

CARLOS HUMBERTO MORA BEJARANO

**INDICADORES EXERGÉTICOS 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.**

**São Paulo
2003**

CARLOS HUMBERTO MORA BEJARANO

**INDICADORES EXERGÉTICOS 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
2003**

El corazón del hombre medita su camino, pero es Dios quien asegura sus pasos.

Proverbios 16:9

A Alexandra

A mis padres Eduardo y Lucila, y a mis hermanos
Martha Lucia, Eduardo y William.

AGRADECIMENTOS

A Deus, principalmente, por todos os dias da minha vida.

Ao professor Silvio de Oliveira Junior, pela amizade, a orientação dada na elaboração do trabalho, a sua permanente disponibilidade, e pelo incentivo e apoio ao longo destes anos.

À minha esposa Alexandra pela sua compreensão, paciência e constante apoio.

À Martha Lucía Mora Bejarano pela sua valiosa e constante colaboração durante todos estes anos.

Ao Sr. Fabiano José Formiga pela valiosa colaboração.

Aos Engenheiros da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, Mario Saitto, Rosangela Carvalho, Alessandra Cardoso Souza Minelli e Luiz Carlos Helou, pela inestimável contribuição com o material do estudo de caso das ETES Parque Novo Mundo e Barueri.

À bibliotecária, Maria de Fátima Queiroz Carvalhal, pela sua valiosa ajuda nas pesquisas bibliográficas e na revisão da bibliografia deste trabalho.

Ao CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo suporte financeiro.

Àqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS

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	<i>Processo de produção de aço do alto forno tradicional com e sem injeção de carvão pulverizado</i>	<i>38</i>
5.2.2	<i>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</i>	<i>42</i>

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...	57
5.6.1	<i>Descrição das estações de tratamento de esgoto</i>	58
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
5.6.3	<i>Análise exergética das 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 exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível.....	49
Figura 5.13 Balanço exergético de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo.....	50
Figura 5.14 Balanço exergético e parâmetro ambiental para o caso da refinaria antes da otimização.....	53
Figura 5.15 Balanço exergético 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 exergético do processo de produção do fertilizante CAN.....	56
Figura 5.18 Balanço exergético 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 exergético da ETE Parque Novo Mundo.....	79
Figura 5.22 Balanço exergético 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 exergética 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	35
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 exergética 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 exergética, exergia das emissões no ar e dos rejeitos aquáticos para quatro processos de produção de aço	45
Tabela 5.8 Valores da eficiência exergética ambiental, da taxa de poluição total e da eficiência exergética para quatro processos de produção de aço	45
Tabela 5.9 Valores da eficiência exergética 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 quatro 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 (afluente) 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 (afluente) 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 exergia 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 exergética 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 exergética 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 exergética 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 exergético associado à vazão afluente da ETE Parque Novo Mundo.....	124
Tabela F-2 Cálculo do fluxo exergético associado à vazão efluente da ETE Parque Novo Mundo.....	125
Tabela F-3 Cálculo do fluxo exergético associado à vazão afluente da ETE Barueri	126
Tabela F-4 Cálculo do fluxo exergético associado à vazão efluente da ETE Barueri	127
Tabela F-5 Cálculo do fluxo exergético 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 ABREVIATURAS 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

Símbolos Latinos

<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)
<i>Q</i>	taxa de calor (kJ/s)
<i>R</i>	constante do(s) Gás(es) (J/ mol K)
<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)

v	velocidade (m/s)
ν	volume específico (m ³ /kg),
V	volume (m ³)
W	trabalho (kJ)
x_i	fração molar do componente i
z	elevação (m)

Símbolos Gregos

Δ	variação
η	eficiência exergética
μ	potencial químico (J/mol)
$\dot{\sigma}$	entropia produzida (kJ/K)

Subscritos

<i>cin</i>	cinética
<i>e</i>	entrada, externo
<i>ex</i>	exergético
<i>f</i>	física
<i>n</i>	referência padrão para cálculo de exergia
<i>o</i>	referência para cálculo da exergia
<i>pot</i>	potencial
<i>quí</i>	química
<i>s</i>	saída

Superescrito

- molar
- s* sistema
- * estado de referência restrito
- . taxa de variação temporal
- ° 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; Gong (2001); Wall (2002)). Outros foram além e calcularam esse impacto baseando-se na exergia (Bastianoni (1998); Botero (2000); Costa; Schaeffer; Worrell (2001); Creyts; 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 (Martinez; Alier; 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 lei da entropia.

