsaronis 1993). Kant (1956) apud Oliveira (1996), definiu a exergia como a parte da energia que pode ser completamente convertida em qualquer outra forma de energia.

Embora o método da análise de exergia seja considerado como um método moderno para a análise dos sistemas de energia, os seus fundamentos básicos foram introduzidos no século XIX seguindo a formulação matemática da segunda lei da termodinâmica, e de conceitos termodinâmicos introduzidos por Clausius, Tait, Thomson, Gibbs e Maxwell (Tsatsaronis 1993). A partir desses primeiros trabalhos surgiram diversas linhas de pesquisa que estudaram os problemas ambientais e suas ligações com as atividades humanas desde o ponto de vista da termodinâmica. Tribus; McIrvine (1971) apud Rosen; Dincer (1997) sugeriram a realização de uma análise exérgica dos processos naturais que acontecem na Terra para formar uma base para elaborar um planejamento ecológicamente confiável, e por meio dessa base indicar a distorção causada no meio ambiente por mudanças em escala global.

Já na década dos 80 alguns pesquisadores sugeriram que a quantificação do impacto ambiental dos processos de conversão de energia podia ser feita pelo emprego do conceito de exergia, e que a melhor forma para unir a segunda lei e o impacto ambiental era por meio da exergia porque esta é uma medida do desvio do estado termodinâmico de um sistema em relação ao estado termodinâmico do ambiente (Szargut (1980); Edgerton (1982) apud Rosen; Dincer 1997).

Talvez a melhor definição de exergia tenha sido dada por Szargut (1988), que a definiu como a quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, por meio de processos reversíveis envolvendo interação apenas com os componentes do meio ambiente.

Durante a década dos 90 existiram várias propostas interessantes que relacionam as teorias da termodinâmica e o meio ambiente. Uma delas é a de Valero; Arauzo (1991). No seu trabalho eles quantificaram uma diminuição na exergia química dos combustíveis fósseis da terra como consequência do aumento da temperatura, devido ao efeito estufa; os resultados obtidos mostraram que um combustível fóssil tem uma redução entre 0,31 a 0,38% da sua exergia se a concentração atmosférica de CO₂ é duplicada.

Outros trabalhos importantes sobre a relação entre a termodinâmica e a sustentabilidade são os de Ayres; Martinás (1997) e Ayres (1998). Estes propuseram a exergia como uma medida agregada do fluxo de recursos naturais assim como dos resíduos gerados pelo subsistema econômico, visto que é uma função que pode ser calculada tanto para os recursos energéticos como para os não energéticos.

Em 1996, a partir dos trabalhos desenvolvidos por Szargut (1988) (onde ele definiu um ambiente de referência que permite calcular a exergia química para qualquer substância, a partir de dados físicos e químicos), Ayres (1996) propôs efetuar uma contabilidade ao longo do ciclo de vida dos processos e os produtos, e calcular a exergia usada e perdida como uma medida da eficiência técnica, com a qual é convertida a exergia contida nos recursos naturais em serviços finais. Eles calcularam os valores de exergia para dois processos, um de produção de cloro e o outro de produção de PVC e apresentaram os resultados por meio da análise de ciclo de vida. Os resultados permitiram concluir que a exergia é apropriada para usos estatísticos gerais, como uma medida comum da qualidade da matéria-prima e dos fluxos, e como uma medida das emissões desperdiçadas e de seu potencial para causar prejuízos ambientais.

O ciclo de vida é definido pela Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) como “um processo para avaliar as cargas ambientais associadas com um produto, processo, ou atividade, pela identificação e quantificação da energia e materiais usados e dos desperdícios liberados ao ambiente; para avaliar o impacto de aquelas energias e materiais usados e liberados ao ambiente; e para identificar e avaliar as oportunidades para melhorar os efeitos ambientais”. A essência da análise do ciclo de vida é comparar as entradas e saídas de um processo, sistema ou produto, desde seu lugar de origem até seu uso final.

Durante a década de 90 foram apresentados enfoques relacionados com os fluxos de materiais nos processos, produtos e setores industriais. Entre estes encontram-se a Ecologia Industrial, que se centra no papel que pode desempenhar a indústria para reduzir a carga ambiental, analisando o ciclo de vida desde a extração das matérias-primas pela produção de bens e serviços, o uso destes bens e o manejo final dos

resíduos. Entre os tópicos que trata esta metodologia encontram-se os estudos de fluxo de energia e materiais, a Análise do Ciclo de Vida, os parques eco-industriais (simbioses industriais) e as políticas ambientais orientadas aos produtos.

As pesquisas mais relevantes sobre as relações entre a energia e as questões ambientais apareceram a partir da década de 90. Anaya et al. (1990) apresentaram uma análise exergética de uma refinaria de petróleo, realizada para otimizar seu rendimento. Uma vez feita a otimização, foram propostas algumas modificações para melhorar o rendimento dos equipamentos que compõem a refinaria, o que levou a uma considerável economia no consumo de combustível e, por conseguinte, a uma redução na emissão de poluentes para o ambiente. Nesse mesmo ano, Wall (1990) apresentou o conceito de energia como uma ferramenta para a contabilidade de recursos. Ele descreveu os processos de conversão de energia, na sociedade japonesa, em termos de energia assim como também mostrou as perdas de energia nestas conversões.

Posteriormente, Näsholm; Svedberg; Westermarck (1993) fizeram uma análise exergética de quatro diferentes arranjos de uma planta de cogeração, utilizada na indústria de celulose e papel, para determinar, entre as configurações estudadas, qual era aquela que produzia a mais alta eficiência exergética e eficiência energética total. Este estudo mostrou o efeito da utilização de um ciclo combinado assim como de um secador de combustível no cálculo da eficiência.

Na linha da ecologia, Zhou; Ma; Himman (1996) apresentaram uma análise exergética ecológica, na qual a energia foi usada como uma medida da qualidade da energia, para descrever os processos físico-químicos nos organismos. Partindo das equações de balanço de energia para uma planta e um animal, definiram a “eficiência exergética ecológica” como um índice para avaliar a performance termodinâmica de diferentes processos ecológicos. Zhou; Ma; Himman (1996) propuseram quatro índices de eficiência exergética ecológica:

a) “eficiência exergética do processo ecológico de um animal”, definida como $\eta_e' = (E_p + E_R + E_F + E_Q)/E_i$, onde E_p é a energia contida nos processos de produção exergética do animal, E_R é a energia associada à respiração, E_F é a

exergia associada aos processos de excreção (fezes e urina), E_Q é a exergia associada à troca térmica do animal com seu ambiente e E_I é a exergia associada ao processo de ingestão do alimento;

b) “eficiência exergética de assimilação” definida como $\eta^c = (E_p + E_R)/E_I$, este índice mede a habilidade dos organismos para assimilar a exergia;

c) “eficiência exergética de produção” definida como $\eta^s = E_p/(E_I - E_p - E_Q)$, este índice mede a habilidade dos organismos para produzir exergia, e;

d) “eficiência exergética de respiração” definida como $\eta^f = E_R/(E_I - E_p - E_Q)$, este índice expressa a fração da exergia assimilada que os organismos usam para manter as atividades da vida.

Finalmente, concluíram que o índice η^c pode ser usado como uma função objetivo na otimização termodinâmica de um ecossistema, e que o método desenvolvido é uma ferramenta útil nas pesquisas de fluxo e produção de exergia em sistemas biológicos.

Em 1997 apareceram vários trabalhos que explicavam as relações entre a exergia e o impacto ambiental dos processos de conversão de energia. Um destes trabalhos foi feito por Rosen; Dincer (1997) onde apresentaram três relações entre a exergia e o impacto ambiental: a destruição da ordem/criação do caos, a degradação dos recursos naturais e as emissões da exergia dos rejeitos. Neste trabalho eles concluíram que a utilidade potencial da análise exergética na direção e solução de problemas ambientais é de grande importância.

Nesse mesmo ano, Makarytchev (1997) apresentou uma análise de segunda lei para avaliar os impactos ambientais da cogeração de um gás combustível e potência elétrica a partir do carvão. A análise foi baseada na evolução do ciclo de vida da exergia contida em vetores energéticos envolvidos no processo. O impacto ambiental foi quantificado em termos de índices de eficiência ambiental e riscos. Os riscos específicos associados com o processo foram avaliados e comparados para carvões com baixo e alto conteúdo de enxofre. Nesse trabalho, foi apresentado o impacto global dos processos por meio da preparação dos recursos naturais e da desativação

dos rejeitos do processo. A preparação dos recursos envolve a exergia dos recursos naturais consumida pela indústria ou processo (esta inclui a exergia do combustível, ar, água de alimentação e de todas as entradas exergéticas) e o trabalho requerido para a extração e preparação destes recursos. A desativação dos rejeitos envolve a exergia dos rejeitos (a qual inclui as exergias do gás de chaminé, rejeitos sólidos e do calor rejeitado), a exergia destruída dos recursos adicionais durante sua desativação, e o trabalho relacionado a sua remoção, todos estes termos aparecem na Figura 2.1.

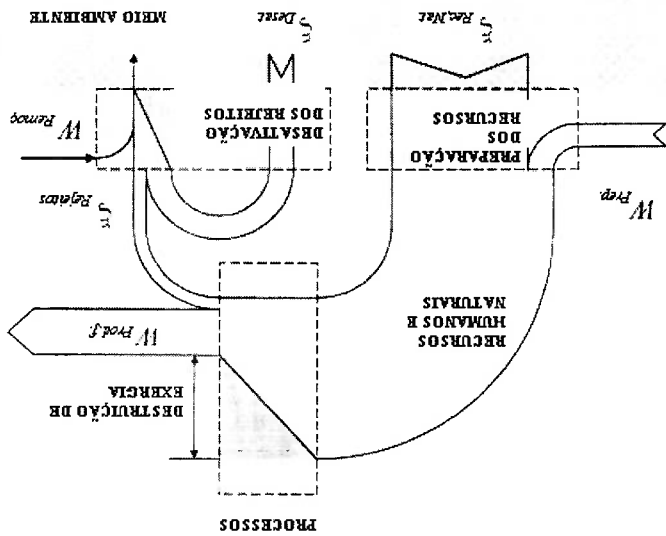


Figura 2.1 Representação esquemática do impacto ambiental dos processos de conversão de energia (Makarytchev 1997)

Para a análise do impacto ambiental, Makarytchev (1997), definiu três índices de impacto ambiental, a saber: a taxa de recurso (R_{rec}), a eficiência ambiental (M_{amb}), e a taxa de poluição total (R_{poli}). A taxa de recurso (R_{rec}), que é o índice para o consumo global dos recursos, foi definido como a razão da exergia total consumida pelos recursos humanos e naturais pela exergia do efeito útil, de acordo com a eq. (2.1):

$$R_{rec} = \frac{W_{Prod, final}}{\zeta_{Rec, nat} + W_{Prep} + \zeta_{Desat} + W_{Remoç}} \quad (2.1)$$

onde:

$\xi_{Rec, Nat}$ = exergia dos recursos naturais consumida pelos processos.

W_{Prp} = trabalho requerido para extração e preparação dos recursos naturais.

W_{Remoc} = trabalho relacionado à remoção dos rejeitos do processo.

$W_{Prod, final}$ = trabalho produzido ou o efeito útil de um processo.

ξ_{Desat} = exergia dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos rejeitos.

A eficiência ambiental (η_{amb}), que é o inverso da taxa de recurso, isto é, a razão da exergia do efeito útil pela exergia total consumida dos recursos humanos e naturais. A eficiência é calculada de acordo com a eq. (2.2):

$$\eta_{amb} = 1/R_{rc} \quad (2.2)$$

É a taxa de poluição total (R_{pol}), que é um índice de risco ambiental que caracteriza a destruição da exergia no ambiente incluindo o processo de desativação dos rejeitos do processo, e é definido como a razão entre a exergia destruída e a exergia do efeito útil de um processo. A taxa de poluição total pode ser decomposta em termos de componentes físico e químico pela divisão apropriada da exergia dos rejeitos do processo. A taxa de poluição física quantifica o efeito prejudicial da remoção dos rejeitos para temperaturas e pressões diferentes do ambiente. A taxa de poluição química é uma medida da capacidade dos rejeitos para reagir com os componentes do ambiente natural enquanto atinge o equilíbrio químico com o ambiente. Se a quantidade e a composição química dos rejeitos do processo são conhecidas, a taxa de poluição pode ser decomposta para identificar e avaliar os riscos associados com componentes específicos dos rejeitos ou com uma substância ou poluente de interesse. A taxa de poluição total é calculada de acordo com a eq. (2.3):

$$R_{pol} = \frac{W_{Prod, final}}{\xi_{Rej} + \xi_{Desat}} \quad (2.3)$$

onde:

ξ_{rej} = energia dos rejeitos do processo que envolve as exergias dos rejeitos sólidos, do calor rejeitado e das emissões.

Makarytchev (1997) apresentou a avaliação ambiental em termos dos índices do impacto ambiental, definidos acima, considerando o efeito do conteúdo de enxofre no carvão. Ele concluiu que as análises exergéticas dos impactos ambientais fornecem uma abordagem coerente com as avaliações do consumo de recursos e taxas de poluição ambiental, permitindo uma avaliação ambiental diferente da abordagem termoeconômica. Os resultados da análise são apresentados e comparados na Tabela 2.2, que mostra os valores dos índices do impacto ambiental para um suprimento de carvão de alto e baixo conteúdo de enxofre.

Tabela 2.2 Valores da eficiência exergética e dos índices de impacto ambiental para o processo de geração de potência e gás

Índice ambiental		Processo			
		η_{amb}	$R_{pol,fisica}$	$R_{pol,quimica}$	$R_{pol,total}$
Carvão de baixo – S(0,76%)	0,408	0,035	0,102	0,137	
Carvão de alto – S(3,77%)	0,391	0,029	0,122	0,151	

Na Tabela 1, observa-se que o processo de cogeração que usa o carvão de baixo conteúdo de enxofre como combustível é aquele que causa o menor prejuízo ao ambiente, devido a que apresenta a maior $\eta_{amb} = (0,408)$ e a menor $R_{pol,total} (0,137)$.

Creyts; Carey (1997) apresentaram o conceito de exergia estendida, a qual definiram como o mínimo trabalho possível requerido para trazer um sistema de seu estado inicial até um estado de referência ambientalmente aceitável. Eles utilizaram a análise exergética como uma ferramenta para avaliar o impacto ambiental dos processos industriais, calculando a exergia que deve ser adicionada no tratamento dos rejeitos dos processos, para diminuir o impacto destes sobre o ambiente. E concluíram que a análise exergética estendida em combinação com bases de dados

permite ao projetista integrar objetivamente critérios ambientais nos estágios do planejamento do projeto industrial.

Na linha da ecologia industrial, Dincer, Rosen (1998) apresentaram as relações entre estratosférico e o efeito estufa) e os conceitos de exergia, ambiente e desenvolvimento sustentável. Da análise dessas relações concluíram que, para os processos de conversão de energia, é necessário implementar medidas que levem ao aumento da eficiência exergética, à estabilização ou redução dos gases efeito estufa e à substituição de combustíveis fósseis.

Também Bastianoni (1998), combinando a teoria de Odum com o conceito de exergia, apresentou uma definição de poluição de sistemas ecológicos, baseada na definição de duas funções objetivo termodinâmicas: a exergia que definiu como uma medida do grau de organização de um sistema e representa a energia bioquímica do sistema; e a energia considerando o conceito de energia proposto por Odum, definida como a quantidade total de energia solar diretamente ou indiretamente requerida para gerar um produto ou um serviço. Bastianoni (1998) definiu a razão do fluxo de exergia pelo fluxo de energia como a eficiência do ecossistema para produzir ou manter sua organização.

Na mesma linha da ecologia industrial, Rosen; Dincer (1999) identificaram as relações entre os valores das exergias químicas das substâncias encontradas nas emissões rejeitadas, e as medidas do impacto ambiental. Estas relações conduziram a procedimentos para avaliar os efeitos prejudiciais sobre o ambiente e para predizer o potencial que uma substância tem para provocar um impacto no ambiente. Eles apresentaram duas correlações do potencial por meio de parâmetros exergéticos, que avaliam os custos ambientais da poluição: a **RPC**, que representa o custo para remover um poluente de uma corrente rejeitada sendo esta emitida ao ambiente, e a **FPC** que representa o custo para corrigir ou compensar um dano ambiental ou o custo para prevenir um escape de uma emissão prejudicial ao ambiente.

Baseado na teoria do custo exergético e o cálculo do custo exergético de reposição dos recursos de Ranz (1999), Botero (2000) fez uma avaliação exergética dos

recursos naturais, minerais, água e combustíveis fósseis. Para o caso dos minerais, usou um modelo de avaliação termodinâmica que levou em conta as características físicas e químicas que fazem estes recursos úteis e disponíveis para o homem tendo em conta as limitações tecnológicas atuais. A partir dos resultados obtidos por meio do modelo demonstrou que a terra, devido à concentração dos minerais na crosta, encontra-se numa condição muito mais próxima da máxima dispersão do que uma situação hipotética de estoque, na qual todos os elementos estariam totalmente ordenados. Para os combustíveis fósseis usou o conceito do custo exergético de abatimento, por meio do qual é possível determinar quanta energia do combustível é necessária para o abatimento de suas emissões, contando para isso com a melhor tecnologia disponível; propôs uma nova unidade de medida energética chamada "TLEP" (toneladas limpas equivalentes de petróleo) que permitiu expressar o capital natural limpo, como aquela reserva de energia fóssil que apesar de ser usada na sua totalidade, não teria consequências desastrosas para o meio ambiente. No caso da água, propôs avaliar a componente renovável deste recurso, por meio do seu custo exergético de reposição, que definiu como a energia requerida para devolver um recurso (água) a um ecossistema em suas condições originais (químicas e físicas), usando as melhores tecnologias disponíveis. Os resultados obtidos desta forma indicaram, que seriam necessárias de 0,4 a 6,4 vezes mais energia fóssil por ano para substituir só parte das funções do ciclo hidrológico.

Botero (2000) afirmou que a exergia entendida como a quantidade mínima de trabalho que é necessário investir para, por meio dum processo reversível, obter uma substância ou recurso a partir de um ambiente de referência, é a mínima energia que investiu a natureza para fornecer os recursos naturais nas condições específicas (físicas e químicas) que os diferenciam do entorno, e os fazem úteis para o subsistema econômico.

Dentro da linha de pesquisa da ecologia industrial Yagi; Akiyama (2001) aplicaram a análise exergética a quatro sistemas de produção de aço e fizeram a avaliação ambiental destes processos em termos de dois parâmetros: a exergia destruída e a emissão de gás carbônico (CO₂). Nesse mesmo ano, Costa; Schaeffer; Worrell (2001) fizeram um inventário do ciclo de vida (LCI) em base exergética para quatro

processos de produção de aço, e apresentaram e discutiram os valores exergéticos da poluição e dos rejeitos destes processos. Eles concluíram que o conceito de exergia é útil como uma medida comum dos recursos e dos rejeitos destes processos.

Outro estudo interessante sobre a exergia e sua utilidade nos estudos ambientais foi o de Wall; Gong (2001) (parte I) onde apresentaram a exergia como um conceito que oferece uma via para melhorar a utilização dos recursos e para reduzir a destruição ambiental. No seu trabalho o conceito de exergia foi apresentado como uma medida física de diferenças. As emissões e os poluentes foram vistos como diferenças no ambiente, pelo que concluíram que a exergia é uma medida satisfatória destas diferenças.

Já entre os mais recentes vale a pena destacar os trabalhos de Gong; Wall (2001) (parte II) que analisaram a exergia a partir da definição dada pela OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) para um indicador ecológico. Indicador ecológico é um parâmetro, ou um valor derivado de parâmetros, que fornece informação, descreve o estado de um fenómeno, ambiente ou área, com uma importância estendida além do valor associado com o parâmetro. Para demonstrar que a exergia é um indicador ecológico, fizeram uma comparação entre o indicador ecológico chamado Eco-indicador 95 e a exergia. Para o estudo de caso usaram os dados de Cornelissen (1997) apud Gong; Wall (2001). Eles aplicaram o EI95 e a exergia, às emissões da produção de uma caneca de porcelana e a uma xícara de poliestireno. Da análise dos resultados os autores concluíram que a exergia pode ser uma melhor medida do dano e um bom indicador ecológico visto que, uma elevada eficiência exergética significa menos rejeitos de exergia ao ambiente ou menos prejuízo ambiental.

Na área da pesquisa que relaciona a exergia com a sustentabilidade, Wall (2002) propôs que para projetar os sistemas de administração e conversão de energia de uma sociedade sustentável, é necessário aplicar a exergia já que esta clarifica a situação por meio da exposição das perdas de um processo e as emissões ao ambiente. O conceito de exergia quantifica estes fluxos, os quais são minimizados a fim de encontrar condições sustentáveis. Desta forma Wall (2002), concluiu que a exergia é

um conceito apropriado e necessário para o desenvolvimento de uma engenharia de energia em harmonia com a natureza.

Já na direção da análise exergética do ciclo de vida, Daniel; Rosen (2002) fizeram uma avaliação exergética ambiental do ciclo de vida das emissões para vários automóveis e combustíveis. Da análise dos resultados concluíram que a exergia pode ser usada como um indicador do impacto ambiental e que a parte da exergia mais importante neste indicador ambiental é a exergia química, também concluíram que a metodologia exergética é apropriada para avaliar o potencial do impacto ambiental e é útil no desenvolvimento e projeto de tecnologias de transporte que poluam menos que as usadas atualmente.

2.1 Impacto ambiental dos processos de conversão de energia

O impacto ambiental dos processos de conversão de energia pode ser dividido em duas categorias: uma primeira categoria associada ao consumo dos recursos naturais; e a segunda categoria relacionada aos rejeitos e emissões do processo. Considerando estas duas categorias, para diminuir o impacto ambiental é necessário prestar uma maior atenção ao estudo e desenvolvimento dos processos de conversão de energia de forma a aumentar sua eficiência. Um aumento na eficiência teria como consequência uma diminuição no consumo de recursos e, por conseguinte, uma redução nos fluxos dos rejeitos e das emissões.

Os resíduos, junto com os rejeitos produzidos durante o processo de conversão de energia são depositados nos aterros sanitários, perto das cidades. Estes contaminam as fontes de água por meio de substâncias tóxicas emitidas pelo lixo. Adicionalmente a decomposição da matéria orgânica nestes lugares gera metano, um gás com um potencial de aquecimento global 21 vezes maior que o gás carbônico. Atualmente os aterros sanitários são responsáveis por um terço das emissões de metano nos Estados Unidos, e por um décimo das emissões deste gás, causadas pelo homem, em escala global (Botero 2000).

Um impacto ambiental crítico a ser considerado é o relacionado ao consumo de combustíveis fósseis para produzir energia. Como os combustíveis fósseis são

basicamente carbono acumulado por meio da fotossíntese durante milhares de anos, seu uso libera carbono na forma de CO₂ a uma velocidade superior à que o ciclo natural do carbono é capaz de absorvê-lo, gerando uma acumulação de gases na atmosfera.

A cada ano emitem-se para a atmosfera cerca de 22 Gt de CO₂ que são produto da combustão de combustíveis fósseis, adicionalmente o desmatamento agrega 7,2 Gt à cifra anterior, sendo suficiente para romper o delicado balanço criado pelo ciclo do carbono. Calcula-se que se acumulam 11 Gt de CO₂ na atmosfera cada ano, e o incremento da concentração deste gás tem como consequência o aumento da temperatura média do planeta.

Em 1995 as emissões europeias de CO₂ foram de 6,2 Gt (World Resources Institute, 1998 apud Botero 2000), equivalentes a 27 % das emissões totais no mundo. Tendo em conta isto, a comunidade europeia propôs uma redução de 15% de suas emissões, no período compreendido entre 1998 e 2010, tomando como referência as emissões geradas em 1990. Isto supõe reduzir em 77,5 milhões de toneladas por ano as emissões de CO₂, supondo que o nível destas permaneça estável. No caso da Europa, as maiores fontes de emissões antropogênicas de CO₂ são a geração de energia (29,2%), o transporte por estrada (22,4%), os setores terciário e doméstico (19,5%), a indústria (17,6%) e outros (11,5%) (Botero 2000).

O setor da geração de energia elétrica é digno de ser mencionado. Em 1995, no mundo foram produzidos 13.097 TWh de energia elétrica, dos quais 8.249 TWh estavam baseados em geração térmica a partir de combustíveis fósseis (World Resources Institute, 1998 apud Botero 2000). Considerando que a produção de um MWh a partir de combustíveis fósseis implica a emissão de aproximadamente 800 kg de CO₂ à atmosfera, as emissões totais destas plantas foram de 6,5 Gt de CO₂. Esta é uma razão de peso para pensar que a captura de CO₂ durante a produção de energia elétrica, é uma possibilidade real de alcançar boa parte da redução das emissões de CO₂, que se estima para evitar os desastres ambientais que causariam uma mudança no clima do planeta.

No primeiro ambiente espera-se que a concentração de CO₂ na atmosfera alcance um nível de 750 ppm para o ano 2100, o que pode produzir um incremento na temperatura global de 1,5 a 3,5 °C. O segundo ambiente supõe reduções maiores ao 56 % sobre o nível atual de emissões durante todo este século.

Emissões acumuladas [Gt CO ₂ /100 anos]	Ambiente
5.490	Sem medidas corretivas
2.379	Com estabilização
3.111	Diferença

Tabela 2.3 Emissões acumuladas de CO₂ no ano 2100

na Tabela 2.3. No protocolo de Kioto acordou-se uma redução média de 5,2 % nas emissões de gases de efeito estufa no período compreendido entre 2008 e 2012, no entanto requerem-se maiores esforços para reduzir efetivamente o aquecimento global. Davison; Freund (1998) apud Botero (2000), analisaram e compararam dois ambientes em relação às emissões de CO₂. No primeiro não se toma nenhuma medida corretiva e no segundo estabiliza-se a concentração atmosférica de CO₂ em 450 ppm (hoje é de 365 ppm). Os resultados obtidos no estudo podem ser observados de 8 %, aproximadamente (Botero 2000).

ao registrado em 1990. Isto supõe uma redução das emissões deste gás ao ambiente ao protocolo de Kioto, em que propõe-se atingir um nível de emissões para 2025 igual emissões. As reduções planejadas sobre as emissões deste gás estão baseadas no Diferentemente de outros poluentes, o CO₂ não tem uma norma que regule suas metano e os CFC's também têm uma participação significativa.

A Conferência Internacional pela Mudança Climática (CIPC) num de seus relatórios afirma "existe uma clara evidência que sugere uma influência humana sobre o clima global". As emissões de gases de efeito estufa são as principais responsáveis da mudança climática, principalmente as emissões de CO₂, entretanto gases como

Além do carbono, os combustíveis fósseis têm outros componentes que causam danos sobre o meio ambiente, como o enxofre e o nitrogênio que combinados com o oxigênio e a água na atmosfera se precipitam sobre a terra na forma de ácidos. A geração do CO não é considerada devido a que este é causado basicamente pela combustão incompleta do combustível e pode ser evitado otimizando o processo de combustão. Adicionalmente, há combustíveis como o carvão que têm uma alta quantidade de cinzas. Uma vez realizada a combustão, uma parte destas cinzas se deposita no equipamento onde esta ocorre e depois é levada para um local adequado, a parte restante sai como cinzas volantes que, no caso de não existirem dispositivos de controle, misturam-se com o ar na atmosfera.

3. ANÁLISE EXERGÉTICA

3.1 Análise Exergética

O balanço de energia, baseado na primeira lei da termodinâmica, é um método efetivo para quantificar as diferentes formas de energia transferidas entre um sistema e suas vizinhanças. Além disto, fornece informação sobre as mudanças da energia acumulada nos sistemas. Por meio do balanço energético também é possível avaliar a eficiência dos processos de conversão de energia. Ele trata as interações de trabalho e calor como formas equivalentes de energia em trânsito, porém não oferece informação sobre a diferença da qualidade entre trabalho e calor. No balanço energético, por exemplo, 1 kJ de calor e 1 kJ de trabalho são tratados da mesma forma, no entanto, a qualidade da energia na forma de trabalho é maior que a do calor. Além disso, o balanço de energia não pode estimar a degradação da qualidade da energia dentro de um processo, uma vez que ele obedece a primeira lei da termodinâmica que é uma lei de conservação.

Segundo Tsatsaronis (1993), o balanço de energia, baseado na primeira lei da termodinâmica, falha na análise dos processos de conversão de energia devido a que esta lei:

- não reconhece qualquer perda num reator químico adiabático ou num processo de estrangulamento adiabático;
- não mostra que uma parte da entalpia de um fluxo ou da taxa de transferência de calor é inútil termodinamicamente;
- não detecta qualquer degradação na qualidade da energia num trocador de calor adiabático;
- identifica o condensador de uma instalação de potência como o componente responsável pela eficiência relativamente baixa da instalação, sendo que, na verdade, a caldeira é a responsável.

Um processo reversível para um sistema é definido como aquele que, tendo ocorrido, pode ser invertido sem deixar vestígios no sistema e no meio. Ou seja, é reversível se, após ter ocorrido, os estados iniciais do sistema e seus arredores podem ser restaurados sem efeitos residuais em qualquer um deles. Já um processo irreversível é aquele que ao ser invertido deixa vestígios no sistema e no meio. O processo reversível é um processo ideal, todos os processos reais são irreversíveis. Segundo Kotas (1985), o processo reversível embora seja uma idealização é conceitualmente

3.2 Processos reversíveis e irreversíveis

- processos de conversão de energia.
- Segundo Szargut (1988), o principal propósito de uma análise exergetica é descobrir as causas e estimar quantitativamente a magnitude da imperfeição dos processos de conversão de energia.
 - outra vantagem esta relacionada à definição da exergia, já que ela pode estimar a degradação da qualidade da energia dentro de um processo.
 - a análise exergetica é uma ferramenta efetiva para atingir uma utilização eficiente da energia com mínimo impacto ambiental e para entender as questões ambientais;
 - o uso da análise exergetica fornece uma medida comum para diferentes processos ou produtos;
 - usada como uma medida comum de entradas e saídas, possibilita o cálculo da eficiência exergetica, a saber, a razão das saídas pelas entradas exergeticas totais (incluindo utilidades). Esta razão fornece uma indicação do potencial teórico de futuras melhorias para um processo;
 - seguintes vantagens:
 - do combustível é usada e destruída nestes processos. além disto, ela oferece as análises e aplicada aos processos de conversão de energia, caracteriza como a exergia magnitudes das perdas exergeticas dentro de um processo ou sistema. Quando esta Termodinâmica, com a análise exergetica é possível identificar a localização e as

útil, porque ele pode ser descrito mais facilmente em termos matemáticos do que um processo irreversível e, além disso, ele pode ser usado convenientemente como um padrão de perfeição para os processos reais.

Existem muitas causas, chamadas irreversibilidades, que tornam um processo irreversível. Entre elas podem-se mencionar:

- a) atrito mecânico entre sólidos;
- b) aquecimento elétrico (Efeito Joule);
- c) perda de carga em escoamentos;
- d) troca de calor com gradiente de temperatura;
- e) misturas;
- f) reações químicas;
- g) difusão.

Um processo irreversível é acompanhado inevitavelmente de um aumento da entropia do universo (sistema e vizinhanças). Desta forma, o aumento da entropia pode servir como uma medida da imperfeição dos processos reais.

3.3 Exergia

Segundo Szargut (1988), a exergia é definida como a quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, por meio de processos reversíveis; envolvendo interação apenas com os componentes do meio ambiente.

3.4 Meio ambiente

Para possibilitar o cálculo da exergia de um sistema ou fluxo, é necessário definir uma referência que permita avaliar o máximo trabalho possível a ser realizado por um sistema. Essa referência é o meio ambiente. Considera-se meio ambiente a porção da vizinhança do sistema estudado cujas propriedades (pressão, temperatura e potencial químico) não se alteram significativamente ao interagir com o sistema.

O conceito de meio ambiente usado na análise exergética exige que ele esteja em estado de perfeito equilíbrio termodinâmico, ou seja, o meio deve ser homogêneo, não podendo possuir qualquer gradiente de pressão, temperatura, potencial químico, energias cinética e potencial. Embora o meio ambiente real seja complexo, procura-se, em geral modelá-lo como uma composição de substâncias existentes em abundância na atmosfera, oceanos e/ou crosta terrestre.

3.5 Estado de referência restrito

Segundo Kotas (1985), o estado de referência restrito é aquele onde as condições de equilíbrio térmico e mecânico entre o sistema e o ambiente são satisfeitas. Para que isto ocorra é necessário que as pressões e as temperaturas do sistema e o ambiente sejam iguais. O adjetivo restrito indica que, sob estas condições, as substâncias do sistema estão controladas por uma barreira física que evita a troca de matéria entre o sistema e o ambiente. Por isto não existe um equilíbrio químico entre o sistema e o ambiente.

3.6 Estado morto

Segundo Kotas (1985) o estado morto é definido como aquele onde as condições de equilíbrio térmico, mecânico e químico entre o sistema e o ambiente são satisfeitas. Assim, além das pressões e temperaturas, os potenciais químicos das substâncias do sistema e o ambiente devem ser iguais. Sob estas condições de equilíbrio termodinâmico total entre o sistema e o ambiente, o sistema não pode sofrer nenhuma mudança de estado por meio de alguma forma de interação com o ambiente.

3.7 Componentes da exergia

Desprezando efeitos pouco comuns na análise de processos como: os efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e de tensão superficial, a exergia total de um sistema pode ser dividida em quatro componentes: exergia física, cinética, potencial e química.

$$B = B_f + B^{cin} + B^{pot} + B^{qm} \quad (3.1)$$

Em base mássica:

$$b = b_f + b^{cin} + b^{pot} + b^{qm} \quad (3.2)$$

As energias cinética e potencial podem ser totalmente convertidas em trabalho, portanto correspondem às energias cinética e potencial, como segue:

$$B^{cin} = m \frac{V^2}{2} \quad e \quad B^{pot} = mgz \quad (3.3)$$

Na análise de sistemas, essas componentes geralmente têm valor zero ou são desprezíveis frente a h , u.

A exergia física é igual à máxima quantidade de trabalho obtida quando um sistema ou fluxo de uma substância passa de um estado inicial ao estado de referência restrito. Para um sistema a exergia física é dada por:

$$B_s^f = B - B^* + p_0(V - V^*) - T_0(S - S^*) \quad (3.4)$$

Em base mássica:

$$b_s^f = b - b^* + p_0(v - v^*) - T_0(s - s^*) \quad (3.5)$$

e para um fluxo:

$$B_f = m(h - h^* - T_0(s - s^*)) \quad (3.6)$$

Em base mássica:

$$b_f = h - h^* - T_0(s - s^*) \quad (3.7)$$

No cálculo da exergia física basta que o meio seja caracterizado pela pressão e a temperatura do estado de referência restrito (p_0 e T_0).

A exergia química é igual à máxima quantidade de trabalho obtida quando um sistema ou fluxo é levado do estado de referência restrito ao estado morto. Para um sistema tem-se:

$$B^s_{qm} = U^* + p^0 V^* - T^0 S^* - \sum_{i=1}^I \mu_{0,i} N_i = \sum_{i=1}^I (\mu_i^* - \mu_{0,i}) N_i \quad (3.8)$$

já para um fluxo em base molar tem-se:

$$\bar{b}^{qm} = \bar{h}^* - T^0 S^* - \sum_{i=1}^I \mu_{0,i} x_i \quad (3.9)$$

A exergia química molar total de uma mistura composta por i espécies químicas se define como:

$$\bar{b}^{qm} = \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i + RT^0 \sum n_i \ln(a_i) \quad (3.10)$$

A exergia total para um sistema é dada por:

$$B^s = U + p^0 V - T^0 S - \sum_{i=1}^I \mu_{0,i} N_i \quad (3.11)$$

e para um fluxo, tem-se:

$$\bar{b} = \bar{h} - T^0 \bar{s} - \sum_{i=1}^I \mu_{0,i} x_i \quad (3.12)$$

3.8 Balanço de exergia

A análise exérgica é uma aplicação sistemática da primeira e segunda leis da termodinâmica na avaliação do desempenho dos processos de conversão de energia, permitindo a efetiva avaliação termodinâmica dos processos, uma vez que quantifica as irreversibilidades que ocorrem durante o desenvolvimento destes processos.

O emprego combinado da primeira e segunda leis da termodinâmica permite que se estabeleça o balanço de exergia. Considerando-se o volume de controle mostrado na Fig. 3.1, pode-se escrever os balanços de energia e entropia, para condições de regime permanente:

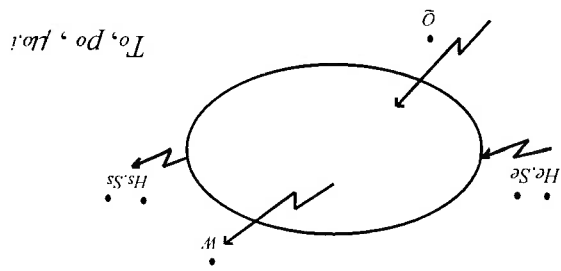


Figura 3.1 Volume de controle

Balanço de Energia (desprezando as energias cinética e potencial):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{H}_s - \dot{H}_c \quad (3.13)$$

Balanço de Entropia:

$$\frac{\dot{Q}}{T} + \dot{\sigma} = \dot{S}_s - \dot{S}_c \quad (3.14)$$

Multiplicando-se a eq. (3.14) por $(-T_o)$ e somando à eq. (3.13) tem-se:

$$\dot{H}_s - \dot{H}_c - T_o(\dot{S}_s - \dot{S}_c) = \dot{Q}(1 - \frac{T_o}{T}) - \dot{W} - T_o \dot{\sigma} \quad (3.15)$$

A eq. (3.15) é o balanço de exergia válido para o volume de controle considerado. Este balanço é formado pelos seguintes termos:

(variação de exergia entre os fluxos de entrada e saída) = (exergia associada ao calor trocado) + (exergia pura = trabalho realizado) - (exergia destruída)

A variação de exergia entre os fluxos de entrada e saída do volume de controle caracteriza o máximo trabalho que poderia ser obtido entre os estados de entrada e saída (trabalho reversível). Esta capacidade de realizar trabalho é igual à somatória composta pelas seguintes parcelas:

- trabalho que seria obtido de um motor térmico reversível operando entre os níveis de temperatura T e T_0 , consumindo \tilde{Q} e rejeitando calor para o meio ambiente à T_0 (este trabalho é a exergia associada ao calor trocado);

- trabalho efetivamente realizado (exergia pura);

- trabalho disponível destruído devido à existência de processos irreversíveis (exergia destruída = $T_0\sigma$).

A eq. (3.15), do balanço de exergia, pode ser considerada como a lei da degradação da energia, uma vez que permite a quantificação da redução da capacidade de realização de trabalho, devido à ocorrência de processos irreversíveis durante o desenvolvimento dos processos de conversão de energia.

Desta forma é comprovado que a capacidade de realização de trabalho (exergia) não se conserva, sendo sempre reduzida toda vez que houver algum processo irreversível (expansão não resistida, perda de carga, mistura, troca de calor com ΔT finito, reação química) ocorrendo no volume de controle analisado.

As perdas exérgicas dos processos de conversão de energia podem ser divididas em duas partes, uma parte devida à destruição da exergia provocada pelas irreversibilidades do sistema; e a outra parte é a exergia perdida que é a exergia associada aos fluxos de material ou energia rejeitada ao ambiente.

3.9 Rendimento ou eficiência exérgica

A eficiência exérgica é definida como um parâmetro usado para avaliar o rendimento termodinâmico. A eficiência exérgica (rendimento exérgico, eficiência de segunda lei, efetividade, ou eficiência racional) fornece uma medida real do rendimento de um processo de conversão de energia do ponto de vista

termodinâmico. Existem várias definições para a eficiência exergetica, algumas delas

são:

- Grau de Perfeição:

$$\eta_p = \frac{\text{exergia dos produtos úteis}}{\text{exergia de alimentação}} \quad (3.16)$$

- Rendimento/Eficácia exergetico:

$$\eta_{ex1} = \frac{\text{exergia útil produzida}}{\text{consumo de exergia}} \quad (3.17)$$

$$\eta_{ex2} = \frac{\sum (\text{exergia de saída})}{\sum (\text{exergia de entrada})} \quad (3.18)$$

Bejan, Tsatsaronis; Moran (1996) na definição da eficiência exergetica, utilizaram os termos produto e combustível para identificar, respectivamente, o resultado desejado produzido por um sistema e os recursos gastos para gerar o produto. A eficiência exergetica é dada pela razão entre a exergia do produto e a do combustível. Kotas (1985), definiu a eficiência exergetica que chamou de "eficiência racional" em termos de produção desejada e alimentação necessária. A razão entre a exergia da produção desejada e a da alimentação necessária fornece a eficiência exergetica. As duas definições estão de acordo com as eq.(3.16, 3.17 e 3.18).

4. INDICADORES EXERGÉTICOS PARA A AVALIAÇÃO DO IMPACTO

AMBIENTAL

A exergia pode ser definida como um registro de desenvolvimento sustentável que faz ênfase na ligação entre serviços gerados e recursos usados, isto faz com que a exergia possa ser uma melhor medida do dano e um bom indicador ecológico visto que, uma elevada eficiência exergética significa menos rejeitos de exergia ao ambiente ou menos prejuízo ambiental (Gong, 1999; Gong; Wall 2001).

Partindo dessa premissa, neste capítulo esta sendo proposta a “eficiência exergética”, conforme definida no item 4.1, como um indicador exergético de impacto ambiental que engloba os aspectos de eficiência energética e impacto ambiental dos processos de conversão de energia.

A avaliação do impacto ambiental por meio da eficiência exergética ambiental $\eta_{exerg,amb}$ foi complementada com o cálculo da taxa de poluição total R_{poll} (proposta por Makarytchev (1997)), para dados levantados na literatura e, para um estudo de caso de duas Estações de Tratamento de Esgoto (Barueri e Parque Novo Mundo).

Para calcular os indicadores exergéticos utilizados neste trabalho partiu-se dos balanços exergéticos conforme apresentados no item 3.8, para cada um dos processos analisados nos estudos de caso. No caso das Estações de Tratamento de Esgoto, além dos cálculos dos balanços exergéticos, foi necessário realizar os balanços de massa para cada uma das estações partindo dos dados fornecidos pela SABESP.

4.1 Eficiência exergética ambiental ($\eta_{exerg,amb}$)

O impacto ambiental dos processos de conversão de energia pode ser classificado em três partes: a primeira, associada ao consumo dos recursos naturais; a segunda à eficiência com a qual o processo converte a energia disponível nos recursos em outras formas de energia e a terceira parte relacionada aos rejeitos e emissões do processo. Este impacto ambiental pode ser diminuído pelo aumento da eficiência exergética desses processos. Para conseguir isso, é necessário prestar uma maior

atenção no estudo e desenvolvimento de tecnologias que conduzam ao aumento desta eficiência.

Um aumento na eficiência energética teria como consequência uma diminuição no consumo de recursos e, por conseguinte, uma redução dos rejeitos e das emissões destes processos. Desta forma, pode-se associar à eficiência energética, além dos aspectos de eficiência energética inerentes a sua definição, os aspectos ambientais.

Neste trabalho, propõe-se a eficiência energética como um índice de impacto ambiental, que compreende os aspectos de eficiência energética e impacto ambiental dos processos de conversão de energia. Na literatura encontram-se referências sobre a eficiência energética como um parâmetro para avaliar processos de conversão de energia (conforme definido no item 3.9).

A eficiência energética ambiental é definida como a razão da energia do produto final (ou efeito útil de um processo) pela energia total consumida dos recursos humanos e naturais, incluindo todos os insumos. Esta razão fornece uma indicação do potencial teórico de futuras melhorias para um processo. A eficiência energética ambiental é calculada de acordo com a eq. (4.1):

$$\eta_{\text{energ.amb}} = \frac{B_{\text{Prod. final}}}{B_{\text{Rec.nat}} + B_{\text{Prep}} + B_{\text{Desat}} + B_{\text{Remoc}}} \quad (4.1)$$

onde:

$B_{\text{Rec. Nat.}}$ = energia dos recursos naturais consumida pelos processos.

$B_{\text{Prep.}}$ = trabalho requerido para extração e preparação dos recursos naturais.

$B_{\text{Remoc.}}$ = trabalho relacionado à remoção dos rejeitos do processo.

$B_{\text{Prod. final}}$ = trabalho produzido ou o efeito útil de um processo.

$B_{\text{Desat.}}$ = energia dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos rejeitos.

As diferenças encontradas na literatura entre as definições da eficiência exergetica e eficiência exergetica ambiental proposta neste trabalho estão baseadas na escolha de diferentes volumes de controle para cada uma delas. Este fato determina a inclusão ou exclusão de alguns termos da exergetica total consumida dos recursos naturais e humanos. É importante notar que os valores dos índices são influenciados pela definição das fronteiras do sistema considerado.

4.2 Taxa de poluição total ($R^{pol,t}$)

Makarytchev (1997), definiu a taxa de poluição total ($R^{pol,t}$), como um índice de risco ambiental que caracteriza a destruição da exergetica no ambiente incluindo o processo de desativação dos rejeitos do processo, e o definiu como a razão entre a exergetica destruída e a exergetica do efeito útil de um processo.

A taxa de poluição total é definida em termos dos componentes físicos e químicos pela divisão apropriada da exergetica dos rejeitos do processo. A taxa de poluição física quantifica o efeito prejudicial da remoção dos rejeitos para temperaturas e pressões diferentes do ambiente. A taxa de poluição química é uma medida da capacidade dos rejeitos para reagir com os componentes do ambiente enquanto atingem o equilíbrio químico com o ambiente. Se a quantidade e a composição química dos rejeitos do processo são conhecidas, a taxa de poluição pode ser calculada para identificar e avaliar os riscos associados com componentes específicos dos rejeitos ou com uma substância ou poluente de interesse. A taxa de poluição total é calculada de acordo com a eq. (4.2):

$$R^{pol,t} = \frac{B_{Rej} + B_{Desat}}{B_{Prod, final}} \quad (4.2)$$

onde:

B_{Rej} = exergetica dos rejeitos do processo que envolve as exergetias dos rejeitos sólidos, do calor rejeitado e das emissões.

B_{Desat} = exergetica dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos rejeitos.

$B^{Prod, final}$ = trabalho produzido ou o efeito útil de um processo.

A taxa de poluição total será $R^{poli} \gg 1$, quando o termo $(B^{Rej} + B^{Desat}) \gg B^{Prod, final}$. Este o caso dos processos cujas emissões e rejeitos provocam um grande impacto no ambiente.

A taxa de poluição total será $R^{poli} = 0$, quando o termo $(B^{Rej} + B^{Desat}) = 0$. Este é o caso dos processos reversíveis, que não causam impacto no ambiente.

A taxa de poluição total estará entre $0 < R^{poli} < 1$, quando o termo $(B^{Rej} + B^{Desat}) < B^{Prod, final}$. Este é o caso dos processos que apresentam um impacto ambiental que é função das limitações tecnológicas dos processos de conversão de energia.

5. ESTUDOS DE CASO

Para testar a validade da eficiência exergética ambiental como um indicador do impacto ambiental dos processos de conversão de energia, foi realizada uma comparação deste indicador com outros parâmetros ambientais, tais como emissões de gases efeito estufa (CO_2), exergias perdida e destruída, etc., para cada um dos processos de conversão de energia analisados como estudos de caso. Além da eficiência exergética ambiental, neste capítulo é utilizada a taxa de poluição total na avaliação do impacto ambiental desses estudos de caso.

Os dados foram levantados na literatura e, como uma aplicação do método proposto, foi realizado um estudo de caso de duas Estações de Tratamento de Esgoto, a partir dos dados fornecidos pela SABESP. Os estudos de caso analisados, a partir dos balanços exergéticos realizados com os dados levantados na literatura, foram: a) processos de produção de cloro e PVC, b) processos de produção de aço, c) comparação da planta de cogeração de uma indústria de celulose e papel com uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo, d) refinaria de petróleo, e) processos de produção de fertilizantes.

5.1 Avaliação do impacto ambiental dos processos de produção de cloro e PVC

Ayres; Ayres; Martinás (1997) apresentaram uma aplicação da análise exergética no contexto da análise do ciclo de vida (ACV), para os processos de produção de cloro e PVC e outros subprodutos da clorinação do etileno na Europa ocidental em 1992.

No processo de produção de cloro (altamente endotérmico), tem-se como fluxos exergéticos de entrada, materiais com uma exergia muito pequena (NaCl , HCl , H_2O , Na_2CO_3 , CaCl_2 , H_2SO_4 , Na_2S , Hg) que representam 3,53 % do fluxo exergético de entrada. O principal fluxo exergético de entrada é a potência elétrica (78,23 %), o restante (18,24 %) é o fluxo exergético associado ao vapor de processo que é produzido a partir da queima de H_2 , um dos subprodutos do processo. Os fluxos exergéticos de saída são: Cl_2 , que é o produto principal (24,8 % do vetor exergético total de saída), e os subprodutos NaOH (30,68 %), H_2 (44,3 %) e o H_2SO_4 (0,22 %). O termo da exergia perdida no processo de produção de cloro é o associado aos

materiais rejeitados (NaCl , CaCl_2 e Na_2CO_3) que representam 1,6 % das entradas exergéticas totais, e por último, o termo da exergia destruída associado com as irreversibilidades do processo da eletrólise do NaCl na produção da soda cáustica (NaOH) (55,68 % das entradas exergéticas totais). Estes dados são apresentados na Figura 5-1.

O processo de produção de PVC compõe-se de oito sub-processos dos quais só um é endotérmico, que é a pirólise do $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ ou pirólise do dicloreto de etileno EDC, os outros são exotérmicos e efetivamente autoenergizados. Como fluxos exergéticos de entrada tem-se: as matérias primas do processo (Cl_2 , H_2O , C_2H_4 , O_2 , NaOH , C_2H_2) responsáveis pelo 73,2 % do vetor exergético total de entrada, o restante 26,8 % corresponde a outros insumos exergéticos. Os fluxos exergéticos de saída são ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$)_n ou PVC, que é o produto principal (93,4 % do fluxo exergético de saída), e os subprodutos $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$ (2,4 %), CCl_4 (0,6 %), $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}_3$ (1,5 %), C_2Cl_4 (1,0 %), C_2HCl_3 (0,8 %) e $\text{C}_2\text{H}_m\text{Cl}_n$ (0,3 %). O termo da exergia perdida no processo de produção de PVC é o associado aos materiais rejeitados (Cl_2 e H_2O) que representam 4,8 % das entradas exergéticas totais e, por último, o termo da exergia destruída associado com as irreversibilidades do processo de produção de PVC (39,1 % das entradas exergéticas totais). Estes dados são apresentados na Figura 5-2. É importante notar que de acordo com autores Ayres; Ayres; Martinás (1997) para o processo de PVC, faltaram alguns dados exergéticos, mas em quantidades iguais nos fluxos de entrada e saída, assim como no fluxo de exergia perdida.

Os dados dos fluxos exergéticos para os dois processos foram calculados no presente trabalho aplicando um balanço de exergia para estes processos, conforme apresentado no item 3.8, estes dados junto com os obtidos no trabalho de Ayres; Ayres; Martinás (1997), são apresentados na Tabela 5-1.

Tabela 5.1 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para os processos de produção de cloro e PVC

Processo	Exergia	
	Entrada (kJ)	Saída (kJ)
Processo de produção de cloro	16451	7027
Processo de produção de PVC	173432 E6	97272 E6
		Destruída e perdida (kJ)
		9424

Nas Figuras 5-1 e 5-2 são apresentados os balanços exergéticos para os processos de produção de cloro e PVC respectivamente.

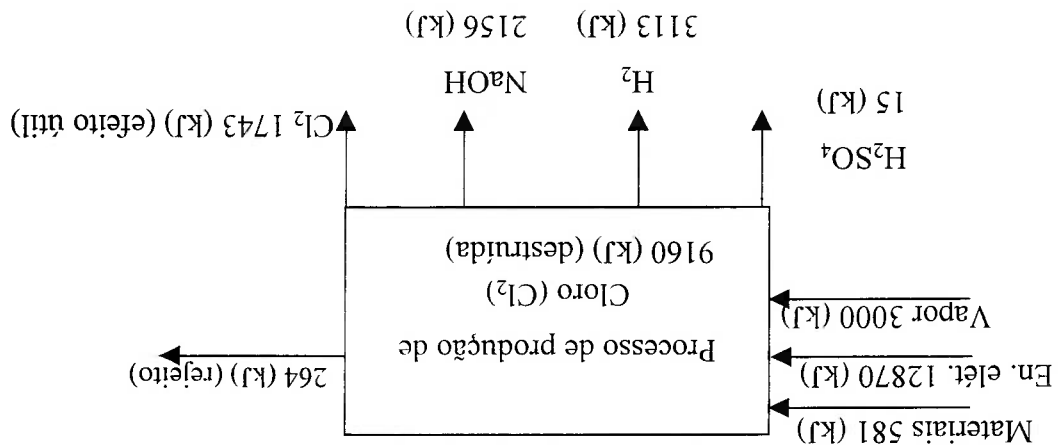


Figura 5.1 Balanço exergético do processo de produção de cloro

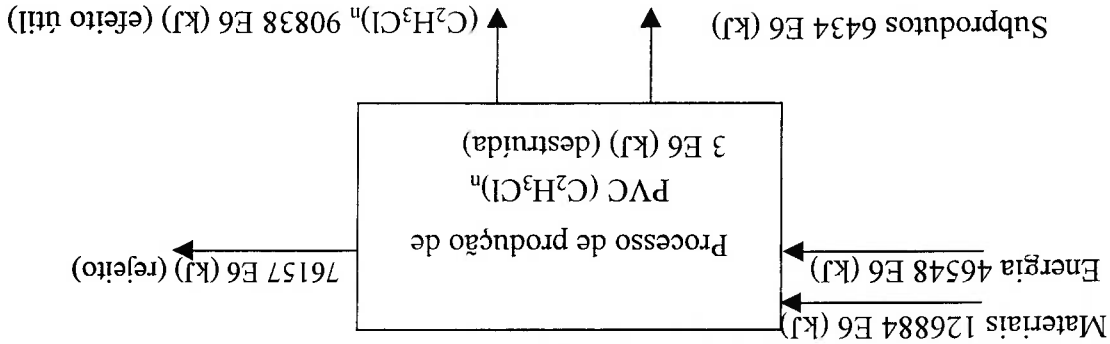


Figura 5.2 Balanço exergético do processo de produção de PVC

O volume de controle considerado no cálculo dos indicadores exergeticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$) para os dois processos, coincide com as fronteiras dos processos, portanto, deve ser esclarecido que no cálculo da eficiência exergetica ambiental, não foram incluídas as parcelas exergeticas de entrada devidas aos processos de produção dos insumos exergeticos. No caso do processo de produção de cloro, não foram incluídas as exergetias associadas aos processos de produção das matérias-primas (NaCl, HCl, Na_2CO_3 , $CaCl_2$, H_2SO_4 , Na_2S , Hg), assim como a exergetia associada ao processo de produção da energia elétrica consumida no processo de produção de cloro. Para o processo de PVC não foram incluídas as exergetias associadas aos processos de

incompletos do fluxo de exergetia perdida do processo. Não se contou com dados apresentados pelos autores no trabalho. No caso do processo de produção de PVC não foi possível calcular a $R_{pol,i}$ devido a dados incluída a exergetia associada com a desativação dos rejeitos do processo, isto porque esclarecer que no cálculo da $R_{pol,i}$ para o processo de produção de cloro não foi o da produção de PVC; já que apresenta a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,56), é importante Nesta Tabela, observa-se que o processo que causa o menor impacto no ambiente, é

Processo	Índice ambiental	
	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,total}$
Processo de produção de cloro	0,43	0,04
Processo de produção de PVC	0,56	-

produção de cloro e PVC

Tabela 5.2 Valores dos índices de impacto ambiental para os processos de

da Tabela 5-1, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5-2. Ao calcular a eficiência exergetica ambiental e a taxa de poluição total, com os dados desempenho ambiental de cada um dos processos.

Os autores concluíram que a exergetia é apropriada como uma medida da matéria prima e dos fluxos, e como uma medida das emissões e de seu potencial para causar prejuízos ambientais. Porém na sua análise eles não avaliaram quantitativamente o

produção das matérias-primas (Cl_2 , C_2H_4 , O_2 , $NaOH$, C_2H_2), assim como a exergia associada aos processos de produção dos outros insumos exergéticos do processo de produção de PVC. Isto foi devido ao fato de só se ter para a elaboração da análise os dados apresentados por Ayres; Ayres; Martinás (1997) no seu trabalho.

Da análise dos resultados dos indicadores exergéticos do impacto ambiental para os processos de produção de cloro e PVC, pode ser observado que apesar do conceito de exergia apresentar uma limitação, devido a que ele não fornece informação a respeito da toxicidade e da qualidade biológica de qualquer substância, é uma ferramenta útil na quantificação do impacto ambiental dos processos de conversão de energia, do ponto de vista do desempenho ambiental dos processos ($M_{exerg,amb}$), neste estudo de caso devido a falta de dados, não foi possível avaliar a destruição da exergia destes processos no ambiente ($R_{pol,i}$).

5.2 Avaliação do impacto ambiental do processo de produção de aço

5.2.1 Processo de produção de aço do alto forno tradicional com e sem injeção de carvão pulverizado

Uma descrição mais detalhada da avaliação do impacto ambiental de um processo, a partir dos dados gerados pela análise exergética, foi realizada calculando a eficiência exergética ambiental e taxa de poluição total com os dados apresentados por Yagi; Akiyama (2001).

Yagi; Akiyama (2001) aplicaram a análise exergética ao processo de produção de aço do alto forno tradicional sem, e com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, e examinaram o efeito da injeção de carvão pulverizado (ICP) sobre a perda total da exergia e sobre a emissão total dos gases efeito estufa. Eles demonstraram que a perda total da exergia diminuiu quando foi substituída uma quantidade de coque pela injeção de carvão pulverizado no alto forno, para melhorar a combustão com enriquecimento de oxigênio. E com respeito à emissão dos gases efeito estufa, encontraram que a injeção de carvão pulverizado levou a uma taxa de diminuição de 5% na emissão total destes gases para 132 kg-c/thm de injeção de carvão. Isto porque o conteúdo de hidrogênio no carvão é maior do que no coque, o que faz a injeção de

carvão mais efetiva na diminuição da emissão dos gases efeito estufa no alto forno tradicional.

Yagi; Akiyama (2001) avaliaram todos os tipos de gases efeito estufa emitidos (CO₂, CO₂, CH₄, etc.) como o valor convertido a CO₂, para o processo sem injeção de carvão pulverizado, sobre a base da massa do carbono (kg-c), onde c é a fração da massa do carbono no metal em (mol m⁻³). Eles apresentaram os dados da exergia de entrada, destruída e perdida em GJ/thm (tonelada de metal quente por dia) para os dois casos.

Os dados das saídas exérgicas para os dois processos foram calculados neste trabalho aplicando um balanço de exergia para estes processos, conforme apresentado no item 3.8. O termo relacionado à exergia perdida (rejeito), para os dois processos representa 40 % do fluxo exérgico de saída. Estes dados junto com os obtidos no trabalho de Yagi; Akiyama (2001), são apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5.3 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para dois processos de produção de aço

Processo	Exergia	
	Entrada (GJ/thm)	Saída (GJ/thm)
Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	16	6,7
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	16	8,0
		Destruída e perdida (GJ/thm)

Yagi; Akiyama (2001) avaliaram ambientalmente estes processos do ponto de vista de dois parâmetros: a exergia destruída e perdida, e a emissão de CO₂.

Para calcular a emissão de CO₂ do processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, foi tomado como base o dado da taxa de diminuição de emissão de 5% para 132 kg-c/thm de injeção de carvão pulverizado apresentado por Yagi; Akiyama (2001). Neste caso, com 110 kg-c/thm de injeção de carvão, obteve-se uma taxa de diminuição de emissão de 4,16%, com a qual chegou-se a um valor de emissão de CO₂ de 479,2 kg-c/thm. Este valor calculado e os valores dos

parâmetros ambientais obtidos do trabalho de Yagi; Akiyama (2001) são apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5.4 Valores dos parâmetros ambientais para dois processos de produção de aço

Processo	Parâmetro ambiental	Exergia destruída e perdida (GJ/thm)	Emissão de CO ₂ (kg-c/thm)
Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	8,0	479,2
	Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	9,3	500

Nas Figuras 5-3 e 5-4 são apresentados os balanços exergeticos para o processo do alto forno tradicional sem, e com injeção de carvão pulverizado, assim como os parâmetros ambientais utilizados por Yagi; Akiyama (2001).