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 (exergia) 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 esgotarem 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 emerggia é uma medida da energia gasta no passado, “*uma memória da energia*”. A análise de emerggia 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 emerggética 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 Phylipsen 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

SETOR	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 Rant como uma nova palavra para definir a “capacidade de trabalho”, expressão esta utilizada inicialmente por Bosjakovic (Tsatsaronis, 1993). Rant (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 ecologicamente 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 CO_2 é duplicada.

Outros trabalhos importantes sobre a relação entre a termodinâmica e a sustentabilidade são os de Ayres; 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 industrial) e as políticas ambientais orientadas aos produtos.

As pesquisas mais relevantes sobre as relações entre a exergia 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 do combustível e, por conseguinte, a uma redução na emissão de poluentes para o ambiente. Nesse mesmo ano, Wall (1990) apresentou o conceito de exergia como uma ferramenta para a contabilidade de recursos. Ele descreveu os processos de conversão de energia, na sociedade japonesa, em termos da exergia assim como também mostrou as perdas de exergia 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; Hinman (1996) apresentaram uma análise exergética ecológica, na qual a exergia foi usada como uma medida da qualidade da energia, para descrever os processos físico-químicos nos organismos. Partindo das equações do balanço de exergia para uma planta e um animal, definiram a “eficiência exergética ecológica” como um índice para avaliar a perfeição termodinâmica de diferentes processos ecológicos. Zhou; Ma; Hinman (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 exergia contida nos processos de produção energética do animal, E_R é a exergia 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 $\eta_e^2 = (E_P + E_R)/E_I$, este índice mede a habilidade dos organismos para assimilar a exergia;
- c) “eficiência exergética de produção” definida como $\eta_e^3 = E_P/(E_I - E_F - E_Q)$, este índice mede a habilidade dos organismos para produzir exergia, e;
- d) “eficiência exergética de respiração” definida como $\eta_e^4 = E_R/(E_I - E_F - E_Q)$, este índice expressa a fração da exergia assimilada que os organismos usam para manter as atividades da vida.

Finalmente, concluíram que o índice η_e^1 pode ser usado como uma função objetivo na otimização termoeconômica 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.

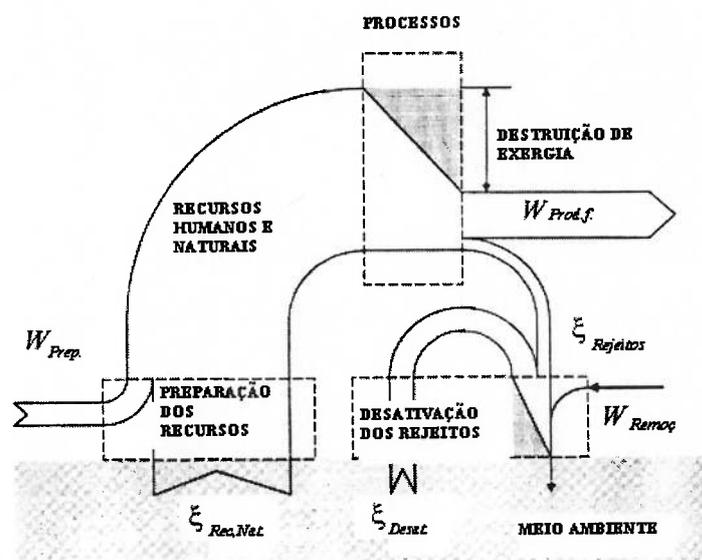


Figura 2.1 Representação esquemática do impacto ambiental dos processos de conversão de energia (Makarytchev , 1997)

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 (η_{amb}), e a taxa de poluição total ($R_{pol,t}$). 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):

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

onde:

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

$W_{Prep.}$ = 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.