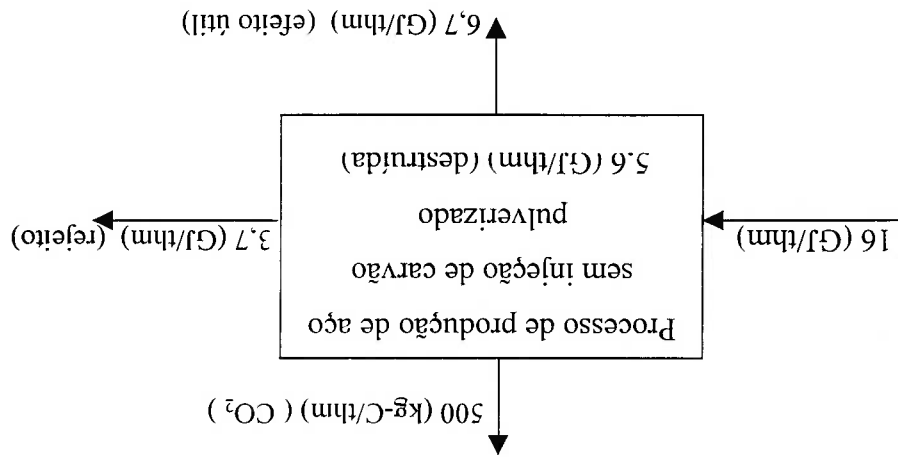


Figura 5.3 Balanço exergetico e parâmetro ambiental do processo de produção de aço do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado

Observando os parâmetros de avaliação ambiental de Yagi: Akiyama (2001), conclui-se também que o processo que causa o menor impacto no ambiente é o processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, devido a que tem a menor exergia destruída e perdida (8,0 GJ/thm) e a menor emissão de CO₂ (479,2 kg-c/thm). Estes resultados são iguais ao obtido por meio da análise da eficiência exergética ambiental e da taxa de poluição total. Na Tabela 5-5, são apresentadas um resumo dos resultados e uma comparação.

Da análise da eficiência exergética ambiental e da taxa de poluição total para cada um dos processos observa-se que o processo que causa o menor impacto no ambiente é aquele do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, já que teve a maior $\eta_{exerg.amb}$ (0,5) e a menor $R_{pol,t}$ (0,4).

Figura 5.4 Balanço exergético e parâmetro ambiental do processo de produção de aço do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado

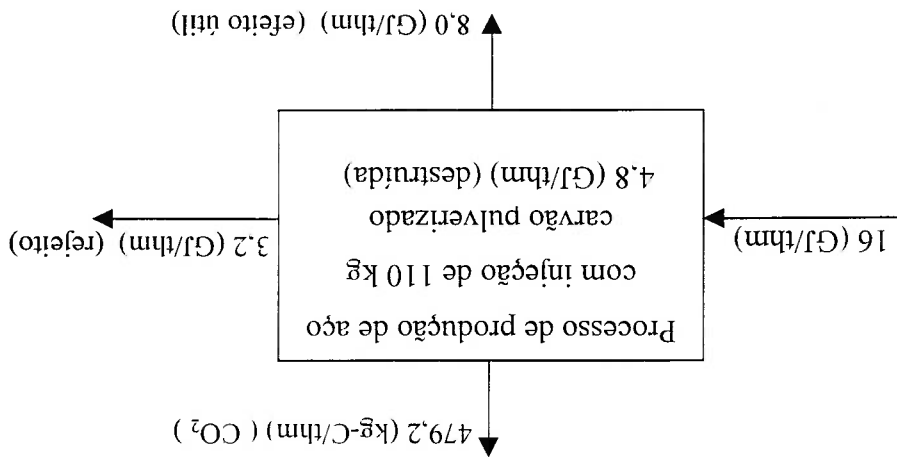


Tabela 5.5 Valores da eficiência exergetica ambiental, da taxa de poluição total e de outros parâmetros ambientais para dois processos de produção de aço

Processo	Índice ambiental		$\eta_{exerg,amb}$	R_{pol}	Exergia destruída e perdida (GJ/thm)	Emissão de CO ₂ (kg-c/thm)
	$\eta_{exerg,amb}$	R_{pol}				
Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	0,42	0,55			9,3	500
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	0,50	0,40			8,0	479,2

Neste estudo de caso, a avaliação do impacto ambiental por meio dos indicadores exergeticos ($\eta_{exerg,amb}$, R_{pol}), mostrou ser um método coerente com as soluções ambientais (injeção de carvão pulverizado), que visam a diminuição das emissões dos gases efeito estufa, no processo de produção de aço do alto forno tradicional.

É importante esclarecer que o efeito da injeção do carvão pulverizado está incluído no cálculo dos indicadores exergeticos ($\eta_{exerg,amb}$, R_{pol}). No caso do cálculo da taxa de poluição total, essa injeção de carvão pulverizado representa a parcela da exergia destruída na diminuição das emissões de CO₂.

5.2.2 Processo de produção de aço convencional integrado, semi-integrado, novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio e do novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico

A análise de impacto ambiental também foi aplicada a quatro sistemas de produção de aço, nos quais foi realizado um inventário de ciclo de vida (LCI) em base exergetica, para calcular e comparar as eficiências e a exergia das emissões e dos rejeitos aquáticos dos sistemas estudados. Os dados das exergias destes estudos, foram calculados no presente trabalho aplicando um balanço de exergia para estes processos, conforme apresentado no item 3.8. Estes dados junto com os obtidos no trabalho do Costa; Schaeffer; Worrell (2001) são apresentados na Tabela 5-6.

Tabela 5.6 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para quatro diferentes processos de produção de aço

Processo	Exergia		Destruída e perdida (GJ/t. de aço)
	Entrada (GJ/t. de aço)	Saída (GJ/t. de aço)	
Convenional integrado	20,6	7,9	12,7
Semi-integrado	10,6	7,10	3,5
Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio	29,6	15,0	14,6
Novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	25,1	10,8	14,3

Nas Figuras 5-5, 5-6, 5-7 e 5-8 são apresentados os balanços exergeticos para os quatro processos de produção de aço.

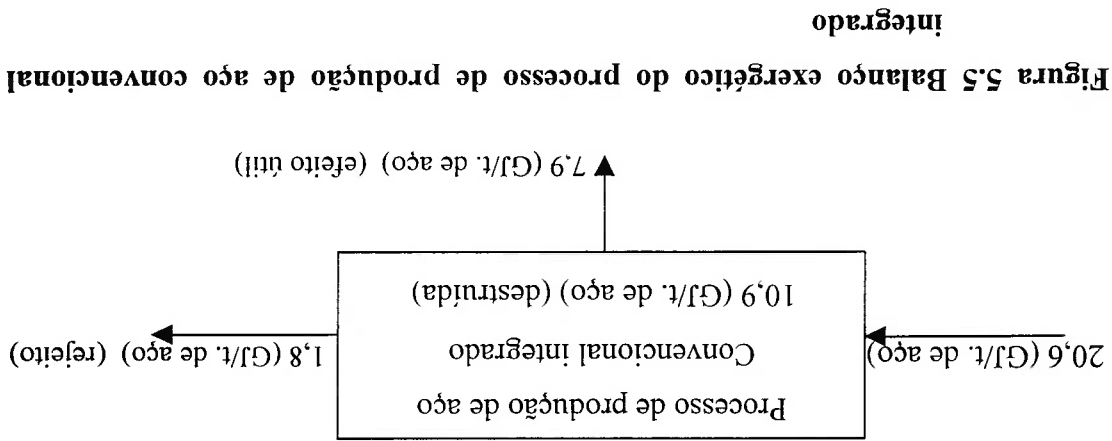


Figura 5.5 Balanço exergetico do processo de produção de aço convencional integrado

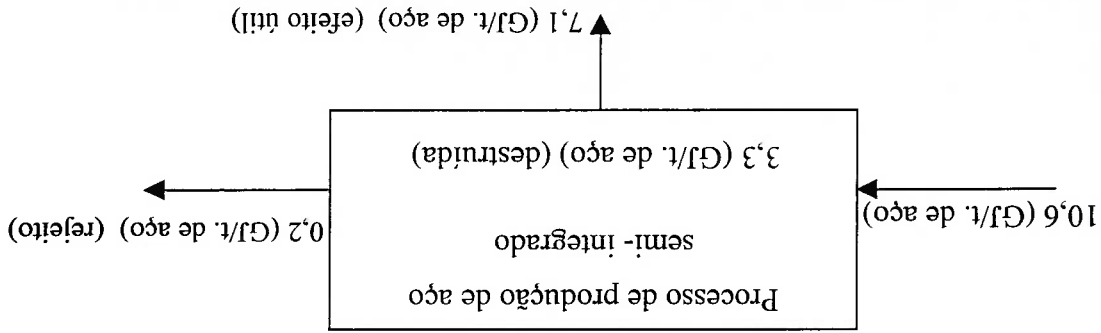


Figura 5.6 Balanço exergetico do processo de produção de aço semi-integrado

Costa; Schaeffer; Worrell (2001) apresentaram e compararam a eficiência exergetica (Texerg), e a exergia das emissões no ar (material particulado, SO₂, NO_x, CO, CO₂, VOCs, H₂S, HCl, HF, PAHs “hidrocarboneto aromático policíclico”, PCDD/F policloro de benzeno -p- dioxinas e furanos (“polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans”), benzeno, NH₃ e CH₄) e dos rejeitos aquáticos (amônia, cloretos, fluoretos, cianetos, sulfetos, fenol, óleos e graxas), para os quatro processos de produção de aço. Estes dados são apresentados na Tabela 5-7.

Figura 5.8 Balanço exergetico do processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico

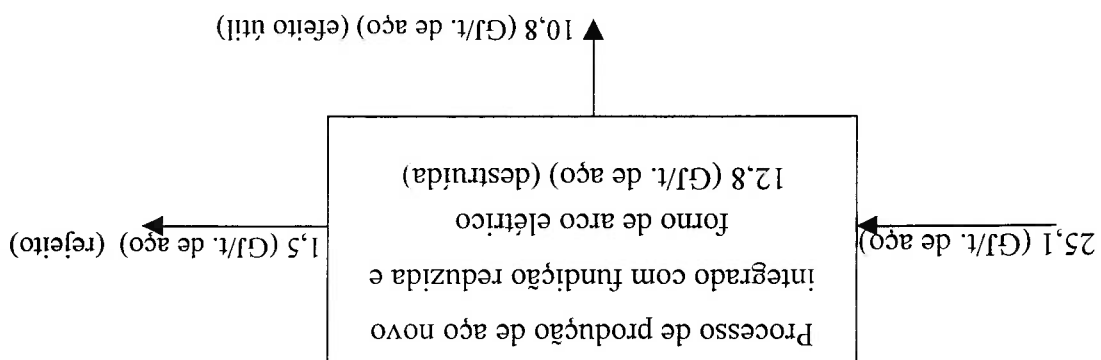


Figura 5.7 Balanço exergetico do processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio

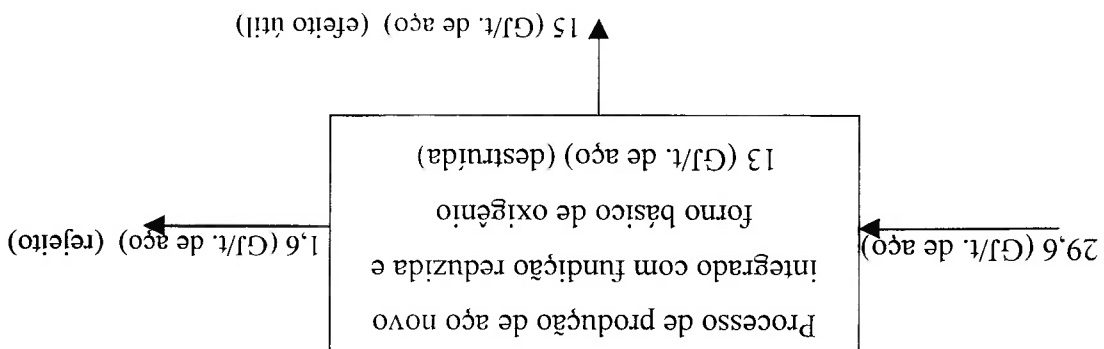


Tabela 5.7 Eficiência exergetica, exergia das emissões no ar e dos rejeitos aquáticos para quatro processos de produção de aço

Exergia das emissões e dos rejeitos (GJ/t. de aço)	Parâmetro	
	η_{exerg}	
0,9	0,38	Convençional integrado
0,04	0,67	Semi-integrado
0,4	0,51	Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio
0,4	0,43	Novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico

Com os dados gerados pela análise exergetica foi avaliada a eficiência exergetica ambiental e a taxa de poluição total. Na Tabela 5-8 são apresentados um resumo e uma comparação dos resultados dos dois métodos.

Tabela 5.8 Valores da eficiência exergetica ambiental, da taxa de poluição total e da eficiência exergetica para quatro processos de produção de aço

Exergia das emissões e dos rejeitos (GJ/t. de aço)	Índice ambiental	
	$R_{\text{pol}}^{\text{amb}}$	$\eta_{\text{exerg,amb}}$
0,9	0,23	0,38
0,04	0,03	0,67
0,4	0,11	0,51
0,4	0,14	0,43

Nesta Tabela, observa-se que tanto os resultados da análise dos índices do impacto ambiental ($\eta_{\text{exerg,amb}}$, $R_{\text{pol}}^{\text{amb}}$), realizada no presente trabalho, como os resultados do trabalho de Costa; Schaeffer; Worrell (2001) (η_{exerg} , exergia das emissões e rejeitos) mostram que o processo que causa menor impacto ambiental dos quatro apresentados

é o processo de produção de aço semi-integrado, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,67), a menor $R_{pol,t}$ (0,03) e a menor exergia associada às emissões e rejeitos (0,04 GJ/t.de aço).

Os valores iguais nas eficiências exergética e ambiental para os quatro processos devem-se a que o volume de controle considerado para o cálculo das eficiências é o mesmo. Isto, devido ao fato de só se contar com os dados apresentados pelos autores no trabalho.

Deve ficar claro que no cálculo da taxa de poluição total, não foi incluída a parcela da exergia associada à desativação dos rejeitos, devido a que esta parcela não foi considerada pelos autores do trabalho.

Finalmente foi feita uma comparação dos resultados obtidos por meio dos indicadores exergéticos de impacto ambiental ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), para os seis processos de produção de aço estudados acima, conforme apresentado nos itens 5.2.1 e 5.2.2. Estes resultados são apresentados na Tabela 5-9.

Tabela 5.9 Valores da eficiência exergética ambiental e da taxa de poluição total para seis processos de produção de aço

Processo	Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$
Processo de alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	0,42	0,55	
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	0,50	0,40	
Convencional integrado	0,38	0,23	
Semi-integrado	0,67	0,03	
Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio	0,51	0,11	
Novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	0,43	0,14	

Na tabela 5-9 observa-se que o processo que causa menor impacto ambiental dos seis apresentados é o processo de produção de aço semi-integrado, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,67), a menor R_{poli} (0,03). Os valores dos indicadores exergéticos obtidos para o processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, são muito próximos dos obtidos para o processo novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio.

5.3 Avaliação e comparação do impacto ambiental de uma planta de cogeração de uma indústria de celulose e papel com uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo

A análise de impacto ambiental também foi aplicada a quatro diferentes arranjos de uma planta de cogeração utilizada na indústria de celulose e papel, em que foi feita uma análise exergética para determinar, entre as configurações estudadas, qual era aquela que produzia a mais alta eficiência exergética e a maior eficiência energética total. Em outra aplicação da análise exergética Rivero; Hernández (1996), apresentaram a análise de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo. Os dados dos fluxos exergéticos para cada um dos quatro arranjos da planta de cogeração, da indústria de celulose e papel, assim como para a planta de cogeração da refinaria de petróleo foram calculados no presente trabalho aplicando um balanço de exergia para estes processos, conforme apresentado no item 3.8. Estes dados junto com os obtidos nos trabalhos de Näsholm; Svedberg; Westermarck (1993) e Rivero; Hernández (1996), são apresentados na Tabela 5-10.

Tabela 5.10 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para cinco diferentes arranjos de uma planta de cogeração

Planta	Fluxo de Exergia		Entrada (MW)	Saída (MW)	Destruída e perdida (MW)
	Entrada (MW)	Saída (MW)			
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível	110,14	43,17	110,14	66,97	
Planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível	114,36	43,68	114,36	70,68	
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	102,62	30,68	102,62	71,94	
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	107,44	31,16	107,44	76,28	
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo	528,2	173,5	528,2	354,7	

Nas Figuras 5-9, 5-10, 5-11, 5-12 e 5-13 são apresentados os balanços exergeticos para os quatro arranjos da planta de cogeração da indústria de celulose e papel, assim como para a planta de cogeração da refinaria de petróleo.

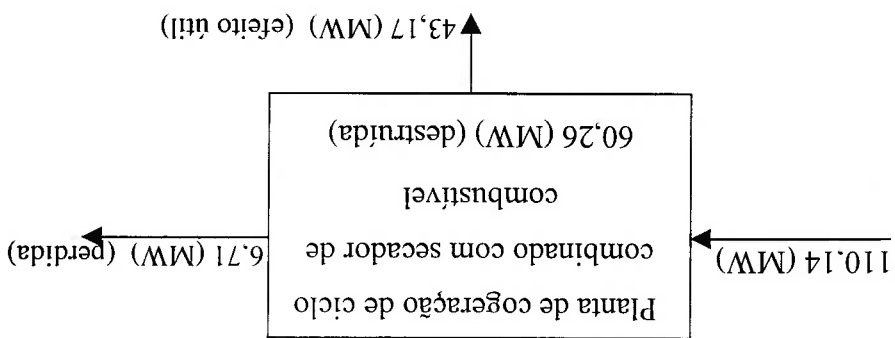


Figura 5.9 Balanço exergetico de uma planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível

Figura 5.10 Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível

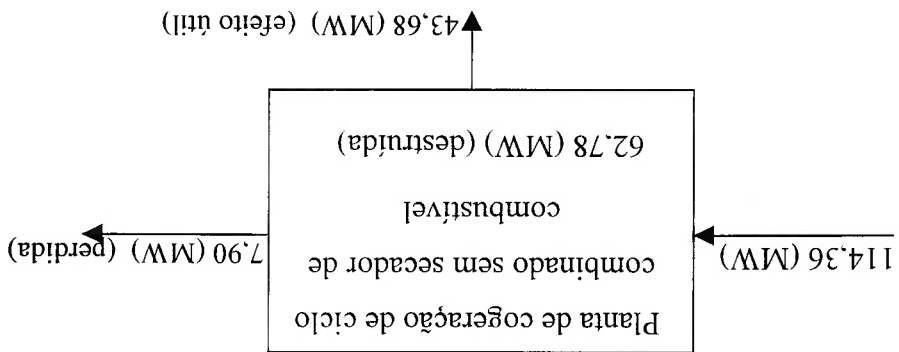


Figura 5.11 Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível

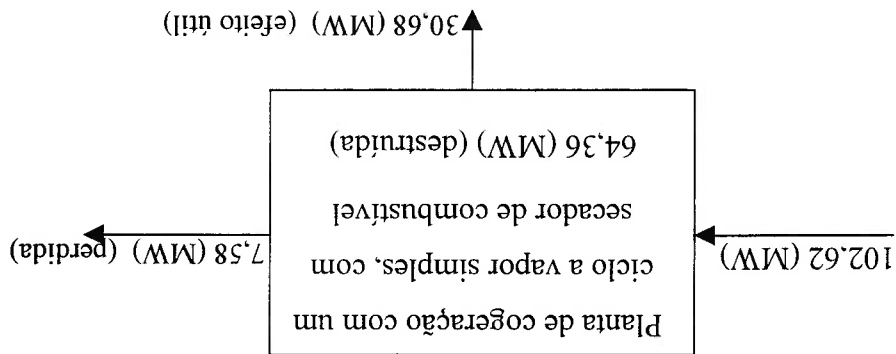
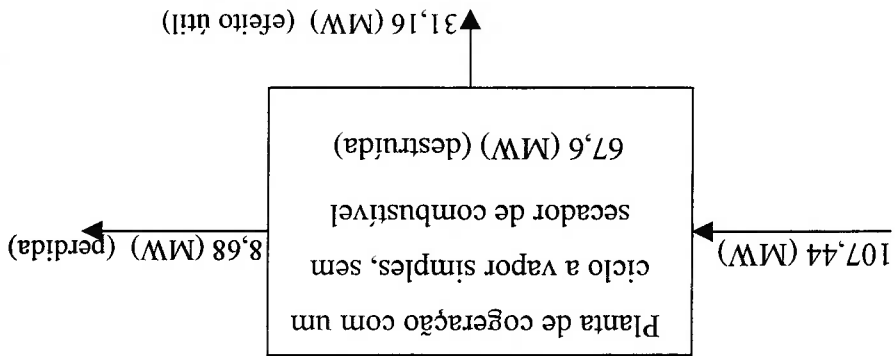


Figura 5.12 Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível



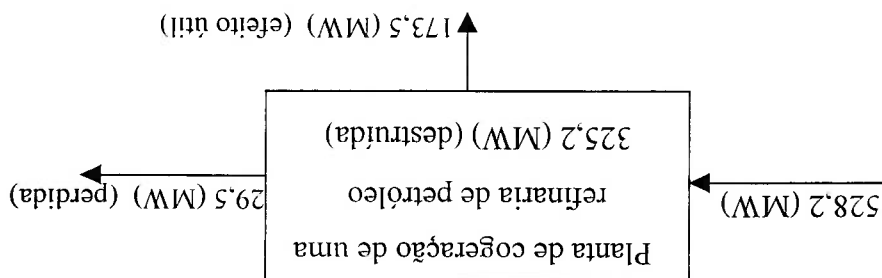
Rivero; Hernández (1996), na sua análise não avaliaram quantitativamente o desempenho ambiental da planta de cogeração da refinaria de petróleo. Com os dados gerados pela análise exergética foram avaliadas a eficiência exergética ambiental e a taxa de poluição total, para os arranjos da planta de cogeração da

Planta ambiental	η_{exergT}	η_{exergT}
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível	0,392	0,723
Planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível	0,382	0,711
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	0,299	0,666
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	0,290	0,650

Tabela 5.11 Parâmetros ambientais para quatro plantas de cogeração

Nasholm; Svedberg; Westermarck (1993) apresentaram a avaliação ambiental em termos de dois parâmetros: a eficiência exergética total (η_{exergT}) que calcularam com a eq. 3.17, conforme apresentado no item 3.9 do presente trabalho, e a eficiência energética total (η_{energT}), que calcularam de acordo com a definição de eficiência energética de primeira lei. Estes valores são apresentados na Tabela 5-11.

Figura 5.13 Balanço exergético de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo



Na Tabela 5-12 são apresentados um resumo e uma comparação dos resultados dos dois métodos.

Tabela 5.12 Valores da eficiência exergética ambiental, taxa de poluição total e de outros parâmetros ambientais para cinco plantas de cogeração

Planta		$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,i}$	$\eta_{exerg,T}$	$\eta_{energ,T}$
Índice ambiental		0,39	0,15	0,39	0,723
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível		0,38	0,18	0,38	0,711
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível		0,30	0,25	0,30	0,666
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível		0,29	0,28	0,29	0,650
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo		0,33	0,17	-	-

Nesta Tabela, observa-se que os resultados da análise dos índices do impacto ambiental ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$) para os trabalhos de Nasholm; Svedberg; Westermark (1993), e Rivero; Hernández (1996), assim como os resultados apresentados por Nasholm; Svedberg; Westermark (1993) ($\eta_{exerg,T}$, $\eta_{energ,T}$) mostram que a planta que causa menor impacto ambiental das cinco apresentadas é a planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível, uma vez que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,39) e a menor $R_{pol,i}$ (0,15).

Os valores iguais nas eficiências exergética total e ambiental para as quatro configurações estudadas da indústria de celulose e papel, devem-se a que o volume de controle considerado para o cálculo das eficiências para cada um dos casos é o mesmo, devido a que só se contou para o cálculo com os dados apresentados pelos autores no trabalho.

É importante esclarecer que no cálculo da taxa de poluição total $R_{pol,t}$ para todos os arranjos da planta de cogeração, não foi incluída a parcela da exergia relacionada com a desativação dos rejeitos devido a que só se contou com os dados fornecidos pelos autores em cada um dos trabalhos.

5.4 Avaliação do impacto ambiental de uma refinaria de petróleo

A análise de impacto ambiental também foi aplicada a uma refinaria de petróleo em que foi feita uma análise exergética para otimizar seu rendimento. Uma vez feita a otimização, foram propostas algumas modificações para melhorar o rendimento dos equipamentos que compõem a refinaria, o que levou a uma considerável economia no consumo de combustível e, por conseguinte, a uma redução na emissão de poluentes para o ambiente.

Anaya et al. (1990) do *Instituto Mexicano del Petróleo*, apresentaram os dados da exergia de entrada, saída e destruída para a refinaria, considerando a operação real. Além disto, apresentaram também estes dados para a refinaria com as modificações resultantes da otimização (ver Tabela 5-13).

Tabela 5.13 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perdida para os dois casos da refinaria

Refinaria	Fluxo de Exergia		Refinaria antes da otimização	Refinaria após de ser feita a otimização
	Entrada (MW)	Saída (MW)		
Destruída e perdida (MW)			913,87	764,14
			208,32	214,48
			1122,19	978,62

Anaya et al. (1990), apresentaram a avaliação ambiental da refinaria em termos da redução da emissão de poluentes para a atmosfera. Considerando a operação real, as emissões dos gases de chaminé da refinaria alcançaram um valor de 13813620 t/ano e, após feita a otimização, um valor de 12046390 t/ano. Da análise destes dados, observa-se uma redução nas emissões dos gases de chaminé, para a refinaria após a otimização, de 1767230 t/ano, que corresponde a 12,8% da emissão total da refinaria na operação real.

Nas Figuras 5-14 e 5-15 são apresentados os balanços exergeticos e o parâmetro ambiental analisado por Anaya et al. (1990), para os dois casos da refinaria.

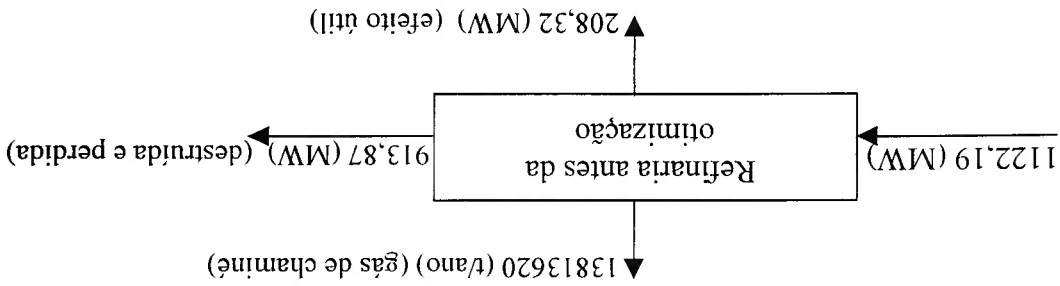


Figura 5.14 Balanço exergetico e parâmetro ambiental para o caso da refinaria antes da otimização

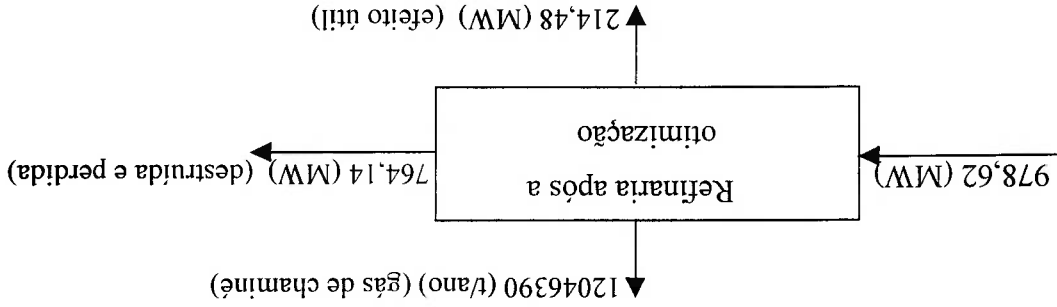


Figura 5.15 Balanço exergetico e parâmetro ambiental para a refinaria após a otimização

Com os dados gerados pela análise exergetica foi avaliada a eficiência exergetica ambiental, a taxa de poluição total não pode ser avaliada devido a que os autores não apresentaram os dados discriminados da exergia destruída e perdida. Da análise da eficiência exergetica ambiental para cada um dos casos da refinaria observa-se que o menor impacto no ambiente é aquele da refinaria após a otimização, já que esse caso

teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,22).

Comparando os resultados obtidos por meio da análise dos índices de impacto ambiental com os resultados apresentados por Anaya, et al. (1990), observou-se que para ambas análises o caso da refinaria após a otimização é o que causa o menor impacto no ambiente. Na Tabela 5-14 são apresentados um resumo e uma comparação dos resultados.

Tabela 5.14 Valores da eficiência exergética ambiental, da taxa de poluição total e do parâmetro ambiental (emissões ambientais) para os dois casos da refinaria

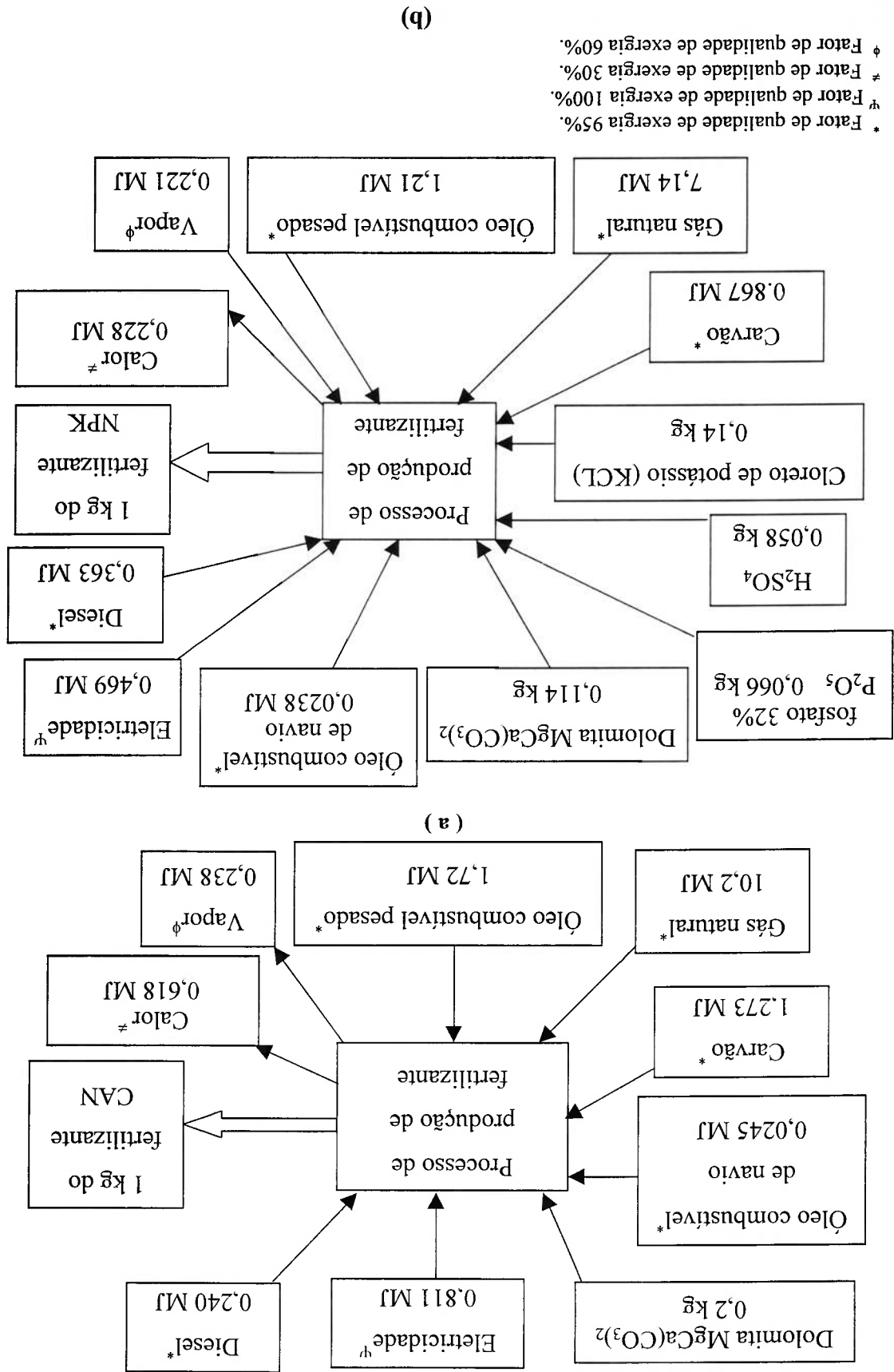
Refinaria	$\eta_{exerg,amb}$	R_{pol}	Emissões (t/ano)
Refinaria	0,19	-	13813620
Refinaria após de ser feita a otimização	0,22	-	12046390

Neste estudo de caso, a avaliação do impacto ambiental por meio dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$), mostrou ser um método coerente com as soluções ambientais (otimização da refinaria), que visam a diminuição das emissões poluentes na refinaria (CO_2 , SO_x , NO_x , HC e SP matéria particulada suspensa).

5.5 Avaliação do impacto ambiental de processos de produção de fertilizantes

A análise de impacto ambiental também foi aplicada a dois processos de produção de fertilizantes. Num dos processos é produzido o nitrato de amônio e cálcio (CAN) e no outro um fertilizante de enxofre apresentado como “NPK 21-4-7” (NPK). Sobre estes dois processos foi feita uma análise exergética. Os balanços de massa e energia para os dois processos são apresentados a seguir nas Fig. 5-16 (a) e (b), respectivamente.

Figura 5.16 Consumo de recursos e energia na produção de: (a) fertilizante CAN e, (b) fertilizante NPK. Fonte: Hovelius; Hansson (1999).



Hovellius; Hansson (1999) apresentaram um estudo do efeito da inclusão da exergia química dos recursos utilizados na produção de fertilizantes. Porém, em sua análise não avaliaram quantitativamente o desempenho ambiental de cada um dos processos.

Para o cálculo das exergias, foram usados os fatores de qualidade de exergia que aparecem nas Fig. 5-16 (a) e (b). Estes fatores foram definidos por Hovellius; Hansson (1999) como a razão da exergia pela energia para cada vetor energético envolvido nos processos. As exergias químicas dos materiais foram tomadas de Szargut (1988).

Os dados das exergias de entrada, saída, perda e destruída para os processos de produção de fertilizante foram calculados no presente trabalho aplicando um balanço de exergia para estes processos, conforme apresentado no item 3.8. Estes dados são apresentados na Tabela 5-15.

Tabela 5.15 Valores da exergia de entrada, saída, destruída e perda para dois processos de produção de fertilizantes

Processo	Exergia	Entrada (MJ)	Saída (MJ)	Perda e destruída (MJ)
Processo de produção de CAN		13,4	2,9	10,5
Processo de produção de NPK		10,4	6,65	3,75

Nas Figuras 5-17 e 5-18 são apresentadas os balanços exergéticos dos processos de produção dos fertilizantes CAN e NPK, respectivamente.

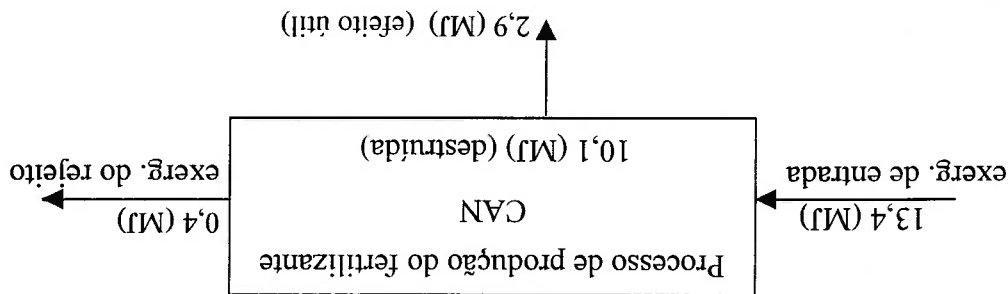


Figura 5.17 Balanço exergético do processo de produção do fertilizante CAN

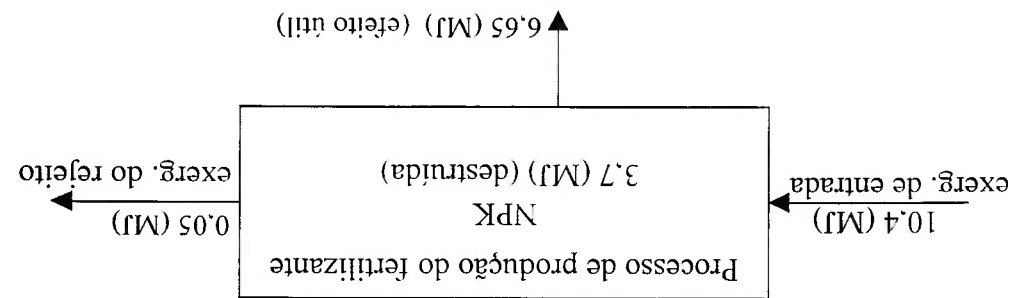


Figura 5.18 Balanço exergético do processo de produção do fertilizante NPK

Com os dados gerados pela análise exergética foi avaliada a eficiência exergética ambiental e a taxa de poluição total. Da análise dos índices do impacto ambiental para cada um dos processos observa-se que o processo que causa o menor impacto no ambiente é o processo de produção de NPK, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,64) e a menor R^{poli} (0,01). Estes resultados são apresentados na Tabela 5-16.

Tabela 5.16 Valores da eficiência exergética ambiental e da taxa de poluição total para dois processos de produção de fertilizantes

Processo	$\eta_{exerg,amb}$	R^{poli}
Processo de produção de CAN	0,22	0,14
Processo de produção de NPK	0,64	0,01

Os resultados da análise dos índices de impacto ambiental refletem, além do desempenho ambiental dos processos, a caracterização da perda de exergia. Uma comparação mais rigorosa deveria considerar as rotas de produção dos processos de produção dos fertilizantes CAN e NPK, estas rotas não foram consideradas por Hovelius; Hansson (1999) no seu trabalho.

É importante esclarecer que no cálculo da taxa de poluição total dos fertilizantes CAN e NPK, não foi incluída a parcela da exergia associada com a desativação dos rejeitos, devido a que só se contou com os dados fornecidos pelos autores no trabalho.

5.6 Avaliação do impacto ambiental de duas estações de tratamento de esgoto

A análise de impacto ambiental também foi aplicada a duas estações de tratamento de esgoto (ETEs), localizadas na Região Metropolitana de São Paulo, que pertencem ao Projeto Tietê ou Programa de Despoluição do Rio Tietê. Este projeto foi lançado em 1992, e tem como objetivo principal evitar que o esgoto e o lixo cheguem ao Rio Tietê e aos principais rios que nele deságuam.

A unidade de Negócio de Tratamento de Esgotos – AE é responsável pela interceptação, tratamento e disposição final do esgoto do Sistema Principal da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

O Sistema Principal de Esgotos da RMSP é constituído por cinco ETEs, ABC, Barueri, Parque Novo Mundo, São Miguel e Suzano. Estas cinco estações juntas possuem uma capacidade de tratamento de 18 m³/s, no entanto a vazão média de esgoto tratado atualmente é de 11 m³/s, beneficiando uma população de aproximadamente 6.500.000 habitantes. O Sistema Principal compõe-se ainda de 130 km de interceptores, sifões e emissários com diâmetro variando de 0,6 a 4,50 m (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, 2002).

A RMSP foi dividida em duas grandes áreas para efeito de esgotamento sanitário. A área central é densamente urbanizada e comporta um sistema integrado denominado “Sistema Principal” que engloba as bacias drenantes aos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí, e algumas sub-bacias drenantes aos reservatórios Guarapiranga e Billings. As demais áreas, situadas em regiões periféricas, com menor grau de urbanização, são servidas por sistemas próprios, denominados “Sistemas Isolados”.

A análise de impacto ambiental foi realizada para as estações de tratamento de esgoto Barueri e Parque Novo Mundo. A partir dos dados fornecidos pela SABESP, foi realizada uma análise exergética das duas ETEs, e com os dados gerados na análise exergética foram avaliadas e comparadas a eficiência exergética ambiental e a taxa de poluição total.

5.6.1 Descrição das estações de tratamento de esgoto

A seguir é apresentada uma breve descrição de cada uma das ETEs que serão estudadas:

Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri

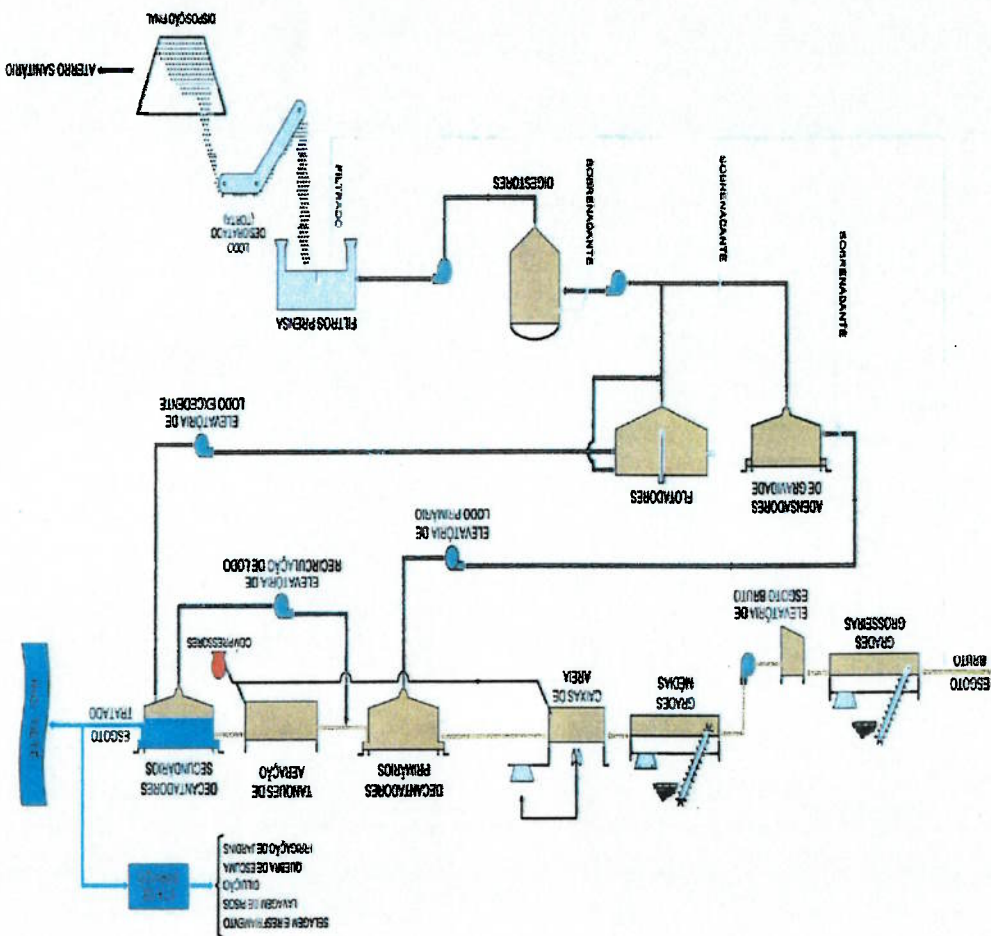
Esta localizada no município de Barueri, na margem esquerda do Rio Tietê, em terreno limitado por este curso d'água e pela estrada de ferro da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). Serve a maior parte da cidade de São Paulo e aos municípios de Jandira, Itapevi, Barueri, Carapicuíba, Osasco, Taboão da Serra e partes de Cotia e Embu. A ETE de Barueri foi projetada na década de 70 para tratar $63 \text{ m}^3/\text{s}$ de esgoto. Com a revisão e atualização do Plano Diretor da RMSP – COPLADES, em 1985, o volume de esgoto a ser tratado passou para $28,5 \text{ m}^3/\text{s}$. O início de operação foi em 11/05/1988, a vazão média de projeto é $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e a população atendida considerando a vazão de projeto é 4.460.000 habitantes, porém atualmente a estação trabalha com uma vazão média de tratamento de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, 2002).

O processo do Tratamento do Esgoto na ETE Barueri é por todo ativado do tipo convencional, em nível secundário, com eficiência de 90% baseada na remoção de carga orgânica expressa em *DBO*. Na Fig. 5-19 é apresentado um fluxograma do processo da Estação de Tratamento de Esgoto, ETE, Barueri. Uma descrição mais detalhada da ETE Barueri e do processo de tratamento do esgoto utilizado na estação são apresentados nos Anexos A e B, respectivamente.

Esta estação está sendo construída em uma área de 20,5 ha de propriedade da SABESP, situada no bairro do Parque Novo Mundo, em São Paulo. Localiza-se na Marginal Tietê com a via de interligação da rodovia Fernão Dias e Av. Aricanduva. O esgoto chega na ETE PNM através de dois receptores, o receptor ITI - 08 que coleta as bacias da Vila Maria e Jardim Japão e o receptor ITI - 09 que coleta as bacias da Cassandoca, Tatuapé, Maranhão, Aricanduva e Tiquatira. Na segunda

Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo (ETE PNM)

Figura 5.19 Fluxograma do processo da ETE Barueri



etapa o esgoto chegará por meio do interceptor ITI – 11, que coletará as bacias do Cabuçu de Cima, Itapegica, Guarulhos, Cubas e Cocaia, e na terceira etapa o esgoto chegará na ETE PNM através do interceptor ITI – 12, que coletará as bacias Eng. Goulart e Vila Sônia. O projeto da ETE – PNM (Parque Novo Mundo) está dividido em três etapas, sendo que a previsão de tratamento para cada etapa é de 2,5 m³/s. Atualmente está trabalhando só a primeira etapa, e atende uma população de aproximadamente 1.100.000 habitantes. A características de cada etapa aparecem na Tabela 5-17.

Tabela 5.17 Etapas do projeto da ETE Parque Novo Mundo

Etapa	Nº de Módulos em Operação	Concentração (mg/l)		Vazão (m ³ /s)	Carga DBO (kgDBO/d)	SST (kg/d)	Capacidade
		DBO	SST				
1	1	308	287	2,5	66528	61992	
2	2	283	261	5,0	122256	112752	
3	3	276	255	7,5	178848	165240	

O processo de tratamento adotado para a ETE PNM foi o de lodos ativados (ver Anexo B), e o grau de tratamento é de 90% de remoção das cargas de DBO e SST. Esta ETE apresenta algumas variações em relação ao tratamento convencional, entre elas destacam-se: a substituição dos decantadores primários por peneiras rotativas; a estabilização química do lodo em excesso, a desidratação mecânica e secagem (ver Fig. 5-20). Uma descrição mais detalhada deste processo é apresentada no Anexo C.

Os dados dos principais insumos da ETE Barueri (energia elétrica, água de reuso, polímeros, $FeCl_3$), da caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final, assim como dos subprodutos gerados (lodo desidratado e gás) e a composição química do lodo desidratado, são apresentados nas Tabelas 5-18, 5-19 e 5-20.

Coleta e tratamento dos dados das Estações de Tratamento de Esgoto, ETEs
 5.6.2 Nos meses de maio, junho e julho de 2003, foram feitas visitas às duas ETEs citadas acima, e foram coletados os dados com os quais foi feita a análise exergética para cada um destes processos. Estes dados são apresentados a seguir:

Figura 5.20 Fluxograma do processo da ETE Parque Novo Mundo

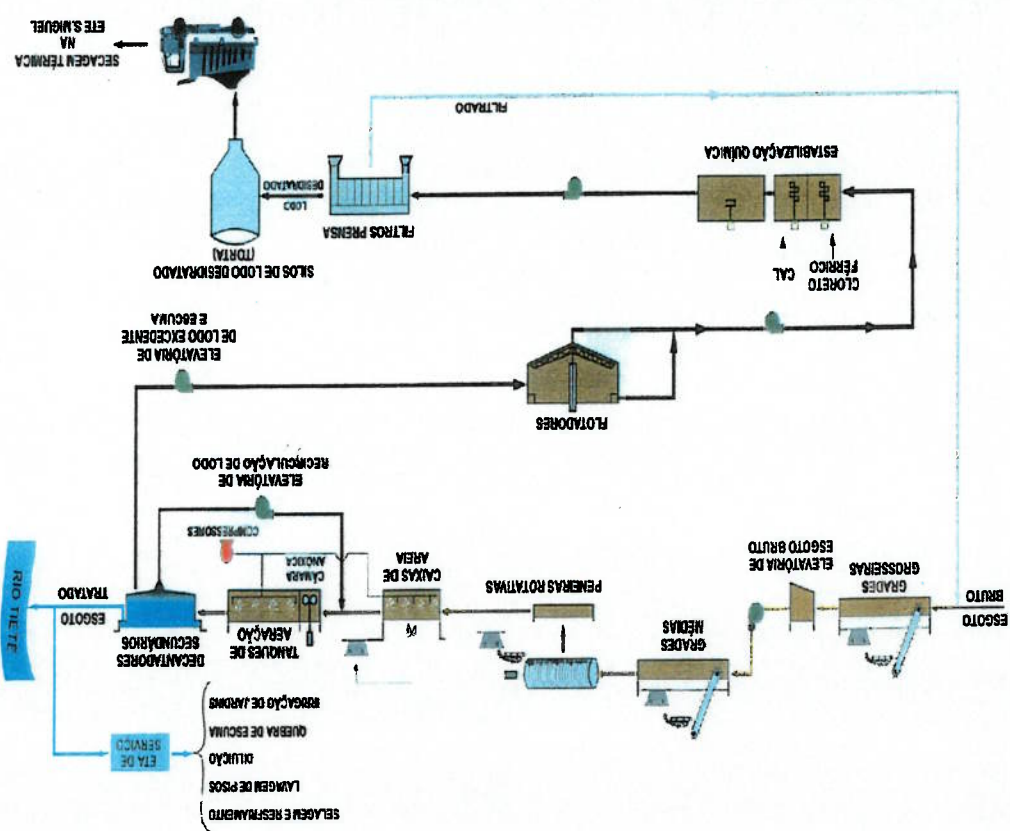


Tabela 5.18 Dados da caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Barueri

Vazão (L/s)		6710	
Afluente		Efluente	
DBO (mg/L)	242	15,4	
DQO (mg/L)	390	45,7	
pH	7,4	7,3	
T (°C)	26,6	26,6	
SS (mL/L)	4,4	0,2	
SST (mg/L)	169	15	
SSV (mg/L)	121	11	
NTK (mg/L)	29	5,3	
NH ₃ (mg/L)	26,3	3,7	
NO ₃ (mg/L)	0,1	10,1	
NO ₂ (mg/L)	0,005	0,1	
OG (mg/L)	60	10,7	
S ₂ (mg/L)	≤ 1	≤ 1	
SO ₄ (mg/L)	41	26	
Cádmio (mg/L)	0,01	0,01	
Mercurio (µg/L)	-	-	
Níquel (mg/L)	0,04	0,04	
Prata (mg/L)	0,011	0,004	
Zinco (mg/L)	0,24	0,1	
Manganês (mg/L)	0,09	0,06	
Molibdênio (mg/L)	< 0,02	< 0,02	
Selênio (µg/L)	-	-	
Chumbo (mg/L)	0,03	< 0,03	
Cobre (mg/L)	0,05	0,03	
Cromo Total (mg/L)	0,07	< 0,02	
Cromo + 6 (mg/L)	< 0,01	< 0,01	
Ferro (mg/L)	3	0,5	
Fenol (mg/L)	0,3	0,05	
Fósforo (mg/L)	3,8	1,8	
Surfactantes (mg/L)	17	1,5	
Estanho (mg/L)	< 0,13	> 0,13	
Coliformes totais (NMP)	1,8 . 10 ⁷	5,9 . 10 ⁶	
E. Coli (NMP)	6,1 . 10 ⁶	5,8 . 10 ⁵	

A coleta destes dados foi feita por Funcionários da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, que trabalham na ETE Barueri (SABESP, 2002). Com o intuito de estabelecer uma comparação entre a ETE Barueri e a ETE

PNM. Foram usados só os valores dos meses de janeiro, fevereiro e março de 2002, para calcular os valores médios dos dados que foram usados em esta análise.

Uma descrição dos parâmetros de qualidade das águas, utilizados na caracterização do esgoto, apresentados na Tabela 5-18, assim como os padrões de emissão de efluentes, são apresentados nos Anexos D e E respectivamente.

Tabela 5.19 Dados dos consumos e dos subprodutos gerados na ETE Barueri

Material gradado (t/mês)	35,2
Areia removida (t/mês)	55
Lodo desidratado produzido (t/mês)	6698
ST Torta (%)	2,8
Consumo de energia elétrica (kWh/mês)	5.804,8
Consumo de água (m ³ /mês)	9155
Consumo de FeCl ₃ (kg/mês)	84853
Consumo de polímeros (kg/mês)	9204
Produção de gás (m ³ /mês)	436468,9
Água de reuso (m ³ /mês)	437

Tabela 5.20 Dados da composição química do lodo desidratado gerado na ETE de Barueri

Componente	mg/kg de lodo
Cádmio	12,7
Chumbo	163,7
Cobre	553,7
Cromo	467,3
Manganes	243,7
Ferro	32481
Níquel	282
Zinco	2081
Prata	63,3
Molibdênio	15

Tratamento dos dados da ETE Barueri

Os dados apresentados na Tabela 5-21 a seguir foram calculados da Tabela 5-18.

Tabela 5.21 Caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Barueri

Afluente	Efluente
DBO (mol/L)	0.0076
DOO (mol/L)	0.0122
NH ₃ (mol/L)	0.0015
NO ₃ (mol/L)	1.6E-06
NO ₂ (mol/L)	1.1E-07
S ₂ (mol/L)	1.6E-05
SO ₄ (mol/L)	0.0004
Cádmio (mol/L)	5.3E-08
Níquel (mol/L)	6.3E-07
Prata (mol/L)	1.0E-07
Zinco (mol/L)	3.6E-06
Manganes (mol/L)	1.7E-06
Molibdênio (mol/L)	2.1E-07
Chumbo (mol/L)	1.7E-07
Cobre (mol/L)	8.7E-07
Cromo Total (mol/L)	1.4E-06
Cromo + 6 (mol/L)	1.9E-07
Ferro (mol/L)	5.4E-05
Fenol (mol/L)	3.4E-06
Fósforo (mol/L)	0.0001
Surfactantes (mol/L)	0.0004
Estanho (mol/L)	1.1E-06

Os dados apresentados na Tabela 5-22 foram calculados a partir da Tabela 5-19.

Tabela 5.22 Consumos e subprodutos gerados na ETE Barueri

Lodo desidratado produzido (kg/s)	2,5
Consumo energia elétrica (kW)	7951,7
Consumo água (g/s)	3483,6
Consumo FeCl ₃ (g/s)	32,3
Consumo polímeros (g/s)	3,5
Produção de gás (g/s)	149,5
Água de reuso (g/s)	166,3

Os dados apresentados na Tabela 5-23 foram calculados da Tabela 5-20.

Tabela 5.23 Composição química do lodo desidratado gerado na ETE de Barueri

Componente	mol/kg de lodo
Cádmio	0,0001
Chumbo	0,0008
Cobre	0,0087
Cromo	0,0090
Manganes	0,0044
Ferro	0,5820
Níquel	0,0048
Zinco	0,0318
Prata	0,0006
Molibdênio	0,0002

Coleta de dados da Estação de Tratamento de Parque Novo Mundo, ETE PNM

Os dados dos principais insumos da ETE PNM (energia elétrica, água, $FeCl_3$, CaO), da caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final, assim como dos subprodutos gerados (lodo desidratado produzido) e a composição química do lodo desidratado, são apresentados nas Tabelas 5-24, 5-25 e 5-26.

A coleta dos dados foi feita por Funcionários da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, que trabalham na ETE Parque Novo Mundo, durante os meses de janeiro, fevereiro e março do 2003. Com base nesses dados, no presente trabalho foram calculados, os valores médios que foram usados nesta análise.

Tabela 5.24 Dados da caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo

Vazão (L/s)	Afluente	Efluente
2130		
	115,5	23,5
<i>DBO</i> (mg/L)	291,1	43,5
<i>DQO</i> (mg/L)	6,8	6,5
<i>T</i> (°C)	26,2	26,5
<i>SS</i> (mL/L)	2,4	0,4
<i>SST</i> (mg/L)	107	19
<i>SSV</i> (mg/L)	89	15
<i>NTK</i> (mg/L)	16,9	8,1
<i>NH₃</i> (mg/L)	13,1	6,1
<i>NO₃</i> (mg/L)	0,6	3,7
<i>NO₂</i> (mg/L)	0,05	0,37
<i>OG</i> (mg/L)	39,5	8,9
<i>S₂</i> (mg/L)	1,1	< 0,6
<i>SO₄</i> (mg/L)	47,2	44,2
<i>Cádmio</i> (mg/L)	< 0,01	< 0,01
<i>Mercurio</i> (µg/L)	5,5	2,7
<i>Níquel</i> (mg/L)	0,13	0,15
<i>Prata</i> (mg/L)	< 0,02	< 0,02
<i>Zinco</i> (mg/L)	0,2	0,1
<i>Manganes</i> (mg/L)	0,1	0,1
<i>Boro</i> (mg/L)	-	-
<i>Selênio</i> (µg/L)	< 0,7	< 0,5
<i>Chumbo</i> (mg/L)	< 0,1	< 0,1
<i>Cobre</i> (mg/L)	0,11	0,03
<i>Cromo Total</i> (mg/L)	0,09	< 0,07
<i>Cromo + 6</i> (mg/L)	0,007	0,006
<i>Ferro</i> (mg/L)	2,2	0,5
<i>Fenol</i> (mg/L)	0,17	0,12
<i>Fósforo</i> (mg/L)	3,3	1,3
<i>Surfactantes</i> (mg/L)	4,9	0,1
<i>Estanho</i> (mg/L)	< 0,48	> 0,48
<i>Coliformes totais</i> (NMP)	2,3 . 10 ⁹	1,8 . 10 ⁶
<i>E. Coli</i> (NMP)	1,6 . 10 ⁸	1,9 . 10 ⁵

Uma descrição dos parâmetros de qualidade das águas, utilizados na caracterização do esgoto, apresentados na Tabela 5-24, assim como os padrões de emissão de efluentes, são apresentados nos Anexos D e E respectivamente.

Tabela 5.25 Dados dos consumos e dos subprodutos gerados na ETE do Parque

Novo Mundo

Material gradeado (t/mês)	2,5
Material penetrado (t/mês)	63,9
Areia removida (t/mês)	45,5
Lodo desidratado produzido (t/mês)	938,4
ST Torta (%)	40,2
Consumo energia elétrica (kWh/mês)	1.899.685
Consumo água (m ³ /mês)	12243
Consumo FeCl ₃ (kg/mês)	86543
Consumo CaO (kg/mês)	66779

Tabela 5.26 Dados da composição química do lodo desidratado gerado na ETE

do Parque Novo Mundo

Cádmio (mg/kg)	6,9
Chumbo (mg/kg)	82,3
Cobre (mg/kg)	282,2
Cromo (mg/kg)	227,3
Manganes (mg/kg)	263,9
Ferro (mg/kg)	46773
Níquel (mg/kg)	88,7
Zinco (mg/kg)	802,7
Prata (mg/kg)	10,2
Molibdênio (mg/kg)	14,8
Arsênio (mg/kg)	10,7
Cobalto (mg/kg)	<6,3
Mercurio (µg/kg)	1,0
Selênio (µg/kg)	0,5

Tratamento dos dados da ETE PNM

Os dados apresentados na Tabela 5-27 a seguir foram calculados da Tabela 5-24.

Tabela 5.27 Caracterização do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo

Afluente	Efluente
DBO (mol/L)	0,0040
DOC (mol/L)	0,0091
NH ₃ (mol/L)	0,0008
NO ₃ (mol/L)	9,2E-06
NO ₂ (mol/L)	1,0E-06
S ₂ (mol/L)	1,7E-05
SO ₄ (mol/L)	0,0005
Cádmio (mol/L)	7,1E-08
Mercurio (mol/L)	2,7E-08
Níquel (mol/L)	2,3E-06
Prata (mol/L)	1,7E-07
Zinco (mol/L)	3,7E-06
Manganes (mol/L)	2,3E-06
Selênio (mol/L)	8,5E-09
Chumbo (mol/L)	3,9E-07
Cobre (mol/L)	1,7E-06
Cromo Total (mol/L)	1,7E-06
Cromo + 6 (mol/L)	1,3E-07
Ferro (mol/L)	3,9E-05
Fenol (mol/L)	1,8E-06
Fósforo (mol/L)	0,0001
Surfactantes (mol/L)	0,0001
Estanho (mol/L)	4,0E-06

Os dados apresentados na Tabela 5-28 foram calculados a partir da Tabela 5-25.