$\xi_{Desat.}$ = 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):

$$\eta_{amb} = \frac{1}{R_{rec}} \quad (2.2)$$

E 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):

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

onde:

ξ_{Rej} = exergia 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 cogeração 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 os problemas ambientais mais relevantes (a chuva ácida, o esgotamento do ozônio 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 biogeoquímica do sistema; e a emergia considerando o conceito de emergia 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 emergia 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 prever 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 **EPC** 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 conseqüências 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 exergia 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 entregar 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 sob 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 única oportunidade 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) onde 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 fenômeno, 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 técnica. 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 absorve-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 e da produção de cimento, 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 européias 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 européia propôs uma redução do 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.

A Conferência Internacional pela Mudança Climática (CIPC) num de seus relatórios afirma “*existe uma clara evidencia que sugere uma influencia 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 metano e os CFC’s também têm uma participação significativa.

Diferentemente de outros poluentes, o CO₂ não tem uma norma que regule suas emissões. As reduções planejadas sobre as emissões deste gás estão baseadas no protocolo de Kioto, em que propõe-se atingir um nível de emissões para 2025 igual ao registrado em 1990. Isto supõe uma redução das emissões deste gás ao ambiente de 8 %, aproximadamente (Botero, 2000).

No protocolo de Kioto acordou-se uma redução média do 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 na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Emissões acumuladas de CO₂ no ano 2100

Ambiente	Emissões acumuladas [Gt CO₂/100 anos]
Sem medidas corretivas	5.490
Com estabilização	2.379
Diferença	3.111

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.

Além do carbono, os combustíveis fósseis têm outros componentes que causam danos sobre o meio ambiente, como são 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.

Como o conceito de exergia está baseado na primeira e segunda lei da Termodinâmica, com a análise exérgica é possível identificar a localização e as magnitudes das perdas exérgicas dentro de um processo ou sistema. Quando esta análise é aplicada aos processos de conversão de energia, caracteriza como a exergia do combustível é usada e destruída nestes processos, além disto, ela oferece as seguintes vantagens:

- usada como uma medida comum de entradas e saídas, possibilita o cálculo da eficiência exérgica, a saber, a razão das saídas pelas entradas exérgicas totais (incluindo utilidades). Esta razão fornece uma indicação do potencial teórico de futuras melhorias para um processo;
- o uso da análise exérgica fornece uma medida comum para diferentes processos ou produtos;
- a análise exérgica é uma ferramenta efetiva para atingir uma utilização eficiente da energia com mínimo impacto ambiental e para entender as questões ambientais;
- outra vantagem está relacionada à definição da exergia, já que ela pode estimar a degradação da qualidade da energia dentro de um processo.
- Segundo Szargut (1988), o principal propósito de uma análise exérgica é descobrir as causas e estimar quantitativamente a magnitude da imperfeição dos processos de conversão de energia.

3.2 Processos reversíveis e irreversíveis

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

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 alterem 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.

$$B = B_f + B_{cin} + B_{pot} + B_{qui} \quad (3.1)$$

Em base mássica:

$$b = b_f + b_{cin} + b_{pot} + b_{qui} \quad (3.2)$$

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

$$B_{cin} = m \frac{v^2}{2} \quad \text{e} \quad B_{pot} = m g z \quad (3.3)$$

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:

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

Em base mássica:

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

e para um fluxo:

$$\dot{B}_f = \dot{m}(h - h^* - T_0(s - s^*)) \quad (3.6)$$

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:

$$B_{qui}^s = U^* + p_0 V^* - T_0 S^* - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i = \sum_{i=1}^n (\mu_i^* - \mu_{0,i}) N_i \quad (3.8)$$

já para um fluxo em base molar tem-se:

$$\bar{b}_{qui} = \bar{h}^* - T_0 \bar{s}^* - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} x_i \quad (3.9)$$

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

$$\bar{b}_{qui} = \sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i + RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i) \quad (3.10)$$

A exergia total para um sistema é dada por:

$$B^s = U + p_0 V - T_0 S - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} N_i \quad (3.11)$$

e para um fluxo, tem-se:

$$\bar{b} = \bar{h} - T_0 \bar{s} - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} x_i \quad (3.12)$$

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:

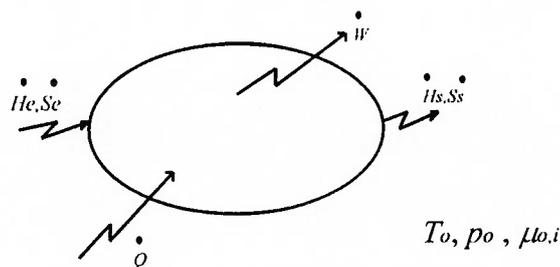


Figura 3.1 Volume de controle

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

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

Balanço de Entropia:

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

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

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

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_o , consumindo \dot{Q} e rejeitando calor para o meio ambiente à T_o (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 = $T_o\dot{\sigma}$).