Tabela 5.28 Consumos e subprodutos gerados na ETE do Parque Novo Mundo

Lodo desidratado produzido (kg/s)	0,4
Consumo energia elétrica (kW)	2602,3
Consumo água (g/s)	4658,6
Consumo FeCl ₃ (g/s)	32,9
Consumo CaO (g/s)	25,4

Os dados apresentados na Tabela 5-29 foram calculados da Tabela 5-26.

Tabela 5.29 Composição química do lodo desidratado gerado na ETE do Parque

Novo Mundo

Componente	mol/kg de lodo
Cádmio	6.1E-05
Chumbo	0.0004
Cobre	0.0044
Cromo	0.0044
Mangansês	0.0050
Ferro	0.8375
Níquel	0.0015
Zinco	0.0123
Prata	9.5E-05
Molibdênio	0.0001
Arsênio	0.0001
Cobalto	0.0001
Mercurio	4.8E-09
Selênio	6.8E-09

5.6.3 Análise exergética das ETEs Barueri e Parque Novo Mundo

Considerações e simplificações

- i. As fronteiras do volume de controle para as duas estações de tratamento de esgoto foram desenhadas ao redor das ETEs, isto significa, que não foi calculada a exergia investida na fabricação das substâncias químicas ($FeCl_3$, CaO e polímeros) e de outros produtos usados nos diferentes processos do tratamento do esgoto. A única exergia que foi levada em consideração foi a exergia do composto e do próprio produto.

ii. A exergia da mão-de-obra ou trabalho humano, usada na operação da planta foi considerada desprezível, quando comparada com outros fluxos de exergia, como a exergia teórica da matéria orgânica (Hellstrom, 1997).

iii. A exergia dos edifícios das ETEs não foi considerada.

iv. Na análise exergética são incluídos os fluxos exergéticos associados a: compostos orgânicos e inorgânicos, nutrientes e metais contidos no esgoto, subprodutos gerados como o lodo desidratado (biosólidos) e o metano,

compostos químicos utilizados no processo de estabilização química do lodo e o consumo de energia elétrica.

v. O esgoto é considerado um fluido que contém uma carga poluidora. De acordo com von Sperling, M. (1996) apud Helou (2000), cerca de 99,9 % dos esgotos é constituído por água. Os restantes 0,1 % incluem substâncias suspensas e dissolvidas que necessitam ser removidas mediante tratamento adequado.

vi. O estado de referência considerado na análise exergetica foi o estado de referência padrão do Szargut (1988), a $T_n = 298,15 \text{ K}$ e $P_n = 101,325 \text{ kPa}$. Assim as exergias usadas na análise foram calculadas a partir dos dados apresentados por Szargut (1988) (ver Tabela 5-30 e 5-31).

vii. A exergia do NO_3 foi calculada com uma interpolação a partir dos dados para o NO e NO_2 , como calculado por Ayres; Ayres; Martinás (1997).

viii. Os fluxos exergeticos associados às vazões afluente e efluente das ETEs Barueri e PNM, assim como os associados ao lodo desidratado produzido nas ETEs, foram calculados com a eq. (3.10) (ver Anexo F), considerando-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- mistura ideal (atividade = fração molar: $a_i = x_i$);
- Densidade do esgoto bruto afluente e do efluente final da ETE Barueri = $0,17 \text{ kg/L}$ e $0,011 \text{ kg/L}$ respectivamente;
- Densidade do esgoto bruto afluente e efluente final da ETE PNM = $0,107 \text{ kg/L}$ e $0,02 \text{ kg/L}$ respectivamente.
- $R = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$

ix. Conforme apresentado no item 3.8, a equação do balanço exergetico aplicada para este estudo de caso ficou como segue: ($\sum \text{fluxos exergeticos de entrada}$ - $\sum \text{fluxos exergeticos de saída}$) = ($\sum \text{fluxos de exergia perdida}$) + (*exergia destruída*).
Para a ETE Barueri, os fluxos exergeticos de entrada são: a exergia do esgoto afluente (incluindo DBO e DQO do esgoto afluente), a exergia da

energia elétrica, e a exergia associada ao consumo de água de reuso. O fluxo exergetico de saída para a ETE Barueri é a exergia do efluente final (incluindo DBO e DQO do efluente final), a exergia do lodo desidratado foi considerada como o termo da exergia desperdiçada devido a que o lodo não é aproveitado atualmente para fins agrícolas, e em vez disso é disposto no aterro sanitário Bandeirantes. A exergia dos compostos químicos utilizados na estabilização química do lodo ($FeCl_3$ e polímeros) é a parcela exergetica relacionada à desativação do lodo (rejeito), e por último o termo da exergia destruída é o associado à queima do metano produzido. Existe um projeto que visa o aproveitamento do lodo e do metano, para produção de fertilizantes e energia elétrica, respectivamente.

x. Considerando a mesma equação do balanço de exergia para a ETE PNM, os fluxos exergeticos de entrada e saída são os mesmos da ETE Barueri. Já no termo da exergia da desativação do lodo (rejeito), tem-se uma diferença associada aos compostos químicos utilizados na estabilização química do lodo, que é a utilização de CaO em vez de polímero. Os termos de exergia destruída e desperdiçada são iguais aos descritos para a ETE Barueri no item anterior.

Exergias dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das Estações de Tratamento de Esgoto Barueri e Parque Novo Mundo

A exergia química padrão dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das ETEs analisadas neste trabalho foram calculadas a partir dos dados encontrados em Szargut (1988). Estes valores são apresentados na Tabela 5-30. Essas exergias químicas estão definidas para um estado de referência padrão a $T_n = 298,15$ K, $P_n = 101,325$ kPa (Szargut, 1988).

Tabela 5.30 Exergia química padrão dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das ETEs em kJ/g

Compostos Nitrogenados	$b^{\circ}_{\text{qu}} \text{*(kJ/g)}$	Metals	$b^{\circ}_{\text{qu}} \text{*(kJ/mol)}$
Amônia, NH ₃	19,8	Prata, Ag	0,6
Nitrato, NO ₃	0,4	Zinco, Zn	5,2
Nitrato, NO ₂	1,2	Manganes, Mn	8,8
Compostos Inorg.		Molibdênio, Mo	7,6
Ársenico, As	6,6	Selênio, Se	4,4
Cal, Cá	2,0	Chumbo, Pb	1,1
Cloreto Férreo, FeCl ₃	1,4	Cobre, Cu	2,1
Cobalto, Co	4,5	Cromo, Cr	10,5
Água, H ₂ O	0,05	Ferro, Fe	6,7
Oxigênio, O ₂	0,1	Estanho, Sn	4,6
Sulfeto, S ₂	9,5	Compostos Org.	
Sulfato, SO ₄	1,9	Fenol, C ₆ H ₆ O	33,2
Metals		Fósforo, P	28,1
Cádmio, Cd	2,6	Metano, CH ₄	51,8
Mercurio, Hg	0,6	Surfactante, NaOH	1,9
Níquel, Ni	4,0	Polímero	40

*Szargut, 1998.

Na Tabela 5-31 são apresentadas as exergias químicas em kJ/mol.

Tabela 5.31 Exergia química padrão dos elementos e compostos químicos envolvidos nos processos das ETEs em kJ/mol

Compostos Nitrogenados	$b^{\circ}_{\text{qu}} \text{*(kJ/mol)}$	Metals	$b^{\circ}_{\text{qu}} \text{*(kJ/mol)}$
Amônia, NH ₃	337,9	Prata, Ag	70,2
Nitrato, NO ₃	22,3	Zinco, Zn	339,2
Nitrato, NO ₂	55,6	Manganes, Mn	482,3
Compostos Inorg.		Molibdênio, Mo	730,3
Ársenico, As	494,6	Selênio, Se	346,5
Cal, Cá	110,2	Chumbo, Pb	232,8
Cloreto Férreo, FeCl ₃	230,2	Cobre, Cu	134,2
Cobalto, Co	265,0	Cromo, Cr	544,3
Água, H ₂ O	0,9	Ferro, Fe	376,4
Oxigênio, O ₂	4,0	Estanho, Sn	544,8
Sulfeto, S ₂	1219,2	Compostos Org.	
Sulfato, SO ₄	184,8	Fenol, C ₆ H ₆ O	3128,5
Metals		Fósforo, P	869,7
Cádmio, Cd	293,5	Metano, CH ₄	831,6
Mercurio, Hg	115,9	Surfactante, NaOH	74,9
Níquel, Ni	232,7		

Os fluxos de exergia associados ao esgoto bruto (afluente) e ao efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Barueri, foram calculados utilizando a eq. (3.10), considerando-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

- mistura ideal (atividade = fração molar: $a_i = x_i$);
- Densidade do esgoto bruto afluente = 0,17 kg/L;
- Densidade do efluente final = 0,011 kg/L.

No cálculo, foram utilizados os dados das exergias químicas apresentadas na Tabela 5-31 com os dados apresentados na Tabela 5-21. Estes resultados são apresentados na Tabela 5-32. Os detalhes destes cálculos são apresentados no Anexo F.

Tabela 5.32 Fluxos de exergia associados ao esgoto bruto (afluente) e ao efluente final para a Estação de Tratamento de Esgotos Barueri

Fluxo de exergia (kW)		
Afluente	Efluente	
22,0	0	<i>DBO</i>
109,9	13,9	<i>D_{CO}</i>
237,7	40,9	NH_3
0	3,3E-05	NO_3
9,0E-08	0,0005	NO_2
0,1	0,8	S_2
9,6	34,9	SO_4
2,2E-07	2,0E-06	Cádmio
2,5E-05	0,0002	Níquel
1,2E-07	1,6E-07	Prata
0,0012	0,0017	Zinco
0,0004	0,0017	Manganes
9,1E-06	8,2E-05	Molibdênio
1,7E-06	1,2E-05	Chumbo
2,4E-05	5,0E-05	Cobre
0,0003	0,0003	Cromo
0,3	0,7	Ferro
0,011	0,002	Fenol
3,9	7,7	Fósforo
3,5	0,2	Surfactantes
0,0002	0,002	Estanho
387,1	98,4	TOTAL

Os fluxos de exergia, associados aos consumos na ETE Barueri, foram calculados multiplicando os dados da Tabela 5-30 por os dados da Tabela 5-22. Estes resultados são apresentados na Tabela 5-33 a seguir. Os dados dos fluxos exergeticos dos compostos químicos ($FeCl_3$ e Polimeros), representam a exergia da desativação dos rejeitos, que neste caso é o lodo, que é estabilizado quimicamente por meio destes compostos.

Tabela 5.33 Fluxos de exergia associados aos consumos e aos subprodutos gerados na ETE Barueri

Consumos e subprodutos	Fluxos de exergia (kW)
Energia elétrica	7951,7
Água	191,6
$FeCl_3$	45,8
Polimeros	140
Produção de gás	7748,6
Água de reuso	9,15
TOTAL Consumos	8338,3
TOTAL Subproduto	7748,6

O fluxo de exergia associado ao lodo desidratado gerado na ETE Barueri, foi calculado utilizando a eq. (3.10), considerando a seguinte hipótese simplificadora:

- mistura ideal (atividade = fração molar: $a_i = x_i$)

No cálculo foram utilizados os dados das exergias químicas apresentadas na Tabela 5-31 com os dados apresentados na Tabela 5-23. Os resultados são apresentados na Tabela 5-34. (ver Anexo F)

No cálculo, foram utilizados os dados das exergias químicas apresentadas na Tabela 5-31 com os dados apresentados na Tabela 5-27. Estes resultados são apresentados na Tabela 5-35. (ver Anexo F)

- mistura ideal (atividade = fração molar: $a_i = x_i$);
- Densidade do esgoto bruto afluente = 0,107 kg/L;
- Densidade do efluente final = 0,02 kg/L.

(3.10), considerando-se as seguintes hipóteses simplificadoras: Estação de Tratamento Parque Novo Mundo, foram calculados utilizando a eq. Os fluxos de exergia associados ao esgoto bruto (afluente) e ao efluente final da

Análise exergética da ETE Parque Novo Mundo (PNM)

Componentes	Fluxo de exergia (kW)
Cádmio	1,4E-05
Chumbo	0,0005
Cobre	0,0240
Cromo	0,1711
Manganes	0,0400
Ferro	505,1
Níquel	0,0202
Zinco	1,3
Prata	7,24E-05
Molibdênio	6,9E-05
TOTAL	506,7

Tabela 5.34 Fluxos de exergia do lodo desidratado gerado na ETE de Barueri

Tabela 5.35 Fluxos de exergia do esgoto bruto (afluente) e do efluente final da Estação de Tratamento de Esgotos Parque Novo Mundo

Fluxo de exergia (kW)		Afluente	Efluente
<i>DBO</i>	1,1		0,2
<i>DQO</i>	35,2		2,5
NH_3	29,4		29,6
NO_3	5,1E-05		0,0307
NO_2	5,2E-06		0,0020
S_2	0,0500		0,0640
SO_4	6,3		26,6
Cádmio	2,0E-07		9,4E-07
Mercurio	9,2E-09		1,1E-08
Níquel	0,0002		0,0010
Prata	1,7E-07		8,9E-07
Zinco	0,0006		0,0007
Manganes	0,0003		0,0010
Selênio	3,3E-09		8,8E-09
Chumbo	4,6E-06		2,2E-05
Cobre	5E-05		1,7E-05
Cromo	0,0002		0,0007
Ferro	0,0840		0,0197
Fenol	0,0020		0,0040
Fósforo	1,5		1,0
Surfactantes	0,1427		0,0005
Estanho	0,0012		0,0060
TOTAL	73,8		60,1

Os fluxos de exergia, associados aos consumos na ETE PNM, foram calculados multiplicando os dados da Tabela 5-30 pelos dados da Tabela 5-28. Estes resultados são apresentados na Tabela 5-36 a seguir. Os dados dos fluxos exergéticos dos compostos químicos ($FeCl_3$ e CaO) representam a exergia da desativação dos rejeitos, que neste caso é o lodo, que é estabilizado quimicamente por meio destes compostos.

Componentes	Fluxos de exergia (kW)
Cádmio	4,2E-07
Chumbo	1,4E-05
Cobre	0,0001
Cromo	0,0042
Mangansês	0,0045
Ferro	108,8
Níquel	0,0002
Zinco	0,0204
Prata	1,8E-07
Molibdênio	7,0E-06
Arsênio	4,0E-06
Cobalto	1,1E-06
Mercurio	6,6E-16
Selênio	5,8E-15
TOTAL	108,9

Novo Mundo

Tabela 5.37 Fluxos de exergia do lodo desidratado gerado na ETE do Parque

Tabela 5-37.

No cálculo foram utilizados os dados das exergias químicas apresentadas na Tabela 5-31 com os dados apresentados na Tabela 5-29. Os resultados são apresentados na

- mistura ideal (atividade = fração molar: $a_i = x_i$)

simplicadora:

O Fluxo de exergia associado ao lodo desidratado gerado na ETE PNM foi calculado utilizando a eq. (3.10), (ver Anexo F) considerando a seguinte hipótese

Consumo	Fluxo de exergia(kW)
Energia elétrica	2602,3
Água	256,2
FeCl ₃	46,7
CaO	49,9
TOTAL	2955,2

Tabela 5.36 Fluxos de exergia dos consumos na ETE do Parque Novo Mundo

Nas Figuras 5-21 e 5-22, são apresentadas os balanços exergeticos das ETES PNM e Barueri.

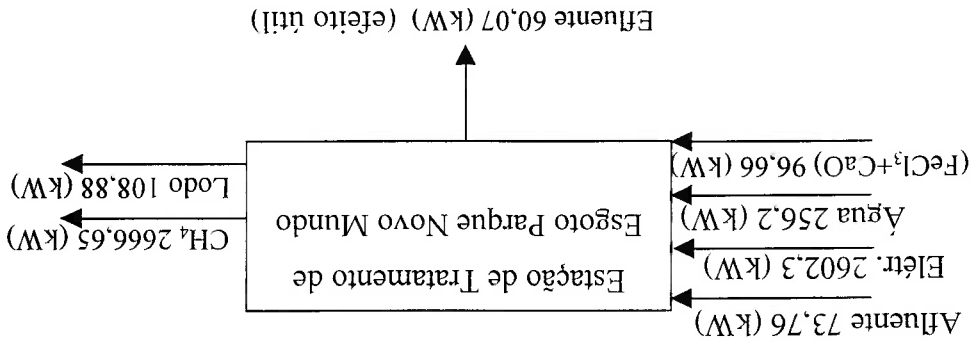


Figura 5.21 Balanço exergetico da ETE Parque Novo Mundo.

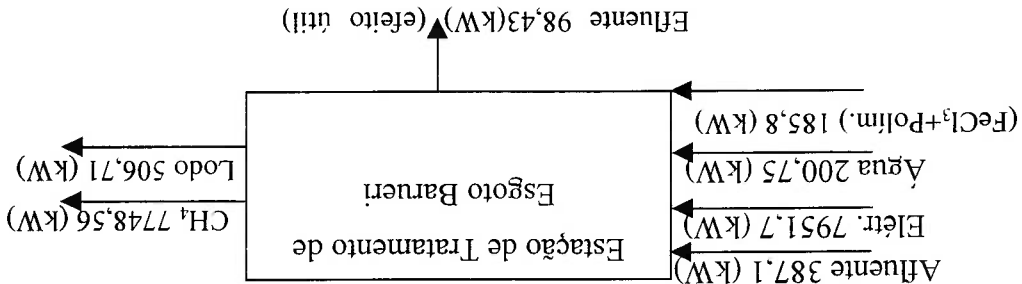


Figura 5.22 Balanço exergetico da ETE Barueri.

Na Tabela 5-38 são apresentados os resultados do balanço exergetico realizado para as duas Estações de Tratamento de Esgoto (PNM e Barueri), aplicando a equação, apresentada no item 3.8. O fluxo exergetico associado com a desativação do lodo (rejeito) foi incluído no fluxo exergetico destruído para os dois casos.

Tabela 5.38 Valores dos fluxos de exerxia de entrada, saída, destruída e perdida para as Estações de Tratamento de Esgoto do Parque Novo Mundo e Barueri

Fluxo de Exerxia	Entrada (kW)	Saída (kW)	Destruída e perdida (kW)
Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo	2932,3	60,1	2872,2
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri	8539,5	98,4	8441,1

Na Tabela 5-39 são apresentados os valores dos indicadores exergeticos calculados a partir dos resultados do balanço exergetico. Estes indicadores foram utilizados na avaliação do impacto ambiental das duas Estações de Tratamento de Esgoto.

Tabela 5.39 Valores da eficiência exergetica ambiental e da taxa de poluição total para as Estações de Tratamento de Esgoto do Parque Novo

Mundo e Barueri

Processo	Índice ambiental	
	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,tot}$
Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo	0,02	47,8
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri	0,01	85,8

Nesta Tabela, observa-se de acordo com os indicadores exergeticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), que o processo que causa o menor impacto no ambiente é a Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo, já que apresenta a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,02) e a menor $R_{pol,t}$ (47,8).

Os baixos valores obtidos para a eficiência exergetica ambiental ($\eta_{exerg,amb}$) foram devidos ao elevado consumo de eletricidade para o pequeno produto gerado. O consumo de energia elétrica representa 93,1 % e 88,7 % do fluxo de energia líquida de entrada nas ETEs Barueri e PNM respectivamente.

Outro termo importante no cálculo dos indicadores exergeticos é a exergetia associada aos rejeitos dos processos (gás produzido e lodo desidratado). Se esta exergetia fosse inteiramente aproveitada como efeito exergetico útil, os valores da $\eta_{exerg,amb}$ para a ETE Barueri e PNM seriam 0,98 e 0,97, e os valores da taxa de poluição ($R_{pol,t}$) para este caso seriam 0. Estes valores são apresentados na Tabela 5-40.

Tabela 5.40 Valores da eficiência exergetica ambiental e da taxa de poluição total para as Estações de Tratamento de Esgoto do Parque Novo Mundo e Barueri

Índice ambiental		Processo
$R_{pol,tot}$	$\eta_{exerg,amb}$	Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo
0	0,97	Estação de Tratamento de Esgoto Barueri

Ao ser analisados os resultados obtidos com a taxa de poluição total (Tabela 5-39), observou-se que para a ETE PNM a $R_{pol,t}$ foi menor que o valor obtido para a ETE Barueri, isto porque os subprodutos da ETE Barueri são 66 % maiores que os obtidos na ETE PNM. É claro que a vazão afluente da ETE Barueri é três vezes maior que a de a ETE PNM.

No presente trabalho foram considerados os subprodutos das ETEs como termos de exergia destruída e perdida, decisão esta que foi baseada na exergia que tem estes produtos e que no presente não está sendo aproveitada: no caso do lodo para fins agrícolas (como fertilizante), e no caso do metano para produção de energia elétrica, ou como combustível para o setor do transporte.

A exergia nos biosólidos devida à matéria orgânica poderia estar disponível pela produção de metano. Também há uma exergia considerável nos biosólidos devido aos nutrientes. Este potencial poderia ser utilizado usando os biosólidos como fertilizantes.

O lodo desidratado produzido nas ETEs Barueri e Parque Novo Mundo não contém nutrientes em sua composição (compostos nitrogenados e fósforo), e possui no ferro a maior percentagem do fluxo exergetico associado ao lodo desidratado : para a ETE Barueri foi 99,7 % e para a ETE PNM 99,9 %.

No cálculo da taxa de poluição total, foi incluída a parcela exergetica relacionada aos compostos químicos utilizados na desativação dos rejeitos (estabilização química do lodo).

Foi concluído que a análise exergetica no contexto da análise do ciclo de vida (ACV), é uma ferramenta importante na análise da sustentabilidade de uma Estação de Tratamento de Esgoto, porque a utilização do conceito de exergetia no cálculo do consumo dos recursos físicos, melhora a qualidade dos dados necessários para a análise de ciclo de vida.

O consumo elevado de exergetia em unidades de lodos ativados é devida à aeração e mistura, na ETE Barueri o consumo de oxigênio foi 34,1 % do fluxo de exergetia associado ao esgoto bruto afluente e para a ETE PNM foi 49,2 %. Deve ser notado que as perdas exergeticas em sistemas de tratamento de esgoto aeróbios são relativamente elevadas devido à redução da matéria orgânica para gás carbônico e água.

Os nutrientes (compostos nitrogenados + fósforo) representam uma parcela importante do fluxo exergetico : no caso da ETE Barueri foram 62,4 % do fluxo de exergetia associado ao esgoto bruto afluente e 49,4 % do fluxo exergetico do efluente final. Para a ETE PNM foram 41,8 % do fluxo exergetico associado ao esgoto bruto afluente e 51,1 % do fluxo exergetico do efluente final. Os compostos de nitrogênio e fósforo no esgoto poderiam ser usados na fotossíntese por plantas verdes.

Não é possível calcular a qualidade biológica de qualquer substância pelo cálculo do conteúdo de exergetia. Conseqüentemente, é importante que o conteúdo de metais pesados e compostos orgânicos perigosos nos biosólidos sejam medidos. O conteúdo de diferentes elementos perigosos deve ser baixo se o potencial de exergetia devido aos nutrientes é usado. Deve-se lembrar que a exergetia só reflete os aspectos termodinâmicos. Por exemplo a toxicidade e o uso de recursos ilimitados devem ser analisados separadamente.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho propõe uma metodologia científica com critérios bem definidos para avaliar e quantificar o impacto ambiental de processos de conversão de energia, numa base única: a exergia. Desta maneira, é possível comparar e caracterizar o desempenho exergético ambiental, e a destruição da exergia destes processos no ambiente. O método da análise exergética do impacto ambiental permite avaliar e quantificar o impacto ambiental de um processo de conversão de energia além das fronteiras do processo. Deve-se ressaltar também a flexibilidade de cenários e situações aos quais esta metodologia é aplicável, podendo-se comparar danos ambientais de cenários bem distintos.

Neste trabalho, esta sendo proposta a eficiência exergética ambiental como um índice de impacto ambiental, que compreende os aspectos de eficiência exergética e impacto ambiental dos processos de conversão de energia.

A avaliação do impacto ambiental por meio da eficiência exergética ambiental $\eta_{exerg,amb}$ é complementada com o cálculo da taxa de poluição total $R_{pol,t}$ (proposta por Makarytchev (1997)), para dados levantados na literatura e, para um estudo de caso de duas Estações de Tratamento de Esgoto (Barueri e PNM), com dados fornecidos pela SABESP. Os estudos de caso analisados a partir dos dados levantados na literatura foram: a) processos de produção de cloro e PVC, b) processos de produção de aço, c) comparação da planta de cogeração de uma indústria de celulose e papel com uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo, d) refinaria de petróleo, e) processos de produção de fertilizantes. Na Tabela 6-1 é apresentado um resumo comparativo dos indicadores exergéticos para os estudos de caso analisados neste trabalho.

Outro aspecto importante a ser considerado, foi a dificuldade no cálculo da taxa de poluição total, já que com exceção dos estudos de caso dos processos de produção de aço do alto forno tradicional com injeção de carvão pulverizado, e das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), a parcela da exergia associada com a desativação dos rejeitos dos processos não foi considerada, devido a que esta informação não foi apresentada pelos autores de cada um dos trabalhos utilizados como base de dados.

Tabela 6.1 Resumo comparativo dos valores da eficiência exergetica ambiental e da taxa de poluição total para os estudos de caso analisados

Processo	<i>Mexerg,amb</i>	<i>Rpolit</i>
Processo de produção de cloro	0,43	0,04
Processo de produção de PVC	0,56	-
Processo de produção de aço do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	0,42	0,55
Processo de produção de aço do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	0,5	0,40
Processo de produção de aço convencional integrado	0,38	0,23
Processo de produção de aço Semi-integrado	0,67	0,03
Processo de produção de aço Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio	0,51	0,11
Processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	0,43	0,14
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível	0,39	0,15
Planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível	0,38	0,18
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	0,30	0,25
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	0,29	0,28
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo	0,33	0,17
Refinaria de petróleo	0,19	-
Refinaria após de ser feita a otimização	0,22	-
Processo de produção de CAN	0,22	0,14
Processo de produção de NPK	0,64	0,01

Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo	0,02	47,8
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri	0,01	85,8
Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo (considerando o metano e o lodo da ETE como efeito útil)	0,97	0
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri (considerando o metano e o lodo da ETE como efeito útil)	0,98	0

Ao fazer uma comparação global dos resultados obtidos por meio do cálculo dos índices de impacto ambiental ($\eta_{exerg,amb}$, R_{poli}), (ver Tabela 6-1), observa-se que de acordo à $\eta_{exerg,amb}$, o processo que causa o menor impacto no ambiente é o processo de produção de aço semi-integrado, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,67), e de acordo à R_{poli} , o processo que causa o menor impacto no ambiente é o processo de produção de fertilizante NPK já que teve a menor R_{poli} (0,01). Nesta comparação também é observado que de acordo com os valores de $\eta_{exerg,amb}$ (0,01), e R_{poli} (85,8) o processo que causa o maior impacto no ambiente é a Estação de Tratamento de Esgoto Barueri. No caso de não considerar os subprodutos (metano e lodo) como efeito útil.

O caso dos processos de produção de cloro e PVC (estudo de caso 5.1), assim como o caso dos processos de produção de fertilizantes CAN e NPK (estudo de caso 5.5), foram avaliados somente pelos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, R_{poli}) devido a que os autores não avaliaram ambientalmente estes processos, e os resultados obtidos da análise do impacto ambiental para o estudo de caso 5.1 mostraram que o processo que causa o menor impacto no ambiente é o de produção de PVC, uma vez que apresentou a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,56); este estudo de caso não foi avaliado por meio da R_{poli} devido a dados incompletos no fluxo da exergia perdida do processo de produção de PVC. Para o estudo de caso 5.5 observou-se que o processo que causa o menor impacto no ambiente é o processo de produção de fertilizante NPK, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,64) e a menor R_{poli} (0,01).

No processo de produção de aço do alto forno tradicional (estudo de caso 5.2.1), a avaliação do impacto ambiental por meio dos indicadores exergéticos ($M_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$), mostrou ser um método coerente com as soluções ambientais (injeção de carvão pulverizado), que visam a diminuição das emissões dos gases efeito estufa. Já que os resultados da análise do impacto ambiental por meio dos indicadores exergéticos estiveram de acordo aos resultados obtidos da análise dos parâmetros ambientais utilizados na análise de Yagi; Akiyama (2001). Os resultados de ambas análises mostraram que o processo que causa o menor impacto no ambiente é aquele do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, já que teve a maior $M_{exerg,amb}$ (0,5), a menor $R_{pol,i}$ (0,40), a menor exergia destruída e perdida (8,0 GJ/thm) e a menor emissão de CO_2 (479,2 kg-c/thm). É importante esclarecer que o efeito da injeção do carvão pulverizado está incluído no cálculo dos indicadores exergéticos ($M_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$). No caso do cálculo da taxa de poluição total, essa injeção de carvão representa a parcela da exergia destruída na diminuição das emissões de CO_2 .

Na comparação dos quatro processos de produção de aço (estudo de caso 5.2.2), os resultados da análise dos indicadores exergéticos ($M_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$) estiveram de acordo com os apresentados por Costa; Schaeffer; Wortell (2001) ($M_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$) *exergia das emissões e rejeitos*, que mostraram que o processo que causa menor impacto ambiental dos quatro apresentados é o processo de produção de aço semi-integrado, uma vez que teve a maior $M_{exerg,amb}$ (0,67), a menor $R_{pol,i}$ (0,03), a maior M_{exerg} (0,67) e a menor exergia associada às emissões e rejeitos (0,04 GJ/l.de aço). Os valores iguais nas eficiências exergética e ambiental para os quatro processos devem-se a que o volume de controle considerado para o cálculo das eficiências é o mesmo. Isto, devido ao fato de só se contar com os dados apresentados pelos autores no trabalho.

Finalmente foi feita uma comparação dos resultados obtidos por meio dos indicadores exergéticos de impacto ambiental ($M_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$), para os seis processos de produção de aço (estudo de caso 5.2), e da análise dos resultados observou-se que o processo que causa menor impacto ambiental dos seis analisados é o processo de produção de aço semi-integrado, já que teve a maior $M_{exerg,amb}$ (0,67), a menor $R_{pol,i}$ (0,03).

Na comparação dos arranjos da planta de cogeração da indústria de celulose e papel, os resultados da análise dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$) estiveram de acordo com os apresentados por Nasholm; Svedberg; Westermarck (1993) (η_{exergT} , η_{exergT}), que mostraram que a planta que causa menor impacto ambiental das cinco apresentadas é a planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,39), a menor $R_{pol,i}$ (0,15), a maior exergética total e ambiental para as quatro configurações estudadas da indústria de celulose e papel, devem-se a que o volume de controle considerado para o cálculo das eficiências para cada um dos casos foi o mesmo, devido a que só se contou para o cálculo com os dados apresentados pelos autores no trabalho.

Na refinaria de petróleo (estudo de caso 5.4), a avaliação do impacto ambiental por meio dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$), mostrou ser um método coerente com as soluções ambientais (otimização da refinaria), que visam a diminuição das emissões poluentes na refinaria (CO, SO_x, NO_x, HC e SP matéria particulada suspensa). Os resultados da análise do impacto ambiental por meio dos indicadores exergéticos estiveram de acordo com os resultados obtidos na análise do parâmetro ambiental utilizado por Anaya, et al. (1990). Os resultados de ambas análises mostraram que o processo que causa o menor impacto ambiental é o da refinaria após a otimização, já que esse caso teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,22), e uma redução nas emissões dos gases de chaminé, que corresponde a 12,8% da emissão total da refinaria na operação real. A taxa de poluição total não pode ser avaliada devido a que os autores não apresentaram os dados discriminados da exergia destruída e perdida.

No caso das Estações de Tratamento de Esgoto, ETES, Os resultados dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,i}$), mostraram que o processo que causa o menor impacto no ambiente é o da Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo, já que apresenta a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,02) e a menor $R_{pol,i}$ (47,8).

Os baixos valores obtidos da eficiência exergetica ambiental ($\eta_{exerg,amb}$) para as duas ETEs, devem-se principalmente ao elevado consumo de electricidade para o pequeno produto gerado, além da grande quantidade de metano e lodo desperdiçada. O consumo de energia eléctrica representa a maior percentagem do fluxo de exerxia líquida de entrada nas ETEs, na ETE Barueri foi 93,1 % e na ETE PNM foi 88,7 %.

Outro fato importante a ser considerado nos baixos valores obtidos na eficiência exergetica ambiental das ETEs, é que a exerxia contida nos subprodutos gerados (metano e o lodo) no momento não está sendo aproveitada. Se essa exerxia fosse considerada como parte do efeito útil dos processos das ETEs, os valores da $\eta_{exerg,amb}$ para a ETE Barueri e PNM seriam 0,98 e 0,97, e os valores da taxa de poluição ($R_{pol,i}$) para este caso seriam 0. Da análise destes últimos resultados observa-se o grande potencial de melhoria que têm estes processos, uma vez que só garantindo uma composição química adequada do lodo, para que este possa ser aproveitado como fertilizante (fins agrícolas), e o aproveitamento do metano produzido como combustível, faz com que os processos das ETEs sejam aqueles que apresentem o menor impacto no ambiente, já que além de mitigar o impacto ambiental do esgoto no rio Tietê, aproveitam a exerxia contida em sua carga poluidora.

Concluiu-se que as análises exergeticas dos impactos ambientais fornecem uma abordagem coerente com as opções tecnológicas que primam pela sustentabilidade de soluções ambientais, permitindo uma avaliação ambiental diferente da abordagem termoeconômica.

Da análise dos resultados dos indicadores exergeticos do impacto ambiental para os estudos de caso analisados, pode ser observado que apesar do conceito de exerxia apresentar uma limitação, devido a que ele não fornece informação respeito da toxicidade e da qualidade biológica de qualquer substância, é uma ferramenta útil na quantificação do impacto ambiental dos processos de conversão de energia, do ponto de vista do desempenho ambiental dos processos ($\eta_{exerg,amb}$), assim como na caracterização da destruição da exerxia no ambiente ($R_{pol,i}$).

Os resultados mostraram que a eficiência exergética ambiental é um índice de impacto ambiental que ao ser usado com a taxa de poluição total, pode ser utilizado para avaliar e quantificar o impacto ambiental de um processo de conversão de energia. Com os resultados obtidos dessa avaliação e quantificação, pode ser feita a otimização do desempenho ambiental do processo, o que se reflete diretamente em sua análise econômica.

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

- Aprofundar a análise para os processos mitigadores de impacto ambiental como o caso das Estações de tratamento de esgoto, procurando melhor quantificar o termo da exergia de mistura nas vazões afluente, efluente, gás metano e lodo desidratado produzido;
- Incluir uma análise termoeconômica na metodologia apresentada para avaliação de processos de conversão de energia.
- Desenvolver pesquisas que permitam avaliar as relações entre os indicadores exergéticos e tópicos como a toxicidade e a qualidade biológica para qualquer substância.

ANEXO A - DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

BARUERI¹

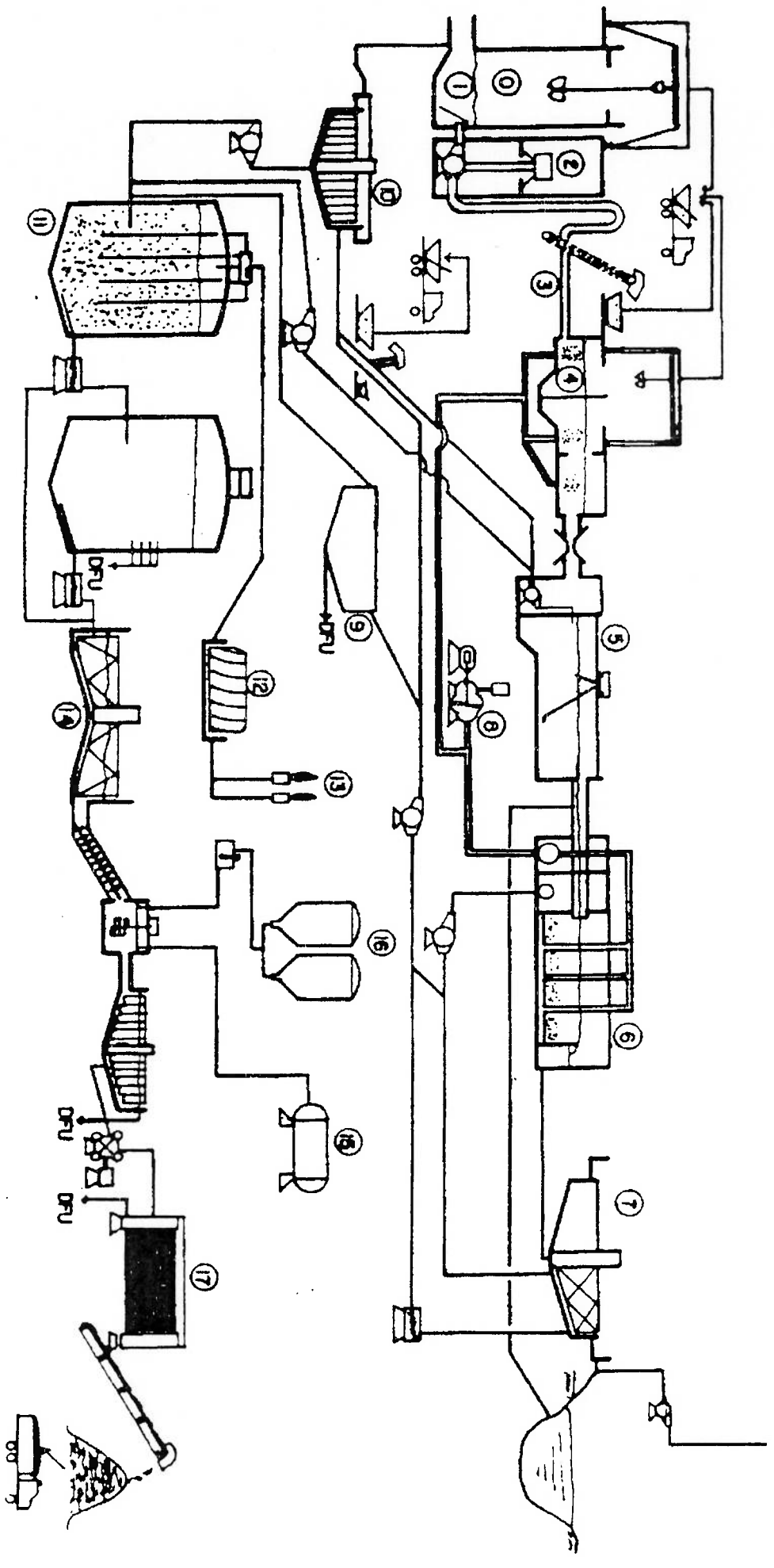
A Estação de Tratamento de Esgotos Barueri está localizada no município de Barueri, na margem esquerda do Rio Tietê, em terreno limitado por este curso d'água e pela estrada de ferro da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). Devido às grandes distâncias existentes entre as diversas unidades constituintes do processo de tratamento, optou-se por uma concepção de projeto onde as informações provenientes do sistema de instrumentação, fossem centralizadas em nove painéis de controle, em locais estrategicamente distribuídos na planta. De acordo com essas centrais de informações, a estação foi subdividida em nove áreas (ver Figura A-1), cujas características básicas serão descritas a seguir.

Área 1 – poço distribuidor e elevatória final: o esgoto chega à FTE por meio do interceptor Tietê Oeste Margem Sul (TTI-6), instalado a cerca de 30 metros de profundidade, que encaminha o fluxo ao poço distribuidor. Devido às longas distâncias percorridas pelos emissários e interceptores o poço de distribuição tem uma profundidade de 37 m, onde, por bombeamento, o esgoto é recalcado até o canal afluente às grades mecanizadas. Devido às baixas velocidades do esgoto no poço, foi prevista a construção de um pórtico móvel, que, por meio de guindaste (pontes rolantes) provido de cagamba tipo “Clam Shell”, promove periodicamente a remoção do material sedimentado e da espuma. O poço é também equipado com sistema de insuflamento de ar para a eliminação dos gases liberados pelo esgoto. A água residual é recalçada a uma altura geométrica de cerca de 30 m, por intermédio de 4 (quatro) conjuntos elevatórios, operando com motores de 3100 HP de velocidade variável e fixa. Cada conjunto trabalha com vazões na faixa de 3 a 6 m³/s.

Esta prevista a entrada em funcionamento de um sistema de instrumentação que permitirá o controle automático de velocidade de rotação das bombas, de modo a

¹ Helou, 2000; Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 2002.

FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA ETE - BARUERI



Água de Utilidades

manter o nível desejado no poço distribuidor. Além de receber a vazão proveniente dos interceptores, o poço de distribuição recebe as circulações oriundas dos processos de adensamento por gravidade e flotação, de digestão, de desidratatção mecânica do lodo e de todo o sistema de drenagem da ETE.

Área 2 – grades mecanizadas, caixas de areia e tanques de pré-aeração: as grades recebem o esgoto bombeado por meio de canais cobertos e aerados com difusores de bolha grossa, com intuito de evitar problemas de odores e a sedimentação de sólidos em suspensão. A referida unidade é constituída por barras paralelas fixadas em posição inclinada em 75° com a horizontal, de 12,7 x 76,2 mm (1/2 e 3") e espaçadas 25 mm (1") entre si. As duas grades existentes são do tipo "front clean – front return" ou seja, o sistema de limpeza, tanto na fase de remoção como no retorno, é feito pela frente da grade de forma que o material eventualmente não removido do rastelo seja lançado à montante da grade e assim reconduzido para uma nova captura. O material reído é removido por meio de um sistema de rastelos de acionamento automático. O controle de acionamento automático de rastelos é efetuado por tempo ou perda de carga (diferença de nível do fluido à montante e jusante da grade). Concomitante ao sistema de rastelos ocorre o acionamento de uma correia transportadora, que encaminha o material removido para as caçambas especialmente destinadas a este fim.

Os sólidos suspensos, de elevado peso específico, são removidos em duas caixas de areia. Estas unidades são do tipo aerada de fluxo orbital, que se caracterizam pela remoção do material com baixo teor de matéria orgânica, eliminando assim, a necessidade de dispositivos de lavagem. A taxa de ar, nessas unidades, é controlada automaticamente por instrumentação apropriada. O material depositado é removido periodicamente por meio de guindastes (pontes rolantes) providos de caçambas tipo "Clam Shell" que alimentam caminhões.

Devido às características sépticas apresentadas pelo esgoto em função do longo tempo de trajeto até a estação, foi prevista a execução de tanques de pré-aeração no sentido de controlar odores. O ar é introduzido à massa líquida, por meio de

difusores de bolha grossa, a uma taxa também controlada automaticamente por sistema de instrumentação.

Área 3 – decantadores primários: a remoção dos sólidos em suspensão é realizada em unidades de decantação primária de forma retangular, com 95 metros de comprimento, 18 metros de largura e 3,5 metros de altura útil (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, 2002).

Os oito decantadores primários existentes na ETE Barueri removem sólidos numa fração média de 60 a 70% e de DBO na faixa de 30%. O lodo assim produzido é conduzido de jusante para montante por meio de um raspador de fundo a três poços existentes na extremidade de montante de cada decantador. O raspador de fundo tem uma periodicidade de 1 hora e cada um dos poços é esgotado por meio de bombas por 20 minutos. Assim, o lodo primário é encaminhado continuamente ao tratamento sólido (Área 6) (Helou, 2000).

Área 4 – tanques de aerção e compressores: o esgoto decantado é conduzido a tanques de aerção de forma retangular com 130 m de comprimento, 25 m de largura e 6 m de altura útil. Os oito tanques de aerção são dotados de 8500 difusores cerâmicos de bolhas finas por tanque, alimentados por meio de um sistema de tubulações de ar de UPVC (cloreto de polivinila não plastificado). As tubulações de alimentação do sistema de distribuição são de aço inoxidável. A alimentação proveniente dos decantadores primários, é feita lateralmente por meio de um sistema de comportas e o vertimento, é feito na outra extremidade por meio de um sistema de vertedores que encaminham o efluente ao sistema de decantação secundária. A recirculação proveniente dos decantadores secundários arlui ao tanque de aerção por meio da extremidade de montante. O sistema opera como mistura completa, sendo porém possível sua operação como fluxo de pistão ('plug-flow') através de um sistema de comportas situado na extremidade de jusante.

O suprimento de ar para os tanques de aerção e tratamento preliminar é efetuado por quatro compressores do tipo centrífugo multiestágio de 102000 N.m³/h. Os quatro compressores instalados tem capacidade para atender a demanda de dois módulos de tratamento.

Área 5 – decantadores secundários: a separação da massa biológica dos tanques de aerção se realiza em clarificadores circulares com diâmetro interno de 46 m e uma profundidade de 4 m. São 16 decantadores secundários, dos quais quatro foram adicionados posteriormente devido a um acréscimo de vazões provenientes do emissário Pinheiros.

A extração do lodo do fundo se dá por dispositivos de sucção (por gradiente hidráulico). Este sistema permite a retirada do lodo ao longo de todo o fundo do decantador, reduzindo os riscos de anaerobiose. O sistema possui uma linha de retorno que encaminha parte do lodo ativado novamente ao tanque de aerção e uma linha de descarte que encaminha o lodo secundário aos adensadores por flotação. O efluente final é descartado no Rio Tietê por meio de três eixos (Helou, 2000; Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, 2002).

As elevatórias de recirculação de lodo ativado estão dimensionadas para trabalhar com taxas de recirculação na faixa de 30% a 90%. A taxa de recirculação é fixada e controlada automaticamente por intermédio de instrumentação apropriada. Existem, ainda, dispositivos que permitem a automação do controle de descarte do lodo em excesso, por meio de uma derivação da linha de retorno ou diretamente do “mixed liquor” (descarte hidráulico). Quando se utiliza a primeira forma de descarte, o lodo é conduzido para o tratamento de fase sólida por bombeamento em conjuntos elevatórios, especialmente destinados a esse fim (elevatória de excesso de lodo). Por outro lado, quando se utiliza o descarte hidráulico (via “mixed liquor”), o lodo é recirculado por gravidade para o início do tratamento. Os clarificadores contam ainda com um sistema de retirada e bombeamento de escuma.

Área 6 – adensadores, digestores e gasômetro: o projeto prevê o adensamento do lodo primário em adensadores por gravidade e do lodo ativado em adensadores por flotação.

São 4 adensadores por gravidade circulares de diâmetro interno de 29 m e profundidade da lâmina d’água de 3,5m (lateral). Os quais recebem o lodo primário por meio de uma caixa de distribuição situada no centro geométrico dos adensadores de forma a garantir uma distribuição equitativa de vazão para cada um deles. A parte

superior é dotada de vertedores triangulares, tipo dente de serra, que encaminham o sobrenadante ao poço distribuidor. Foram previstos dispositivos para a adição de água de diluição ao lodo, de modo a garantir uma taxa de aplicação superficial adequada à prevenção de odores. O controle da vazão de diluição é efetuado por meio de sistema de instrumentação apropriado. A remoção do lodo é feita pelo fundo por meio de um sistema de recalque que encaminha este lodo ao sistema de digestão.

São seis adensadores circulares de flotação com 14,60 m de diâmetro e volume de 535 m³. Os flotadores por ar difuso recebem o lodo biológico proveniente do descartar do sistema de decantação secundária. Este lodo é misturado a uma emulsão de ar e água de reúso proveniente de um tanque de retenção onde o ar é injetado. A mistura provoca a flotação das partículas sólidas que são coletadas por meio de escumadores de superfície que conduzem o lodo flotado para um poço de lodo de onde é bombeado para os digestores. O efluente líquido dos tanques é conduzido para o poço distribuidor através da drenagem de fundo (DFU). Os materiais que se sedimentam no fundo do tanque são removidos por raspadores de fundo e conduzidos para os poços de lodo.

O lodo proveniente dos adensadores (lodo primário adensado) e dos flotadores (lodo biológico adensado) chega à área dos digestores por linhas independentes, as quais são reunidas em uma única linha para a alimentação de cada grupo de quatro digestores. Para tanto, existem caixas de manobra de válvulas localizadas próximas aos digestores.

Dos oito biodigestores de alta taxa existentes, quatro apresentam sistema de aquecimento, os quatro restantes atuam como tanques de acumulação (TAC). A ausência de aquecimento inibe a destruição de sólidos voláteis. Cada biodigestor tem cobertura fixa e um volume útil de 10492 m³, e é equipado com um sistema de agitação de gás, constituído por tubulação de aço galvanizado para coleta de gás. Este gás é encaminhado a um compressor. O gás pressurizado é devolvido por meio de doze tubos de injeção. O excesso de gás produzido em cada digestor é coletado individualmente por tubulações de ferro fundido equipadas com corta-chamas, acumulador de sedimentos, medidor de gás (gasômetro) e sistemas de proteção

(válvulas de alívio e quebra vácuo), e encaminhados para os queimadores (Helou, 2000).

Áreas 7 e 8: compreendem as áreas de controle operacional da ETE, localizadas no edifício administrativo.

Área 9 – desidratação e condicionamento químico do lodo: o lodo digerido é enviado por bombeamento ou por gravidade ao tanque de acumulação (tanque 22) e posteriormente recalcado por meio de bombas parafuso às células de condicionamento químico onde é feita a adição de cloro férrico (aplicação entre 3% e 5% em base seca). O lodo segue ao tanque de lodo condicionado (tanque 16), é bombeado por bomba pistão de alta pressão (seis bombas disponíveis) e antes de alimentar o filtro prensa é dosado polímero catiônico na linha de recalque do lodo utilizando aplicação máxima de 6 kg de polímero catiônico em pó para cada tonelada de lodo digerido (base seca).

Atualmente a desidratação do lodo conta com 3 Filtros Prensa de Placa, composto por 151 placas de 4 m² (2 m x 2 m) cada e uma série de esteiras que conduzem o lodo descarregado do filtro ao pátio de lodo. A produção de lodo desidratado é de 250 toneladas por dia (em média) e tem como destino o Aterro Sanitário Bandeirantes.

Elevatória de utilidades: em virtude do grande volume de água necessário na operação da estação foi previsto um sistema que promove a reutilização desta, após tratamento adicional do efluente final, para diversas utilidades, entre as quais, selagem de gaxeta de equipamentos, diluição, quebra espuma e lavagem.

ANEXO B - TRATAMENTO BIOLÓGICO DE ESGOTOS POR LODOS

ATIVADOS²

O tratamento de esgotos é fundamental para proteger o meio ambiente. Por meio dele, toda a água retirada da natureza, após ser utilizada, retorna com uma carga mínima de poluição. Este tratamento tem como objetivo principalmente: remover o material sólido; reduzir a demanda bioquímica de oxigênio; exterminar microorganismos patogênicos e reduzir as substâncias químicas indesejáveis. No tratamento biológico de esgotos por lodos ativados, o esgoto efluente do decantador primário é destinado a um tanque de aeração onde é misturado com o lodo ativado. Chama-se lodo ativado o floco produzido no esgoto pelo crescimento de bactérias zoogléias ou outros organismos, na presença de oxigênio dissolvido. Estes flocos atraem a matéria orgânica presente no esgoto, a qual é sedimentada como lodo, no decantador secundário. Parte deste material retorna ao processo, para garantir sempre a presença de lodos ativados no tratamento biológico, sendo o restante destinado às instalações de processamento de lodo. O ar é introduzido nos tanques de aeração por meio de difusores.

O tratamento biológico de esgotos por lodos ativados, utilizado pela SABESP nas duas Estações de Tratamento de Esgoto estudadas aqui (PNM e Barueri), consiste em submeter a matéria orgânica presente nos esgotos a uma comunidade de microorganismos que são "cultivados" nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), para que promovam sua depuração (limpeza). O líquido devolvido ao rio tem cerca de 95% de remoção de sua carga poluidora.

Esses microorganismos utilizados no tratamento são conhecidos como decompositores. São os mesmos encontrados na natureza, só que nas Estações de esgotos a quantidade é muito maior, devido às condições favoráveis para seu desenvolvimento, pois o alimento (matéria orgânica) é abundante. Esta comunidade

² http://www.sabesp.com.br/sabesp_ensina/intermediario/lodos_ativados/default.htm

de microorganismos é composta basicamente por bactérias, protozoários e micrometazoários. Os principais tipos de microorganismos do lodo ativado são descritos a seguir:

Bactérias

são microorganismos unicelulares, e estão entre os seres vivos de estrutura mais simples. Existem bactérias no ar, na água e no solo, mas as bactérias associadas ao esgoto são aquáticas. As bactérias presentes no lodo ativado são de dois tipos: bactérias livres e filamentosas.

As bactérias livres são as que mais contribuem para a depuração do esgoto, pois estão presentes em maior número. Formam o flocos de lodo ativado, que servirá de substrato (alimento) para o resto da comunidade. As bactérias filamentosas são bactérias que se apresentam unidas entre si, formando filamentos. Constituem o esqueleto do flocos de lodo ativado, mas quando presentes em quantidades exageradas, em virtude de condições específicas, causam um problema conhecido como “*bulking*” (aumento do volume de lodo). O “*bulking*”, na maioria das vezes, leva a uma redução da qualidade do esgoto tratado.

Protozoários

São microorganismos unicelulares, mas possuem uma estrutura mais complexa e são maiores que as bactérias. Os principais grupos de protozoários presentes nos lodos ativados são os ciliados, as amebas e os flagelados.

Os protozoários ciliados possuem cílios pelo corpo, utilizados tanto para locomoção como para obtenção de alimento. No lodo ativado, encontramos dois grupos principais: os ciliados livres, que se locomovem livremente pelo lodo e alimentam-se de matéria orgânica, bactérias e até outros protozoários, e os ciliados fixos, que ficam aderidos ao flocos por uma haste (pedúnculo) alimentando-se de partículas em suspensão, e contribuindo para a remoção da turbidez do efluente final.

As amebas, assim como os cilíados, alimentam-se de partículas e bactérias. De acordo com a espécie, as amebas indicam a qualidade do efluente final e se está ou não ocorrendo nitrificação (conversão da amônia em nitrato).

Os flagelados são dotados de estrutura semelhante a um chicote, chamado flagelo, utilizado para locomoção, alimentam-se de matéria orgânica particulada e dissolvida.

Micrometazóários

São pequenos animais, ou seja, não são unicelulares. Têm uma organização complexa, com aparelhos como o digestivo, o reprodutor etc. Entre os micrometazóários do lodo ativado os rotíferos são os mais comumente encontrados. Alimentam-se de protozoários e bactérias que formam o flocos, contribuindo, desta forma para a renovação dos microorganismos que compõem a comunidade.

Como se pode observar, os lodos ativados são formados por uma comunidade de microorganismos onde cada indivíduo tem o seu papel e todos são interdependentes. É importante salientar que os microorganismos que compõem esta comunidade podem variar em espécies. Isto vai depender das características operacionais e do esgoto afluente à estação.

ANEXO C. DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARQUE NOVO MUNDO³

As unidades que compõem a ETE PNM são:

- a) Grade grosseira mecanizada (2 unidades – primeira etapa)
- b) Elevatória final (1 unidade – etapa completa)
- c) Grade média mecanizada (2 unidades – primeira etapa)
- d) Peneiras rotativas (8 unidades – primeira etapa)
- e) Caixas de areia areadas (2 unidades – primeira etapa)
- f) Tanques de aeração (3 unidades – primeira etapa)
- g) Decantadores secundários (6 unidades – primeira etapa)
- h) Elevatória de recirculação de lodo (2 unidades – primeira etapa)
- i) Elevatória de excesso de lodo e espuma (2 unidades – primeira etapa)
- j) Elevatória de água de utilidades (1 unidade – etapa completa)
- k) Adensadores por flotação (2 unidades – primeira etapa)
- l) Estabilização química (unidade em construção – etapa única)
- m) Desidratação mecânica do lodo (unidade em construção – etapa única)

Tipo e grau de tratamento : O processo de tratamento adotado para a ETE PNM é o de lodos ativados, e o grau de tratamento é de 90% de remoção das cargas de DBO e SST. Esta ETE apresenta algumas variações em relação ao tratamento convencional, entre elas destacam-se :

- Substituição dos decantadores primários por peneiras rotativas;

³ Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, 2003.

- Estabilização química do lodo em excesso, desidratação mecânica e secagem térmica.

Sistema de interceptação : O esgoto chegará na ETE PNM por meio de 4 interceptores,

são eles:

- ITI – 08: que coleta as bacias da Vila Maria e Jardim Japão;
- ITI – 09: que coleta as bacias da Cassandoca, Tatuapé, Maranhão, Aricanduva e Tiquatira;
- ITI – 11: que coletará as bacias do Cabuçú de Cima, Itapegica, Guarulhos, Cubas e Cocaia;
- ITI – 12: que coletará as bacias Eng.º Goulart e Vila Sonia.

Dos quais só estão trabalhando os correspondentes à primeira etapa

- 1ª Etapa: ITI – 08 e ITI – 09
- 2ª Etapa: ITI – 11
- 3ª Etapa: ITI – 12

A ETE PNM está dividida em duas áreas, a fase líquida e a fase sólida, a seguir são descritas.

Fase líquida

Composta das seguintes partes:

a) Estação elevatória final: a estação elevatória final de esgoto bruto tem como objetivo receber todo esgoto afluente à ETE, tem forma circular, adotada em virtude das vantagens estruturais e construtivas que apresenta, quando comparada com a forma retangular, bem como da minimização da área ocupada. É composta de:

- Grades grosseiras mecanizadas, com espaçamento de 100mm, que entram em operação por diferencial de nível ou temporizador,

precedem o bombeamento dos esgotos, e têm a finalidade de reter os sólidos grosseiros provenientes dos interceptores;

- Bombas de recalque do esgoto bruto. São três unidades de velocidade variável (uma de reserva), com as seguintes características: vazão de 1,57 a 3,05 m³/s; altura manométrica média de – 23,4 m.c.a.; uma potência de 1100 cv e 508 RPM. As bombas estão instaladas radialmente e no setor diametralmente oposto à chegada do esgoto no poço úmido e os motores estão instalados sobre as bombas;

- Poço seco. É donde estão abrigadas as bombas, e tem um diâmetro de 26,8 m.

- Poço úmido, ou de sucção. É concêntrico com o poço seco e tem um diâmetro de 10 m.

b) Grades médias mecanizadas: são duas unidades, sendo uma delas reserva; localizam-se a jusante da elevatória final, o gradeamento é feito por meio de grades de barras paralelas, com peso específico de 1,0 t/m³ e abertura de 25 mm, a limpeza é mecanizada por meio de rastelo movimentando-se com uma velocidade de 0,4 à 1,0 m/s, pela frente das grades, com acionamento automático por diferença de nível, ou por temporizador. Nas grades ficam retidos os materiais flutuantes, que são posteriormente dispostos em aterros sanitários (Companhia de Saneamento Básico de São Paulo – SABESP, 2003).

c) Peneiras rotativas: são a alternativa aos decantadores primários, devido a área reduzida para construção da ETE. As oito peneiras têm as seguintes características: são do tipo rotativo, com operação contínua ou intermitente, a velocidade do cilindro é de 5 RPM, a capacidade de tratamento por peneira é de 0,55 m³/s, a vazão de água de limpeza é 0,06 L/s por bico, o número de bicos por peneira é 50, com um tambor de telas de aço inoxidável com abertura de 0,75 mm e com alimentação pelo centro do equipamento. Nas peneiras ficam retidos os materiais mais finos contidos nos esgotos,

correspondendo a uma remoção de DBO e SST da ordem de 10% e 15% respectivamente. Para prevenção de problemas com odores, as peneiras têm encapsulamento de chapas de aço inoxidável, permitindo a sucção e o tratamento dos gases gerados no seu interior. O material retirado de cada conjunto de duas peneiras é conduzido a um sistema de prensagem reduzindo-se a umidade para 75%. do material a transportar, para disposição final em aterro sanitário. O resíduo líquido retorna ao início do sistema.

- d) Caixas de areia: o sistema de desarenagem é composto por caixas de areia aeradas para remover material inorgânico, a remoção mecânica da areia é feita por meio de um conjunto de monovia/"*trolley*"/"*clam-shell*". Os desarenadores removerão a areia contida nos esgotos, evitando a abrasão dos equipamentos situados a jusante. As duas caixas de areia apresentam as seguintes características: tempo de detenção de 4 min. (para vazão máxima), e de 7 min. (para vazão média), comprimento de 21,0 m, largura 7 m, altura média de água 3,5 m, profundidade total (incluindo o poço de areia) 7,0 m, volume da canaleta de areia 51 m³, volume do tanque com canaleta de areia 565,5 m³ e uma quantidade de ar de 0,15 a 0,45 m³/min.m, o ar é distribuído por difusores de bolhas grossas.