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 exergéticas 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 exergética

A eficiência exergética é definida como um parâmetro usado para avaliar o rendimento termodinâmico. A eficiência exergética (rendimento exergético, 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 exergética, algumas delas são:

- Grau de Perfeição:

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

- Rendimento/Eficácia exergético:

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

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

Bejan; Tsatsaronis; Moran (1996) na definição da eficiência exergética, 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 exergética é dada pela razão entre a exergia do produto e a do combustível. Kotas (1985), definiu a eficiência exergética 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 exergética. 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 desta premissa, neste capítulo está 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 $R_{pol,t}$ (proposta por Makarytchev (1997)), para dados levantados na literatura e, para um estudo de caso de duas Estações de Tratamento de Esgoto (Barueri e 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 isto é necessário prestar uma maior

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

Um aumento na eficiência exergética teria como consequência uma diminuição no consumo de recursos e, por conseguinte, uma redução dos rejeitos e das emissões destes ao ambiente, o que se traduz em uma melhora no desempenho ambiental destes processos. Desta forma, pode-se associar à eficiência exergética, além dos aspectos de eficiência exergética inerentes a sua definição, os aspectos ambientais.

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

A eficiência exergética ambiental é definida como a razão da exergia do produto final (ou efeito útil de um processo) pela exergia 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 exergética ambiental é calculada de acordo com a eq. (4.1):

$$\eta_{exerg,amb} = \frac{W_{Prod. final}}{\xi_{Rec. nat} + W_{Prep} + \xi_{Desat} + W_{Remoç}} \quad (4.1)$$

onde:

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

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

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

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

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

As diferenças encontradas na literatura entre as definições da eficiência exergética e eficiência exergética 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 exergia 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 exergia no ambiente incluindo o processo de desativação dos rejeitos do processo, e o definiu como a razão entre a exergia destruída e a exergia do efeito útil de um processo.

A taxa de poluição total é definida em termos dos componentes físicos e químicos 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 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):

$$R_{pol,t} = \frac{\xi_{Rej} + \xi_{Desat}}{W_{Prod. final}} \quad (4.2)$$

onde:

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

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

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

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

A taxa de poluição total será $R_{pol,t} = 0$, quando o termo $(\xi_{Rej} + \xi_{Desat}) = 0$. Este é o caso dos processos reversíveis, que não causam impacto no ambiente.

A taxa de poluição total estará entre $0 < R_{pol,t} < 1$, quando o termo $(\xi_{Rej} + \xi_{Desat}) < W_{Prod. final}$. 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 de 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.

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 do 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)	Destruída e perdida (kJ)
Processo de produção de cloro		16451	7027	9424
Processo de produção de PVC		173432 E6	97272 E6	76160 E6