- e) Tanques de aerção: os tanques de aerção são do modelo "ASMDEL – *Activated Sludge Model*" da WCR – Water Reserch Centre, do tipo fluxo pistão (*plug-flow*). O processo de tratamento é do tipo lodos ativado com alimentação escalonada ("*step-feed*"). Este processo é precedido por um seletor biológico (câmara anóxica, que neste momento não está funcionando) e do que poderá operar na forma anóxica ou aerada. A adoção do "seletor" e do tanque de fluxo pistão têm o objetivo de melhorar a sedimentabilidade do lodo, por meio da minimização do crescimento de bactérias filamentosas. Essas bactérias são usualmente responsáveis pelo problema operacional denominado "*bulking*" do lodo. Quando esse problema ocorre, parte dos lodos dos decantadores secundários, em vez de decantarem no fundo dos tanques, sobem para a superfície prejudicando a qualidade do efluente tratado. Nas câmaras anóxicas estão instalados dois misturadores com motor

submerso. A aeração é efetuada com difusores de bolha fina. As características dos três tanques de aeração são:

- Relação $F/M = 0,30 \text{ KgDBO/KgSSTA.dia}$ (alimento/microorganismos)
- Idade do lodo (MCRT) = 5 dias
- Tempo de detenção = 4 a 6 h
- Relação $SV/ST = 0,75$

- Profundidade útil do tanque = 6,0 m
- Altura total do tanque = 7,4 m
- Comprimento total = 120,0 m
- Comprimento da câmara anóxica = 7,5 m
- Comprimento da zona aerada = 112,5 m
- Tempo de detenção na câmara anóxica = 22 min.
- Largura do tanque = 25 m
- Volume de cada tanque = 18000 m³
- Número de difusores = 6256

O efluente dos tanques de aeração é conduzido a uma caixa de distribuição, e daí para os decantadores secundários.

f) Decantadores secundários: são seis decantadores secundários circulares, cada qual com 46,0 m de diâmetro e 4,0 m de profundidade útil, agrupados em dois conjuntos de três unidades. A cada conjunto estão associadas uma elevatória de recirculação de lodo e uma elevatória de excesso de lodo e escuma. A alimentação dos decantadores é feita por meio de uma caixa distribuidora com vertedores reguláveis. O efluente decantado é coletado em um canal de concreto, de onde é conduzido ao rio Tietê. O lodo sedimentado seguirá por meio de uma tubulação para as elevatórias de recirculação. A escuma retirada da superfície será coletada por um raspador que a manda até

um coletor, daí segue por gravidade até o poço de excesso de espuma. As características dos decantadores secundários são:

- Taxa de aplicação superficial = $33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$
- Taxa de aplicação de sólidos = $9,1 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- Velocidade do raspador = $3,0 \text{ m}/\text{min}$
- Taxa do vertedor = $350 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{dia}$
- Teor de sólidos totais do lodo decantado = $0,75\%$
- Volume do decantador = 6650 m^3
- Área de decantador = 1662 m^2

g) Elevatória de recirculação do lodo ativado: a capacidade de recirculação de lodo é no máximo 130% da vazão do esgoto bruto. As principais características das elevatórias de recirculação de lodo ativado são:

- Bombas tipo centrífugas de velocidade variável.
- Bombas de recirculação = 3 em cada elevatória.
- Vazão mínima = 156 l/s .
- Vazão máxima = 828 l/s .
- Bombas de excesso de espuma = 2 em cada elevatória
- Vazão = $82,5 \text{ l/s}$ ($297 \text{ m}^3/\text{h}$) cada.

Fase sólida

Composta das seguintes partes:

a) Adensadores por flotação a ar dissolvido ou Flotadores: o excesso de lodo e a espuma, provenientes dos decantadores secundários são encaminhados ao poço da elevatória de excesso de lodo e espuma, que os bombeia para a unidade de espessamento de lodo por flotação. São dois flotadores por ar dissolvido, que foram dimensionados prevendo a sua operação normal sem a

utilização de polímeros. Entretanto, para atender condições excepcionais de operação, existe a possibilidade de entrada em operação de um sistema de dosagem de polímeros, visando aumentar a eficiência do sistema. As características destes flotoadores são: diâmetro 28 m, lamina líquida 4,0 m, volume 2450 m³, teor de sólidos do lodo em excesso de 0,75%, taxa de aplicação de sólidos com polímero de 230 kg/m².d; sem polímero de 115 Kg/m².d, taxa de aplicação hidráulica de 3,7 a 6,1 m³/m².h, taxa de dosagem de polímero de 0 a 6 kg/ST, captura de sólidos de 85 a 90%, teor de sólidos 4%, funcionamento 24h/dia, vazão das bombas de lodo flotado, 2 bombas centrais de 31 a 40 m³/s, 4 bombas laterais de 15,5 a 20 m³/s.

b) Estabilização química: o lodo flotado é bombeado aos tanques de armazenamento de lodo, onde é estabilizado quimicamente e condicionado com cal e cloreto férrico. A estabilização química do lodo, por meio da cal, tem o duplo objetivo de eliminar microorganismos patogênicos e prevenir odores. As características das duas unidades são: cal virgem micropulverizada, com uma pureza (% CaO) de 90%, a dosagem é gravimétrica, a taxa de dosagem da cal é 0,25 kg CaO/KgST, o pH do lodo após adição de cal é 12, o aumento de sólidos pela adição de cal é 100% da cal adicionada, o tempo de armazenamento do lodo estabilizado é de 8 h, o diâmetro de cada unidade é 12 m, a lamina d'água na lateral é 4,5 m e o volume de cada unidade é 508 m³.

c) Desidratação mecânica do lodo: a unidade de desidratação mecânica do lodo flotado tem a finalidade de elevar a concentração de sólidos no lodo até cerca de 30%. O processo de desidratação emprega equipamentos do tipo filtros prensas com diafragma. São quatro filtros, sendo um de reserva. As características desta unidade são: o teor de sólidos do lodo na entrada do equipamento é 4,5%, o teor de sólidos desidratado é 18%, a captura de sólidos prevista é 90%, tem duas bombas de lodo estabilizado, estas são de deslocamento positivo de 300 RPM, com vazão de 130 m³/h, a largura da esteira dos filtros prensa é de 2,0 m e a capacidade unitária dos filtros é 45 kgST/h. Após a desidratação mecânica o lodo é transportado por caminhões

até a central de secagem térmica da ETE São Miguel, onde é transformado em pellets com teor de sólidos de 90% e granulometria de 3 a 4 mm.

Além das fases líquida e sólida, a ETE do Parque Novo Mundo tem outras componentes e sistemas que serão apresentadas a seguir:

Compressores de ar: o ar comprimido fornecido aos tanques de aeração e aos canais e caixas de areia é gerado por compressores centrífugos, com palhetas controladoras de vazão. O ar é encaminhado aos tanques por meio de uma tubulação de aço inoxidável. São quatro compressores, e é prevista a instalação de outros seis. As características dos compressores são: uma vazão de ar de 40340 m³/h; pressão de descarga 1,79 bar; potência do motor 1300 kW.

Sistema de supervisão e controle (SSC): a ETE PNM possui um SSC que é responsável pelo monitoramento e controle do processo de tratamento de esgoto, além de prover as informações consolidadas necessárias para as atividades de manutenção, planejamento gerencial e controle das operações efetuadas na planta. Esse sistema permite a simplificação e otimização das atividades de operação e manutenção da estação, aumentando a eficiência e reduzindo os custos de pessoal, energia elétrica e produtos químicos. O SSC é composto por microcomputadores que servem para mostrar aos operadores as várias unidades do processo, podendo o operador intervir no funcionamento dos vários equipamentos, ligando-os e desligando-os, bem como alterando os "set-points" de controle. A partir da tela principal de operação, o operador pode "navegar" para as várias telas do processo de tratamento, apenas clicando sobre a unidade desejada.

Sistema elétrico: o fornecimento de energia para a ETE é realizado por meio de dois circuitos de 88 kV, trifásico, 60 Hz, estando adequado para futuro fornecimento em 138 kV. A tensão de 88/138 kV é rebaixada para 13,8 kV na Subestação Elétrica Principal (SEP) e distribuída para quatro subestações unitárias, que alimentam as unidades de processo.

Sistema de controle de odores (não está operando ainda): os gases que emanam do processo de tratamento de esgoto da estação possuem como principal componente o H_2S (gás sulfídrico). Esses gases serão encaminhados até lavadores onde são oxidados e neutralizados utilizando uma solução de $NaOCl$ (hipoclorito de sódio) e $NaOH$ (soda cáustica). Haverá detectores de H_2S na saída de gases dos lavadores, permitindo assim o controle dos odores. A fim de evitar problemas de odor, as seguintes unidades deverão ter o ar em contato com a superfície do líquido continuamente coletado e tratado, antes de ser liberado para a atmosfera: grades grosseiras, elevatória final, grades médias, peneiras rotativas, caixas de areia, flotadores e prédio dos filtros prensa.

Estação de tratamento de água de serviço: uma parcela do efluente final da ETE é desviada do seu caminho para o rio Tietê e é tratada com a finalidade de diversos usos dentro da estação, tais como selagem, resfriamento, irrigação de jardins, lavagem de pisos, etc. O sistema de tratamento do efluente final é composto por: um sistema de filtragem (filtragem grosseira para todo o efluente final a ser reusado e filtragem fina para a parcela de efluente final destinada a produzir água de selagem ou resfriamento de equipamentos); sistema de cloração (aplicação em toda a água que sai da filtração grosseira); e sistema hidropneumático (destinado a elevar a pressão da água a ser utilizada em serviços de lavagem e desobstrução).

Reservatório de água potável/incêndio: a água potável é proveniente da SABESP e é acumulada em um reservatório elevado para a distribuição nas diversas unidades. Para o sistema de incêndio há uma bomba com motor elétrico, e uma com acionamento com motor diesel.

ANEXO D - PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS⁴

De forma genérica, a poluição das águas decorre da adição de substâncias ou de formas de energia que, direta ou indiretamente, alterem as características físicas e químicas do corpo d'água de uma maneira tal que prejudique a sua utilização para usos benéficos.

É importante ressaltar que as águas poluídas atingem um determinado corpo receptor (rio, baía, lago, laguna, reservatório aquífero subterrâneo e o mar) de duas formas distintas. A primeira, denominada **fonte ou poluição pontual**, refere-se, como o próprio nome esclarece, à poluição decorrente de ações modificadoras localizadas. Como exemplos podem-se mencionar o afluente a um rio de um tronco coletor de esgotos domésticos sem tratamento, ou ainda a saída ao mar de um emissário submarino.

A segunda, **poluição difusa**, se dá pela ação das águas da chuva ao lavarem e transportarem a poluição nas suas diversas formas espalhadas sobre a superfície do terreno (urbano ou não) para os corpos receptores. A poluição difusa alcança os rios, lagoas, baías, etc., distribuída ao longo das margens, não se concentrando em um único local como é o caso da poluição pontual.

O grau de poluição das águas é medido por meio de características físicas, químicas e biológicas das impurezas existentes que, por sua vez, são identificadas por parâmetros de qualidade das águas (físicos, químicos e biológicos). De uma maneira geral, as características físicas são analisadas sob o ponto de vista de sólidos (suspensos, coloidais e dissolvidos na água) e gases. As características químicas, sob parâmetros para substâncias orgânicas e inorgânicas e as biológicas sob o ponto de vista da vida animal, vegetal e organismos unicelulares (algas).

⁴ <http://www.geocities.com/wwwweibull/Param.htm>; Carmouze, 1994.

Principais parâmetros de qualidade das águas

Os principais parâmetros físicos de qualidade das águas são: cor, turbidez, sabor, odor e temperatura. Os químicos, pH (acidez e alcalinidade), dureza, metais (ferro e manganês), cloro, nitrogênio (nutriente), fósforo (nutriente), oxigênio dissolvido, matéria orgânica, micropoluentes orgânicos e micropoluentes inorgânicos como os metais pesados (zinco, cromo, cádmio, etc.). Já os parâmetros biológicos são analisados sob o ponto de vista de organismos indicadores, algas e bactérias. A seguir são apresentados os principais parâmetros.

a) Oxigênio Dissolvido (OD): é geralmente medido em mg/l de água analisada. Provém, em geral, da dissolução do oxigênio atmosférico, naturalmente ou artificialmente, e também, da produção liberada por alguns microrganismos vivos na água (algas e bactérias).

O oxigênio dissolvido é vital para os seres aquáticos aeróbicos (dependentes de oxigênio). O nível de disponibilidade de OD na água vai depender do balanço entre a quantidade consumida por bactérias para oxidar a matéria orgânica (fontes pontuais e difusas) e a quantidade produzida no próprio corpo d'água por meio de organismos fotossintéticos, processos de aeração natural e/ou artificial. Se o balanço do nível de OD permanece negativo por tempo prolongado, o corpo d'água pode tornar-se anaeróbico (ausência de oxigênio), causando a geração de maus odores, o crescimento de outros tipos de bactérias e a morte de diversos seres aquáticos aeróbicos, inclusive peixes.

Portanto, o OD é um dos principais parâmetros de caracterização dos efeitos da poluição das águas decorrentes de despejos orgânicos. A solubilidade do OD é função da altitude e da temperatura do corpo de água. Em geral, ao nível do mar e uma temperatura de 20°C, a concentração de saturação é de 9,2 mg/l.

Vale informar que valores de OD inferiores ao valor de saturação podem indicar a presença de matéria orgânica e, valores superiores, a existência de crescimento anormal de algas, uma vez que, como já foi citado, elas liberam oxigênio durante o processo de fotossíntese.

Em resumo, o OD será consumido por bactérias durante o processo metabólico de conversão da matéria orgânica em compostos simples e inertes, como água e gás carbônico (CO_2). Com isso, crescem e se multiplicam e mais oxigênio dissolvido será consumido enquanto houver matéria orgânica proveniente das fontes de poluição.

b) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): é medida, em geral, em mg/l e traduz indiretamente a quantidade de matéria orgânica presente no corpo de água. A matéria orgânica é formada por inúmeros componentes, como compostos de proteína, carboidratos, uréia, surfactantes (detergentes), gordura, óleos, fenóis, pesticidas, etc.

Esta matéria, carbonácea, apresenta-se em suspensão ou dissolvida, podendo ser biodegradável ou não. Dada a diversidade de compostos e formas como se apresenta no corpo d'água, procura-se quantificá-la, indiretamente, medindo-se sua capacidade de consumo de oxigênio dissolvido na água, que se dá por meio das bactérias oxidantes.

A *DBO* nada mais é que a utilização por certos organismos, do oxigênio (oxidação), do carbono (demanda carbonácea) seguida da utilização de nitrogênio (demanda nitrogenada). Inicialmente eles utilizam o oxigênio dissolvido para transformar o carbono em CO_2 (oxidação da matéria carbonácea) e posteriormente transformam os compostos nitrogenados em nitratos- NO_2 e em nitratos- NO_3 , (nitrificação).

A *DBO* padrão é aquela que representa o consumo de oxigênio no processo de oxidação da matéria orgânica presente em uma amostra de água durante o período de 5 dias e incubada a 20°C.

A *DBO* padrão está associada à porção biodegradável da matéria orgânica de origem vegetal e animal e também àquela presente nos despejos domésticos industriais.

Vale informar que os esgotos domésticos possuem uma *DBO* em torno de 300mg/l, que representa o consumo de 300 mg de oxigênio em 5 dias, a 20°C, no processo de estabilização da matéria orgânica carbonácea biodegradável presente em 1 litro de esgoto.

Resumindo, *DBO* alta significa presença de poluição por causa da matéria orgânica proveniente de fontes pontuais e/ou difusas de origem doméstica ou industrial.

c) Demanda Química de Oxigênio (DQO): caracteriza de modo indireto a quantidade de oxigênio consumido num processo de degradação química da matéria biodegradável, ou não. Portanto, é o oxigênio requerido para estabilização da matéria orgânica por meio da ação química (oxidação) para um determinado tempo e temperatura, não sendo o correspondente da *DBO*, pois nem todas as substâncias químicas podem ser biodegradadas. Portanto, para cada ação de *DBO* ocorreu anteriormente certa ação de *DQO*, quando da presença de matéria orgânica.

O teste da *DQO* consiste em se oxidar toda a amostra por meio de um reagente, (dicromato de potássio), em meio ácido, medindo-se o seu consumo. Uma das limitações entretanto é o fato de que o teste não diferencia matéria orgânica biodegradável e matéria orgânica não biodegradável, a primeira determinada pelo teste de *DBO*. A vantagem é o tempo de teste relativamente rápido de 2 a 3 horas, enquanto o teste de *DBO* requer no mínimo 5 dias (período de incubação).

Podem-se efetuar comparações entre os valores de *DQO/DBO*, mantendo-se sempre relações inversas. Quando da presença inicial da matéria orgânica, a relação *DQO/DBO* deverá apresentar-se sempre menor, na relação em cerca de 1 parte de *DQO* para 1/2 ou 1/3 partes de *DBO*, com tendência a diminuir no decorrer do processo de degradação. Na prática, o *DQO* deveria sempre estar 2 ou 3 vezes maior que o *DBO*.

d) pH e alcalinidade: o termo pH (potencial hidrogeniônico) é usado universalmente para expressar o grau de acidez ou basicidade de uma solução, ou seja, é o modo de expressar a concentração de ions de hidrogênio nessa solução. A escala de pH é constituída de uma série de números variando de 0 a 14, os quais denotam vários graus de acidez ou alcalinidade. Valores abaixo de 7 e próximos de zero indicam aumento de acidez, enquanto valores de 7 a 14 indicam aumento da basicidade.

As medidas de pH são de extrema utilidade, pois fornecem inúmeras informações a respeito da qualidade da água. As águas superficiais possuem um pH entre 4 e 9, as vezes são ligeiramente alcalinas devido à presença de carbonatos e bicarbonatos. Naturalmente, nesses casos, o pH reflete o tipo de solo por onde a água percorre. Em lagoas com grande população de algas, nos dias ensolarados, o pH pode subir muito, chegando a 9 ou até mais. Isso porque as algas, ao realizarem a fotossíntese retiram muito gás carbônico, que é a principal fonte de acidez da água. Geralmente um pH muito ácido ou muito alcalino está associado à presença de despejos industriais. A determinação do pH é feita por meio do método eletrométrico, utilizando-se para isso um pHmetro digital.

A alcalinidade representa a capacidade que um sistema aquoso tem de neutralizar (tamponar) ácidos a ele adicionados. Esta capacidade depende de alguns compostos, principalmente bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. A alcalinidade é determinada por meio da titulação.

e) Nitrogênio Amoniacal (NH_3): antes de melhor caracterizar o parâmetro em questão, convém explicar resumidamente o ciclo do nitrogênio na biosfera. O nitrogênio manifesta-se no ambiente de diversas formas, quais sejam: Nitrogênio molecular (N_2), livre na atmosfera; Nitrogênio orgânico (dissolvido e em suspensão no corpo d'água); Amônia (livre – NH_3 e ionizada – NH_4); Nitrito (NO_2) e Nitrato (NO_3).

No meio aquático, as diversas formas de nitrogênio podem ser de origem natural (proteínas, clorofila e outros compostos biológicos) e/ou de origem das atividades humanas e animais (despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e fertilizantes). Nos esgotos domésticos frescos, predominam o nitrogênio em forma de amônia e o orgânica.

A importância do conhecimento da presença e quantificação do nitrogênio nas suas diversas formas na água refere-se ao consumo de OD necessário durante o processo de nitrificação, isto é, a conversão de nitrogênio amoniacal a nitrato e este a nitrato e principalmente, a proliferação de algas que tem no nitrogênio um elemento vital para seu crescimento.

Cabe salientar que o crescimento descontrolado das algas (floração das algas), em determinadas condições do corpo d'água pode acarretar processos de eutrofização.

A eutrofização é um fenômeno indesejável, pois modifica substancialmente as características físicas, químicas e biológicas do corpo d'água. O crescimento excessivo de vegetação aquática, eventuais maus odores, mortandade de peixe, mudança radical de cor, diminuição excessiva de OD, secreções tóxicas de certas algas, etc., são algumas das consequências do fenômeno.

Os processos de eutrofização somados ao de assoreamento (diminuição gradativa do leito de um corpo de água pela deposição de material sólido carregado pela água), aumentam gradativamente, o material sedimentado no fundo (matéria orgânica em suspensão, vegetação aquática morta e sólidos carregados por processos erosivos), provocando, lentamente, a morte e o desaparecimento do corpo d'água.

Torna-se importante registrar mais uma vez, que a amônia pode ocorrer na forma livre, que é o nitrogênio amoniacal NH_3 , tóxica aos peixes e na forma ionizada (NH_4), não tóxica.

Portanto, a medição do nitrogênio amoniacal, geralmente avaliado em mg/l é importante não só para se constatar a presença de esgotos domésticos lançados recentemente no corpo d'água, mas também como um indicador de futuro consumo de oxigênio no processo de nitrificação anteriormente citado e possível crescimento de algas.

f) Nitrogênio Kjeldahl (NTK): é medido em mg/l, e é igual à soma do nitrogênio orgânico com o nitrogênio em forma de amônia.

O NTK é a forma predominante do nitrogênio nos esgotos domésticos brutos, daí sua importância como parâmetro químico de qualidade das águas.

Dependendo do valor do pH dos esgotos, a amônia, parte integrante do NTK, pode se apresentar na forma livre NH_3 ou na forma ionizada NH_4 . Para valores de pH menores que 8, a amônia se apresenta na forma ionizada.

g) Nitrato (NO₃): como citado anteriormente, o nitrogênio sob forma de amônia, se transforma com o tempo, dependendo das condições físicas e química do meio aquático, em nitrato e posteriormente, em nitrato (nitrificação).

A presença de nitrogênio na forma de nitrato no corpo d'água é um indicador de poluição antiga relacionada ao final do período do processo de nitrificação ou pode caracterizar o efluente de uma estação de tratamento de esgotos sanitários a nível terciário, onde o processo de nitrificação é induzido e controlado com o objetivo de redução de nutrientes.

O nitrato, medido em mg/l de amostra d'água, pode sofrer também um processo de desnitrificação onde é reduzido a nitrogênio gasoso. Já foi comprovada a relação entre a concentração de nitrato e a ocorrência de cianose em crianças. A cianose provoca alterações na composição sanguínea, levando a pele a uma coloração azulada.

O nitrato em altas concentrações nas fontes domésticas de água (poços) pode trazer graves problemas de intoxicação tanto no ser humano como nos animais.

h) Fósforo Total (PT): é medido geralmente em mg/l. A presença do fósforo na água pode se dar de diversas formas. A mais importante delas para o metabolismo biológico é o ortofosfato. O fósforo é um nutriente e não traz problemas de ordem sanitária para a água.

A presença de fósforo nas águas pode ter origem na dissolução de compostos do solo (escala muito pequena), despejos domésticos e industriais, detergentes, excrementos de animais e fertilizantes.

A utilização crescente de detergentes de uso doméstico e industrial favorece muito o aumento das concentrações de fósforo nas águas.

Concentrações elevadas de fósforo pode contribuir, da mesma forma que o nitrogênio, para a proliferação de algas e acelerar, indesejavelmente, em determinadas condições, o processo de eutrofização.

Por outro lado, o fósforo é um nutriente fundamental para o crescimento e multiplicação das bactérias responsáveis pelos mecanismos bioquímicos de estabilização da matéria orgânica.

!) Coliformes Fecais (COLIF): as bactérias do grupo coliforme são utilizadas como indicador biológico da qualidade das águas. A contaminação das águas por fezes humana ou animal pode ser detectada pela presença de bactérias do grupo coliforme. O grupo coliforme de bactérias se divide como indicador de contaminação fecal, da seguinte forma: coliformes totais (fecal, não fecal); coliformes fecais (fecal); estreptococos fecais (fecal).

No intestino dos seres humanos e animais predomina em grande número os coliformes fecais. Para se ter uma ideia, um indivíduo elimina, em média, 10 bilhões de coliformes fecais por dia. Além dos coliformes, existem, no meio intestinal, outras bactérias, vírus, protozoários e vermes, em números significativamente menores. Nesse meio intestinal, podem conviver agentes patogênicos, isto é, nocivos ao homem, como alguns tipos de bactérias que podem provocar diarreias fortes, febre, náusea e o cólera, alguns tipos de protozoários, responsáveis, inclusive, pela malária e vírus perigosos como aqueles que podem levar a hepatite infecciosa, gastroenterite, febre amarela, dengue e paralisia infantil.

Assim sendo, na prática, a medição do número de coliformes fecais em um corpo d'água é um indicador não só da contaminação por fezes de origem humana e animal, como também da possibilidade de coexistência de organismos patogênicos.

A contaminação fecal é geralmente medida em número mais provável de coliformes por cem mililitros de água amostrada (NMP/100ml).

Os órgãos ambientais utilizam-se deste indicador para diagnosticar também as condições para o banho de mar. Esse serviço informa à população a adequabilidade ou não de banho junto às águas litorâneas (excelente, muito boa, satisfatória e imprópria) e é denominado de condições de balneabilidade.

j) Clorofila: a clorofila é um tipo de pigmento que existe nos vegetais em geral, incluindo os diversos géneros de algas.

O papel da clorofila é fundamental na fotossíntese, isto é, no mecanismo de nutrição dos vegetais. A clorofila faz o papel principal no processo, ao absorver a luz que, em seguida será aproveitada e transformada em outra forma de energia durante a síntese (transformação de estruturas simples em compostos orgânicos).

A reação de síntese que se passa nas células vegetais possuidoras de clorofila é fotoquímica, na qual o gás carbónico retirado do ar é combinado à água, consumindo energia armazenada pela clorofila, por meio da luz, para formar compostos orgânicos e como subproduto, o oxigênio. Portanto, o conhecimento quantitativo da clorofila permite estimar a capacidade de reoxigenação das águas no seu próprio meio, inferir sobre a densidade da população de algas e avaliar o aporte da quantidade de nutrientes.

As algas são, em geral, plantas microscópicas que podem ser movimentadas pelas correntes, por exemplo o fitoplâncton, ou se aderirem nas superfícies, como as algas benthicas.

Como citado anteriormente, a floração das águas, determina o crescimento anormal de algas no meio aquático pelo excesso de nutrientes (nitrogênio e fósforo).

A clorofila é medida, em geral, em microgramas por litro da amostra d'água.

k) Metais pesados: são micropoluentes inorgânicos provenientes, na sua maioria, de efluentes industriais e altamente tóxicos para a vida aquática.

Os principais metais pesados presentes nas águas em forma dissolvida são cádmio, cromo, chumbo, mercúrio, níquel e zinco.

Em geral, as concentrações de metais pesados na água estão muito aquém dos padrões de qualidade estabelecidos. Por outro lado, a tendência dos metais pesados é de se aderirem aos sólidos em suspensão que por sua vez, sedimentam-se no fundo do corpo d'água.

Procura-se analisar as concentrações de metais pesados nos sedimentos, cujos valores podem ser significativos e representam uma ameaça para a biota e, conseqüentemente, ao ser humano que está no topo da cadeia alimentar.

Os metais pesados, além de serem tóxicos são cumulativos no organismo e podem provocar diversos tipos de doenças no ser humano com a ingestão de pequenas doses, por períodos consideráveis. Os metais são medidos, geralmente, em mg/g, expressos em peso seco.

ANEXO E - PADRÕES DE EMISSÃO DE EFLUENTES⁵

Destinação de uso do corpo d'água

Os corpos d'água receptores de efluentes podem ser destinados a diferentes usos. A legislação federal brasileira, por meio da RESOLUÇÃO CONAMA 20 de 18 de junho de 1986 prevê cinco classes de utilização, baseadas na destinação de uso. Esta destinação de uso é estabelecida por meio da legislação específica, que indica o uso de cada corpo d'água. A legislação do Estado de São Paulo, por meio do Decreto Estadual 8468 de 8 de setembro de 1976, prevê apenas quatro classes de uso. A Tabela E-1 mostra as destinações de uso de cada uma delas.

Tabela E-1 Classes de uso de corpos d'água

Decreto 8468/76	CONAMA 20	Destinação de uso
Classe 1	Especial	Abastecimento doméstico sem prévio tratamento ou com simples desinfecção
		Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas
Classe 2	Classe 1	Abastecimento doméstico com tratamento simplificado
		Proteção de comunidades aquáticas
		Aqüicultura
		Recreação de contato primário
		Irrigação de hortaliças e frutas consumidas cruas
	Classe 2	Abastecimento doméstico após tratamento convencional
		Recreação de contato primário
		Irrigação de hortaliças e frutas
		Proteção de comunidades aquáticas
		Aqüicultura
Classe 3	Classe 3	Abastecimento doméstico após tratamento convencional
		Dessedentação de animais
		Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras
		Navegação
Classe 4	Classe 4	Harmonia paisagística
		Usos menos exigentes
		Abastecimento público após tratamento avançado
		Abastecimento industrial

⁵ Helou, 2000.

Cada uma destas normas legais impõe para cada classe de uso uma qualidade a ser atingida, de forma a atender os usos aos quais se destinam esses corpos d'água. As Tabelas seguintes indicam as classes e os limites dos parâmetros exigidos para cada classe.

Tabela E-2 Limites dos parâmetros de qualidade de acordo com a Resolução

CONAMA 20/86

Parâmetro	Unidad	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Materiais flutuantes	----	Ausentes	Ausente	Ausentes	Ausentes
Oleos e graxas		Ausentes	Ausente	Ausentes	Iridiscência
Odor e gosto		Ausentes	Ausente	Ausentes	NE
Corantes		Ausentes	Removi	Removiv	NE
Depósitos objetáveis		Ausentes	Ausente	Ausentes	NE
$DBO_{5,20}$	mg/L	< 3	< 5	< 10	NE
OD	mg/L	< 6	< 5	> 4	> 2
Turbidez		< 40	< 100	< 100	NE
Cor	mg Pt/L	(1)	< 75	< 75	NE
pH		6 a 9	6 a 9	6 a 9	NE
Al	mg/L	0,1	0,1	0,1	NE
NH_3	mg/L	0,02	0,02	1	NE
As	mg/L	0,05	0,05	0,05	NE
Ba	mg/L	1,0	1,0	1,0	NE
Be	mg/L	0,1	0,1	0,1	NE
B	mg/L	0,75	0,75	0,75	NE
Benzeno	mg/L	0,01	0,01	0,01	NE
Benzo-a-pireno	mg/L	0,0001	0,0001	0,0001	NE
Cd	mg/L	0,001	0,001	0,001	NE
CN	mg/L	0,01	0,01	0,2	NE
Pb	mg/L	0,03	0,03	0,05	NE
Cloretos	mg/L	250	250	250	NE
Cloro Residual	mg/L	0,01	0,01	NE	NE
Co	mg/L	0,2	0,2	0,2	NE
Cu	mg/L	0,02	0,02	0,5	NE
Cr^{+3}	mg/L	0,5	0,5	0,5	NE
Cr^{+6}	mg/L	0,05	0,05	0,05	NE
1,1 dicloroetano	mg/L	0,0003	0,0003	0,0003	NE
1,2 dicloroetano	mg/L	0,01	0,01	0,01	NE
Sn	mg/L	2,0	2,0	2,0	NE
Fenóis	mg/L	0,001	0,001	0,3	1
Fe soluble	mg/L	0,3	0,3	5	NE
Fluoreto	mg/L	1,4	1,4	1,4	NE
P total	mg/L	0,025	0,025	0,025	NE
Li	mg/L	2,5	2,5	2,5	NE

Mn	mg/L	0,1	0,0002	0,0002	0,002	NE
Hg	mg/L	0,025	0,025	0,025	0,025	NE
NO ₃	mg/L	10	10	10	10	NE
NO ₂	mg/L	1	1	1	1	NE
Ag	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,05	NE
Pentaclorofenol	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	NE
Se	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	NE
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	500	500	500	500	NE
Substâncias tensoativas	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,5	NE
SO ₄	mg/L	250	250	250	250	NE
S ₂	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,3	NE
Tetracloreteno	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	NE
Tricloreteno	mg/L	0,03	0,03	0,03	0,03	NE
Tetracloreto de carbono	mg/L	0,003	0,003	0,003	0,003	NE
2,4,6 triclorofenol	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	NE
U	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,02	NE
V	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,1	NE
Zn	mg/L	0,18	0,18	0,18	5	NE
Aldrin	µg/L	0,01	0,01	0,01	0,03	NE
Clordano	µg/L	0,04	0,04	0,04	0,3	NE
DDT	µg/L	0,002	0,002	0,002	1	NE
Dieldrin	µg/L	0,005	0,005	0,005	0,03	NE
Endrin	µg/L	0,004	0,004	0,004	0,2	NE
Endossulfan	µg/L	0,056	0,056	0,056	150	NE
Epóxido de heptaclore	µg/L	0,01	0,01	0,01	0,1	NE
Heptaclore	µg/L	0,01	0,01	0,01	0,1	NE
Lindano (gama-BHC)	µg/L	0,02	0,02	0,02	3	NE
Metoxicloro	µg/L	0,03	0,03	0,03	30	NE
Dodecaclore + nonaclore	µg/L	0,001	0,001	0,001	0,01	NE
PCB	µg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	NE
Toxafeno	µg/L	0,01	0,01	0,01	5	NE
Demeton	µg/L	0,1	0,1	0,1	14	NE
Gution	µg/L	0,005	0,005	0,005	0,005	NE
Malation	µg/L	0,1	0,1	0,1	100	NE
Paration	µg/L	0,04	0,04	0,04	35	NE
Carbaryl	µg/L	0,02	0,02	0,02	70	NE
Organofosforados e carbamatos	µg/L	10	10	10	100	NE
2,4 D	µg/L	4	4	4	20	NE
2,4,5 TP	µg/L	10	10	10	10	NE
2,4,5 T	µg/L	2	2	2	2	NE
Coliformes Totais	NMP/10	1.000	5.000	20.000	NE	
Coliformes Fecais	NMP/10	200	1.000	4.000	NE	

(1) Igual à do corpo receptor.

Para a classe especial valem os limites de potabilidade, pois não há tratamento.

Tabela E-3 Limites dos parâmetros de qualidade de acordo com o Decreto Estadual 8468/76

Parâmetro	Unidade	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Materiais flutuantes	----	Ausentes	Ausentes	Ausentes
Oleos e graxas		Ausentes	Ausentes	Irdiscência
Odor e gosto		Ausentes	Ausentes	NO
Corantes		Removíveis	Removíveis	NE
DBO _{5,20}	Mg/L	<5	<10	NE
OD	Mg/L	>5	>4	>0,5
NH ₃	Mg/L	0,5	0,5	NE
As	Mg/L	0,1	0,1	NE
Ba	Mg/L	1,0	1,0	NE
Cd	Mg/L	0,01	0,01	NE
CN	Mg/L	0,2	0,2	NE
Pb	Mg/L	0,1	0,1	NE
Cu	Mg/L	1,0	1,0	NE
Cr Total	Mg/L	0,05	0,05	NE
Sn	Mg/L	2,0	2,0	NE
Fenóis	Mg/L	0,001	0,001	1
F	Mg/L	1,4	1,4	NE
Hg	Mg/L	0,002	0,002	NE
NO ₃	Mg/L	10	10	NE
NO ₂	Mg/L	1	1	NE
Se	Mg/L	0,01	0,01	NE
Zn	Mg/L	5	5	NE
Coliformes Totais	NMP/100	5.000	20.000	NE
Coliformes Fecais	NMP/100	1.000	4.000	NE

Para a classe 1 só são tolerados despejos de efluentes se o corpo d'água já tiver lançamento, e nos limites da classe 2; se não for possível infiltração ou reversão para outras bacias.

Outro conceito importante é o de emissão. Entende-se por padrão de emissão as características físico-químicas que um efluente deve obedecer para que possa ser liberado para os corpos d'água ou para os sistemas públicos de tratamento.

A legislação Federal brasileira estabelece os padrões de emissão de efluentes em corpos receptores por meio da Resolução CONAMA 20/86. A Legislação Estadual estabelece estes padrões tanto para emissão em corpos d'água quanto nos sistemas de coleta públicos.

A Tabela E-4 mostra os limites a que estão submetidos os efluentes a serem lançados nos corpos d'água.

Tabela E-4 Limites de emissão conforme a Resolução CONAMA 20/86 e Decreto Estadual 8468/76

Parâmetro	Unidade	Resolução CONAMA 20	Decreto Estadual 8468
Vazão	-----	< 1,5* Q _{média}	< 1,5* Q _{média}
Temperatura	°C	40	40
PH		5 a 9	5 a 9
Materiais flutuantes	-----	Ausentes	Ausentes
Oleos vegetais e gorduras animais	mg/L	50	-----
Oleos minerais	mg/L	20	-----
OG	mg/L	-----	100
Sólidos sedimentáveis	ml/L	1	1
DBO _{5,20}	mg/L	-----	60 mg/L ou 80% de
NH ₃	mg/L	5	---
As	mg/L	0,5	0,2
Ba	mg/L	5,0	5,0
B	mg/L	5,0	5,0
Cd	mg/L	0,2	0,2
CN	mg/L	0,2	0,2
Pb	mg/L	0,5	0,5
Cu	mg/L	1,0	1,0
Cr ⁺³	mg/L	2,0	---
Cr ⁺⁶	mg/L	0,5	0,1
Cr Total	mg/L	---	5,0
Sn	mg/L	4	4
Fenóis	mg/L	0,5	0,5
Fe ⁺²	mg/L	15	15
Fluoreto	mg/L	10	10
Mn ⁺²	mg/L	1,0	1,0
Hg	mg/L	0,01	0,01
Ni	mg/L	2,0	2,0
Ag	mg/L	0,1	0,02
Se	mg/L	0,05	0,02
S ₂	mg/L	1	---
SO ₃	mg/L	1	---
Zn	mg/L	5	5
Organofosforados e carbamatos	mg/L	1	---
Sulfeto de carbono	mg/L	1	---
Tricloroetano	mg/L	1	---
Clorofórmio	mg/L	1	---
Dicloroetano	mg/L	1	---
Organoclorados	mg/L	0,05	---

ANEXO F - MEMORIAL DE CÁLCULO - ESTUDO DE CASO DAS ETES

BARUERI E PARQUE NOVO MUNDO

Tabela F-1 Cálculo do fluxo exergético associado à vazão afluente da ETE

Parque Novo Mundo

Espécie química	Afluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$ (kJ/mol)	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/L)
DBO	0,00360	0,252685	4,0	1,00316	-0,86163	0,14153	0,00051
DO	0,00909	0,636853	4,0	2,52831	-0,71231	1,81599	0,01652
NH ₃	0,00077	0,054054	337,9	18,26490	-0,39095	17,8739	0,01380
NO ₃	9,2E-06	0,000642	22,3	0,01433	-0,0117	0,00262	2,4E-08
NO ₂	1,0E-06	0,000073	55,6	0,00406	-0,00172	0,00234	2,4E-09
S ₂	1,7E-05	0,001169	1219,2	1,42544	-0,01957	1,40587	2,3E-05
SO ₄	0,00049	0,034368	184,8	6,35124	-0,28715	6,06409	0,00297
Cádmio	7,1E-08	0,000005	293,5	0,00146	-0,00015	0,00131	9,3E-11
Níquel	2,3E-06	0,000160	232,7	0,03718	-0,00346	0,03372	7,7E-08
Prata	1,7E-07	0,000012	70,2	0,00082	-0,00033	0,00049	8,2E-11
Zinco	3,7E-06	0,000257	339,2	0,08718	-0,00527	0,08191	3,0E-07
Mangane	2,2E-06	0,000158	482,3	0,07621	-0,00343	0,07278	1,6E-07
Selênio	8,5E-09	0,000001	346,5	0,00021	-2,1E-05	0,00018	1,5E-12
Chumbo	3,9E-07	0,000027	232,8	0,00629	-0,0007	0,00559	2,1E-09
Cobre	1,7E-06	0,000121	134,2	0,01626	-0,00271	0,01355	2,3E-08
Cromo T.	1,7E-06	0,000118	544,3	0,06449	-0,00266	0,06183	1,0E-07
Cromo +	1,3E-07	0,000009	544,3	0,00513	-0,00027	0,00486	6,5E-10
Ferro	3,9E-05	0,002762	376,4	1,03943	-0,04033	0,99909	3,9E-05
Fenol	1,8E-06	0,000129	3128,5	0,40305	-0,00286	0,40019	7,4E-07
Fósforo	0,00010	0,007494	869,7	6,51770	-0,09091	6,42679	0,00068
Surfactan	0,00012	0,008620	74,9	0,64565	-0,10158	0,54408	6,7E-05
Estanho	4,0E-06	0,000280	544,9	0,15265	-0,00568	0,14697	5,9E-07
Mercurio	2,7E-08	0,000002	115,9	0,00022	-6,2E-05	0,00016	4,3E-12
Total	0,01428	1,000000		38,645363	-2,54546	36,0999	0,03463

Os cálculos apresentados nas Tabelas F-1 à F-6 foram realizados considerando as hipóteses simplificadoras conforme apresentadas no item 5.7.3

Tabela F-2 Cálculo do fluxo exerético associado à vazão efluente da ETE

Parque Novo Mundo

Espécie química	Efluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum (h_i - h_{i0}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$ (kJ/mol)	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/L)
DBO	0,000734	0,24037	4,0	0,95426	-0,8494	0,1048	7,7E-05
DQO	0,001359	0,44493	4,0	1,76639	-0,89317	0,8732	0,001187
NH ₃	0,000357	0,11704	337,9	39,5475	-0,62238	38,925	0,013919
NO ₃	5,93E-05	0,01941	22,3	0,43295	-0,1897	0,2432	1,44E-05
NO ₂	7,98E-06	0,00261	55,6	0,14517	-0,0385	0,1067	8,51E-07
S ₂	8,73E-06	0,00286	1219,2	3,48463	-0,0415	3,4431	3,01E-05
SO ₄	0,000460	0,15060	184,8	27,8302	-0,70672	27,123	0,01248
Cádmio	7,12E-08	2,3E-05	293,5	0,00684	-0,00062	0,0062	4,43E-10
Níquel	2,54E-06	0,00083	232,7	0,19329	-0,01461	0,1787	4,53E-07
Prata	1,67E-07	5,5E-05	70,2	0,00383	-0,00133	0,0025	4,18E-10
Zinco	1,84E-06	0,00060	339,2	0,20380	-0,01105	0,1927	3,54E-07
Manganes	1,82E-06	0,00060	482,3	0,28733	-0,01097	0,2764	5,03E-07
Selênio	6,33E-09	2,1E-06	346,5	0,00072	-6,7E-05	0,0006	4,12E-12
Chumbo	3,86E-07	0,00013	232,8	0,02942	-0,00281	0,0266	1,03E-08
Cobre	4,72E-07	0,00015	134,2	0,02074	-0,00336	0,0174	8,2E-09
Cromo T.	1,35E-06	0,00044	544,3	0,23983	-0,00844	0,2314	3,12E-07
Cromo + 6	1,15E-07	3,8E-05	544,3	0,02056	-0,00095	0,0196	2,26E-09
Ferro	8,85E-06	0,00289	376,4	1,08973	-0,04194	1,0478	9,27E-06
Fenol	1,29E-06	0,00042	3128,5	1,32408	-0,00815	1,3159	1,7E-06
Fósforo	4,11E-05	0,01346	869,7	11,7053	-0,14373	11,562	0,000475
Surfactante	3,73E-06	0,00122	74,9	0,09138	-0,02029	0,0711	2,65E-07
Estanho	4,00E-06	0,00131	544,9	0,71367	-0,02155	0,6921	2,77E-06
Mercurio	1,36E-08	4,4E-06	115,9	0,00052	-0,00014	0,0004	5,17E-12
TOTAL	0,0030553	1		90,0922	-3,63136	86,461	0,0282

Tabela F-3 Cálculo do fluxo exerético associado à vazão afluente da ETE

Barueri

Especie química	Afluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum (\mu_i - \mu_{oi}) n_i$	$RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$ (kJ/mol)	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/L)
DBO	0,00756	0,33828	4,0	1,34296	-0,90887	0,43409	0,00328	
DQO	0,01219	0,54516	4,0	2,16427	-0,81984	1,34444	0,01639	
NH ₃	0,00155	0,06915	337,9	23,36696	-0,45793	22,9090	0,03542	
NO ₃	1,6E-06	7,1E-05	22,3	0,00158	-0,00167	-0,00010	-1,5E-10*	
NO ₂	1,1E-07	4,9E-06	55,6	0,00027	-0,00015	0,00012	1,35E-11	
S ₂	1,6E-05	0,00070	1219,2	0,85039	-0,01257	0,83782	1,31E-05	
SO ₄	0,00043	0,01909	184,8	3,52800	-0,18733	3,34067	0,00143	
Cádmio	5,3E-08	2,4E-06	293,5	0,00070	-0,00008	0,00062	3,33E-11	
Níquel	6,3E-07	2,8E-05	232,7	0,00656	-0,00073	0,00583	3,67E-09	
Prata	1,0E-07	4,6E-06	70,2	0,00032	-0,00014	0,00018	1,85E-11	
Zinco	3,6E-06	0,00016	339,2	0,05501	-0,00351	0,05150	1,87E-07	
Mangansês	1,7E-06	7,6E-05	482,3	0,03652	-0,00178	0,03474	5,88E-08	
Molibdênio	2,1E-07	9,3E-06	730,3	0,00681	-0,00027	0,00654	1,36E-09	
Chumbo	1,7E-07	7,6E-06	232,8	0,00176	-0,00022	0,00154	2,59E-10	
Cobre	8,7E-07	3,9E-05	134,2	0,00520	-0,00098	0,00422	3,65E-09	
Cromo T.	1,4E-06	6,4E-05	544,3	0,03465	-0,00152	0,03312	4,71E-08	
Cromo + 6	1,9E-07	8,6E-06	544,3	0,00468	-0,00025	0,00443	8,53E-10	
Ferro	5,4E-05	0,00240	376,4	0,90440	-0,03592	0,86848	4,66E-05	
Fenol	3,4E-06	0,00015	3128,5	0,48174	-0,00335	0,47839	1,65E-06	
Fósforo	0,00012	0,00553	869,7	4,81021	-0,07126	4,73896	0,00059	
Surfactante	0,00042	0,01901	74,9	1,42394	-0,18674	1,23720	0,00053	
Estanho	1,1E-06	4,9E-05	544,9	0,02669	-0,00121	0,02549	2,79E-08	
TOTAL	0,02236	1		39,05363	-2,69631	36,3573	0,0576867	

* O valor negativo da exergia é devido a arredondamento

Tabela F-4 Cálculo do fluxo exerético associado à vazão efluente da ETE

Barueri

Exergia química	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/L)	Espécie química	Efluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$	$RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/L)
			DBO	0,00048	0,190601	4,0	0,75669	-0,78315	-0,026	-1,3E-05*
			DQO	0,00143	0,565616	4,0	2,24549	-0,79895	1,4465	0,002070
			NH ₃	0,00021	0,085345	337,9	28,83805	-0,52065	28,317	0,006102
			NO ₃	1,7E-06	0,000677	22,3	0,01510	-0,01225	0,0028	4,87E-09
			NO ₂	2,3E-06	0,000913	55,6	0,05074	-0,01583	0,0349	8,04E-08
			S ₂	1,6E-05	0,006176	1219,2	7,52950	-0,07788	7,4516	0,000116
			SO ₄	0,00027	0,107192	184,8	19,80917	-0,59337	19,216	0,005201
			Cádmio	5,3E-08	2,11E-05	293,5	0,00620	-0,00056	0,0056	3,01E-10
			Níquel	6,6E-07	0,000263	232,7	0,06122	-0,00538	0,0558	3,71E-08
			Prata	3,7E-08	1,47E-05	70,2	0,00103	-0,00041	0,0006	2,32E-11
			Zinco	1,4E-06	0,000557	339,2	0,18906	-0,01035	0,1787	2,51E-07
			Manganes	1,2E-06	0,000469	482,3	0,22599	-0,00890	0,2171	2,57E-07
			Molibdênio	2,1E-07	8,26E-05	730,3	0,06029	-0,00192	0,0584	1,22E-08
			Chumbo	1,4E-07	5,73E-05	232,8	0,01335	-0,00139	0,0119	1,73E-09
			Cobre	4,1E-07	0,000162	134,2	0,02175	-0,00351	0,0182	7,46E-09
			Cromo T.	3,8E-07	0,000152	544,3	0,08292	-0,00332	0,0796	3,06E-08
			Cromo+6	1,9E-07	7,62E-05	544,3	0,04146	-0,00179	0,0397	7,63E-09
			Ferro	8,6E-06	0,003418	376,4	1,28658	-0,04811	1,2385	1,07E-05
			Fenol	5,1E-07	0,000202	3128,5	0,63192	-0,00426	0,6277	3,20E-07
			Fósforo	5,8E-05	0,023015	869,7	20,01643	-0,21517	19,801	0,001151
			Surfactante	3,7E-05	0,014555	74,9	1,09021	-0,15261	0,9376	3,45E-05
			Estanho	1,1E-06	0,000434	544,9	0,23634	-0,00833	0,2280	2,50E-07
			TOTAL	0,00252	1		83,20949	-3,26808	79,941	0,014670

* O valor negativo da exergia é devido a arredondamento

Tabela F-5 Cálculo do fluxo exergético associado ao lodo desidratado produzido

na ETE Parque Novo Mundo

Exergia química	Exergia química molar	Exergia química total	Exergia química (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum (\mu_i - \mu_{i0}) n_i$	$RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$	Exergia química (kJ/mol)	Lodo gerado (mol/kg)	Espécie química
1,2E-06	0,01910	0,01910	293,5	0,02078	-0,00168	0,01910	7,08E-05	6,1E-05	Cádmio
0,00057	0,37868	0,37868	232,7	0,40616	-0,02748	0,37868	1,74E-03	1,5E-03	Níquel
5,0E-07	0,00522	0,00522	70,2	0,00770	-0,00248	0,00522	1,10E-04	9,5E-05	Prata
0,05723	4,66066	4,66066	339,2	4,81027	-0,1496	4,66066	1,42E-02	1,2E-02	Zinco
0,01251	2,60467	2,60467	482,3	2,67611	-0,07144	2,60467	5,55E-03	4,8E-03	Mangan.
1,6E-14	2,37E-06	2,37E-06	346,5	0,000003	-3,7E-07	2,37E-06	7,90E-09	6,8E-09	Selenio
3,9E-05	0,09811	0,09811	232,8	0,10686	-0,00875	0,09811	4,59E-04	4,0E-04	Chumbo
0,00276	0,62140	0,62140	134,2	0,68846	-0,06705	0,62140	5,13E-03	4,4E-03	Cobre
0,01172	2,68175	2,68175	544,3	2,74794	-0,06618	2,68175	5,05E-03	4,4E-03	Cromo
1,9E-05	0,12629	0,12629	730,3	0,13011	-0,00381	0,12629	1,78E-04	1,5E-04	Molibd.
304,848	363,989	363,989	376,4	364,069	-0,07986	363,989	9,67E-01	8,4E-01	Ferro
1,1E-05	0,07779	0,07779	494,6	0,08135	-0,00355	0,07779	1,64E-04	1,4E-04	Arsênio
3,2E-06	0,02996	0,02996	265	0,03272	-0,00275	0,02996	1,23E-04	1,1E-04	Cobalto
1,8E-15	3,84E-07	3,84E-07	115,9	0,000001	-2,6E-07	3,84E-07	5,58E-09	4,8E-09	Mercurio
304,933	375,293	375,293	375,777	375,777	-0,48464	375,293	0,86588	0,86588	TOTAL

Tabela F-6 Cálculo do fluxo exergético associado ao lodo desidratado produzido

na FTE Barueri

Exergia química	Exergia química molar	Exergia química total	Exergia química específica	Lodo gerado	x_i	Exergia química específica	$\sum (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$	$RT_0 \sum n_i \ln(a_i)$	Exergia química	Exergia química específica	Exergia química total	
(kJ/kg)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(mol/kg)	(mol/mol)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	
Cádmio	0,00011	0,00017	293,5	0,00017	0,00017	0,051531	-0,00376	0,0477	5,4E-06	0,00793	1,6501	0,00793
Níquel	0,00480	0,00748	232,7	0,00748	0,00091	0,064194	-0,01586	0,0483	2,8E-05	0,00059	0,00091	0,00059
Prata	0,00059	0,00091	70,2	0,00091	0,04958	339,2	16,81883	16,449	0,52366	0,03183	0,04958	0,03183
Zinco	0,03183	0,04958	339,2	0,04958	0,00691	482,3	3,331902	3,2467	0,01440	0,00443	0,00691	0,00443
Manganes	0,00443	0,00691	482,3	0,00691	0,00123	232,8	0,286437	0,2660	0,00021	0,00079	0,00123	0,00079
Chumbo	0,00079	0,00123	232,8	0,00123	0,01357	134,2	1,821389	1,6767	0,01461	0,00871	0,01357	0,00871
Cobre	0,00871	0,01357	134,2	0,01357	0,01399	544,3	7,619711	7,4716	0,06715	0,00899	0,01399	0,00899
Cromo	0,00899	0,01399	544,3	0,01399	0,00024	730,3	0,177844	0,1728	2,7E-05	0,00016	0,00024	0,00016
Molibdênio	0,00016	0,00024	730,3	0,00024	0,90589	376,4	340,9774	340,75	198,186	0,58161	0,90589	0,58161
Ferro	0,58161	0,90589	376,4	0,90589	1	372,8902	-1,10502	371,78	198,814	0,64203	1	0,64203
TOTAL	0,64203	1	372,8902	1								

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ANAYA, A.; CARAVEO, L. M.; GARCIA, V. H.; MENDOZA, A. **Energetic optimization analysis of a petroleum refinery applying the second law of thermodynamics**. San Bartolo Atepehuacan : Instituto Mexicano de Petroleo, 1990. p. 49-54.
- AYRES, R. U. **Eco-thermodynamics : economics and the second law. Ecological Economics**, v.26, n.2, p. 189-209, 1998.
- AYRES, R. U.; AYRES, L. W.; MARTINÁS, K. **Eco-thermodynamics: exergy and life cycle analysis**. In: Centre for the Management of Environmental Resources, Fontainebleau, France, 1996. p.1-48.
- AYRES, R. U.; AYRES, L.W.; MARTINÁS, K. **Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis. Energy**, v.23, n.5, p.355-363, 1997.
- BASTIANONI, S. **A definition of 'pollution' based on thermodynamic goal functions. Ecological Modelling**, v.113, n.1/3, p.163-166, nov. 1998.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New York : John Wiley & Sons, 1996. 542p.
- BENVENUTTI, L. P.; FRANK, B. **Barômetro de gestão ambiental em Santa Catarina**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 20., / INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATION MANAGEMENT., 6, São Paulo, 2000. **Anais**. São Paulo : EPUSP/FCAV, 2000. p.1-8.
- BOTERO, E. A. **Valoración exergética de recursos naturales, minerales, agua y combustibles fósiles**. Zaragoza, 2000. Tese (Doutorado) - Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza. Disponível em: <http://www.circe.cps.unizar.es/pub/publicir.nsf>. Acesso em: 10 nov. 2002.

- CARMOUZE, J. P. **O metabolismo dos ecossistemas aquáticos** : fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. São Paulo : Editora Edgar Blücher, 1994. 253p.
- CHEN, L. ; ZHOU, J. ; SUN, F. ; WU, C. Ecological optimisation for generalized irreversible Carnot engines. *Applied Energy*, v.77, p. 327-338, 2004.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Descrição da estação de tratamento de esgotos Parque Novo Mundo ETE – PNM**. São Paulo: SABESP, 2003.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Descrição da estação de tratamento de esgotos Barueri**. São Paulo : SABESP, 2002.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tratamento de esgotos por lodos ativados**. São Paulo : SABESP, 2003. Disponível em: http://www.sabesp.com.br/sabesp_ensina/intermediario/lodos_ativados/default.htm. Acesso em: 18 de ago. 2003.
- COSTA, M. M. ; SCHAEFFER, R. ; WORELL, E. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems. *Energy*, v.26, n.4, p.363-384, abr. 2001.
- CREYTS, J. C. ; CAREY, V. P. Use of extended exergy analysis as a tool for assessment of the environmental impact of industrial processes. *Advanced Energy Systems Division*, v.37, p. 129-137, 1997.
- DANIEL, J. J. ; ROSEN, M.A. Exergetic environmental assessment of life cycle emissions for various automobiles and fuels. *Exergy*, p.1-12, 2002.
- DINCER, I. ; ROSEN, M.A. A worldwide perspective on energy, environment and sustainable development. *International Journal of Energy Research*, v. 22, n.15, p. 1305 - 1321, dez., 1998.

- GONG, M. **On exergy as an ecological indicator**. Göteborg, Suécia, 1999. Master of Science Thesis - Department of Physical Resource Theory, Chalmers University of Technology and Göteborg University. Disponível em: <ftp://exergy.se/pub/ei.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2003.
- GONG, M.; WALL, G. On exergy and sustainable development-part 2: indicators and methods. *Exergy*, v.1, p.217-233, 2001.
- HELLSTRÖM, D. An exergy analysis for a wastewater treatment plant : an estimation of the consumption of physical resources. *Water Environment Research*, v 69, n 1, jan./fev., p 44-51, 1997.
- HELOU, L. C. **Otimização de estações de tratamento de esgoto (ETE) convencionais por lodos ativados com aproveitamento dos efluentes para reúso**. São Paulo, 2000. 259p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HOVELIUS, K.; HANSSON, R. Energy- and exergy analysis of rape seed oil methyl ester (RME) production under Swedish conditions. *Biomass and Bioenergy*, v 17, n 4, p 279-290, 1999.
- KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London : Butterworths, 1985. 283 p.
- MAKARYTCHEV, S. V. Environmental impact analysis of ACFB-based gas and power cogeneration. *Energy*, v.23, n. 9, p. 711-717, 1997.
- NÄSHOLM, Ann-Soft E.; SVEDBERG, G.; WESTERMARK, M.O.J. **Exergy analysis of biomass-fired cogeneration plant in a pulp and paper mill**. In: INTERNATIONAL GASTURBINE and AEROENGINE CONGRESS AND EXPOSITION, Cincinnati, Ohio, 1993. *Proceedings*. s.l.: s.ed., 1993. p. 24-27.
- OLIVEIRA JUNIOR, Silvio de. **Análise termodinâmica e termoeconômica de processos de conversão de energia**. São Paulo : EPU/SP/PME, 1996. Notas de aula.

- PTTELA, R. ; HUTNY, W. ; PRICE, J. T. Energy and exergy consumption and CO₂ emissions in ironmaking process. *Advances in environmental research*, v.6, p.157-170, 2002.
- PHYLLIPSEN, D. ; BLOK, K. ; WORRELL, E. ; BEER, J. D. Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: an assessment of the expected effect on energy consumption and CO₂ emissions. *Energy Policy*, v.30, p.663-679, 2002.
- RIVERO, R. ; HERNÁNDEZ, R. Determinación de costos de producción de vapor y electricidad en una refinera, utilizando el método de exergía. *Revista del IMIQ*, v.7-8, p.35-41, 1996.
- ROSEN, M. A. ; DINCER, I. Exergy analysis of waste emissions. *International Journal of Energy Research*, v.23, n. 3, p.1153-1163, out. 1999.
- ROSEN, M. A. Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics. *Applied Energy*, v.72, n.1, p.427-441, maio, 2002.
- ROSEN, M. A. ; DINCER, I. Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. *Exergy*, v.1, p.3-13, 2001.
- ROSEN, M. A.; DINCER, I. On exergy and environmental Impact. *International Journal of Energy Research*, v. 21, n.7, p. 643-654, jun.,1997.
- SZARGUT, J. Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes. *Energy*, v.27, p.379-389, 2002.
- SZARGUT, J. ; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York : Hemisphere 1988. 332p.
- TSATSARONIS, G. Thermo-economic analysis and optimization of energy systems. *Energy*, v.19, n.3, p.227-257, 1993.

- VALERO, A. ; Arauzo, I. **Consecuencias Exergeticas Asociadas al Efecto Invernadero**. 1991. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza. Disponible em: <http://www.circe.cps.unizar.es/pub/publicir.nsf>. Acesso em: 10 nov. 2002.
- WALL, G. Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society. **Energy Conversion and Management**, v.43, n.9/12, p.1235-1248, supl., jun/ago., 2002.
- WALL, G. Exergy conversion in the japanese society. **Energy**, v.15, n.5, p.435-444, maio, 1990.
- WALL, G. ; GONG, M. On exergy and sustainable development-part I: conditions and concepts. **Exergy**, v.1, p.128-145, 2001.
- WEIBULL, W. W. Rio de Janeiro. **Parâmetros de Qualidade das águas**. Disponível em: <<http://www.geocities.com/wwwweibull/Param.htm>>. Acesso em: 02 de jul. 2003.
- YAGI, J. ; AKIYAMA, T. **Exergy analysis of iron making processes for reduction of carbon dioxide emission**. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 3, São Paulo, 2001. **Proceedings**. São Paulo : EPUSP, 2001. p.1-14.
- ZHOU, J. ; MA, S. ; HINMAN, G. W. Ecological exergy analysis: a new method for ecological energetics research. **Ecological modelling**, v.84, n.1/3, p.291-303, jan. 1996.