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

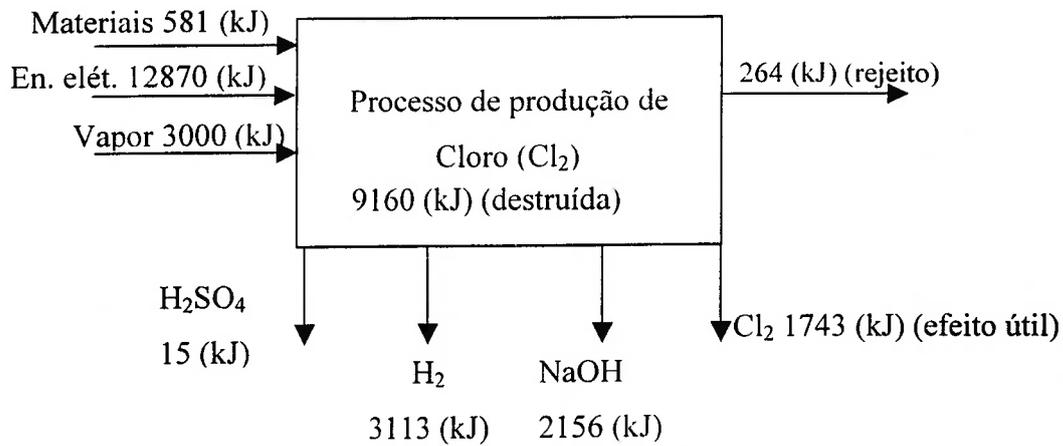


Figura 5.1 Balanço exergético do processo de produção de cloro

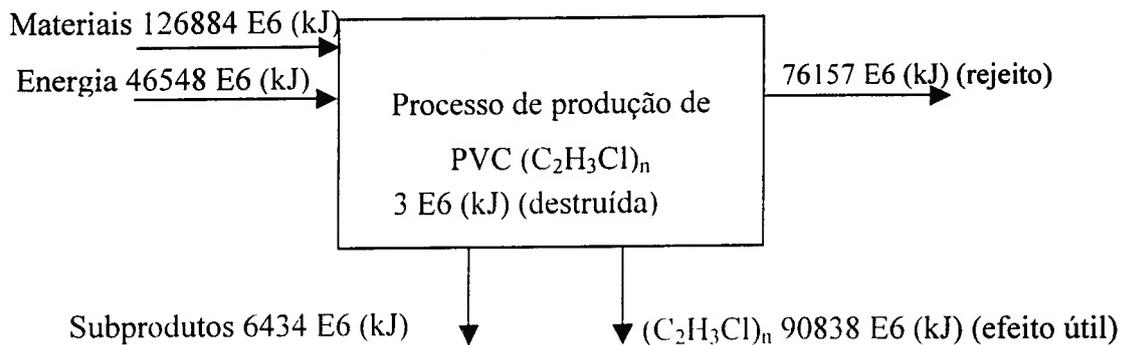


Figura 5.2 Balanço exergético do processo de produção de PVC

Os autores concluíram que a exergia 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 desempenho ambiental de cada um dos processos.

Ao calcular a eficiência exergética ambiental e a taxa de poluição total, com os dados da Tabela 5-1, obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5.2 Valores dos índices de impacto ambiental para os processos de produção de cloro e PVC

Processo	Índice ambiental $\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,total}$
Processo de produção de cloro	0,43	1,34
Processo de produção de PVC	0,56	0,78

Nesta Tabela, observa-se que o processo que causa o menor impacto no ambiente, é o da produção de PVC; já que apresenta a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,56) e a menor $R_{pol,t}$ (0,78). O valor obtido da $R_{pol,t} < 1$, para o processo de produção de PVC foi devido a que o termo da exergia destruída e perdida é menor que o efeito útil do processo; já para o processo de produção de cloro obteve-se um valor $R_{pol,t} > 1$, devido a que o termo da exergia destruída e perdida excede o valor da exergia do efeito útil do processo.

O volume de controle considerado no cálculo dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$) para os dois processos, coincide com as fronteiras dos processos, portanto, deve ser esclarecido que no cálculo da eficiência exergética ambiental, não foram incluídas as parcelas exergéticas de entrada devidas aos processos de produção dos insumos exergéticos. No caso do processo de produção de cloro, não foram incluídas as exergias associadas aos processos de produção das matérias primas (NaCl, HCl, Na₂CO₃, CaCl₂, H₂SO₄, Na₂S, Hg), assim como a exergia associada ao processo de produção da energia elétrica consumida no processo de produção de cloro. Para o processo de PVC não foram incluídas as exergias associadas aos processos de produção das matérias primas (Cl₂, C₂H₄, O₂, NaOH, C₂H₂), assim como a exergia associada aos processo 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.

No calculo da taxa de poluição total, não foi considerada a parcela da exergia associada à desativação dos rejeitos, devido a que os autores não consideraram este termo em seu trabalho. As parcelas de exergia destruída mais significativas no

cálculo da taxa de poluição total foram as devidas aos rejeitos térmicos dos processos de produção de cloro e PVC (97,2 % e 89 % da exergia destruída total, respectivamente), que são exergia física e praticamente inofensivas ao ambiente.

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 ($\eta_{exerg,amb}$), assim como na caracterização da destruição da exergia no ambiente ($R_{pol,t}$).

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 (CO, 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)	Destruída e perdida (GJ/thm)
Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado		16	6,7	9,3
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado		16	8,0	8,0

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		9,3	500
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado		8,0	479,2

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

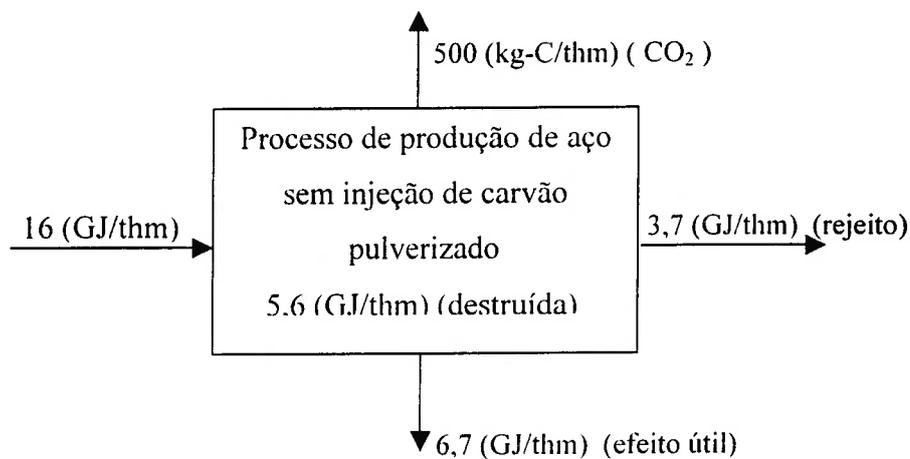


Figura 5.3 Balanço exergético e parâmetro ambiental do processo de produção de aço do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado

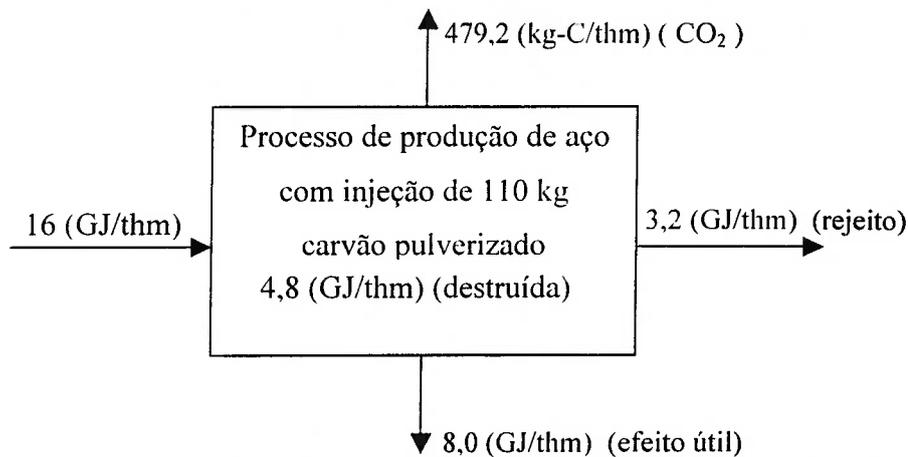


Figura 5.4 Balanço exergético e parâmetro ambiental do processo de produção de aço do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado

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 $R_{pol,t}$ (1,0).

Observando os parâmetros de avaliação ambiental de Yagi; Akiyama (2001), concluiu-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 CO_2 (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 apresentados um resumo dos resultados e uma comparação.

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

Processo	Índice ambiental $\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$	Exergia destruída e perdida (GJ/thm)	Emissão de CO ₂ (kg-c/thm)
Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	0,42	1,4	9,3	500
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	0,5	1,0	8,0	479,2

Neste estudo de caso, a avaliação do impacto ambiental por meio dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), mostrou ser um método coerente às 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 exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$). 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 exergética, 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	Entrada (GJ/t. de aço)	Saída (GJ/t. de aço)	Destruída e perdida (GJ/t. de aço)
Convencional 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 exerгéticos para os quatro processos de produção de aço.

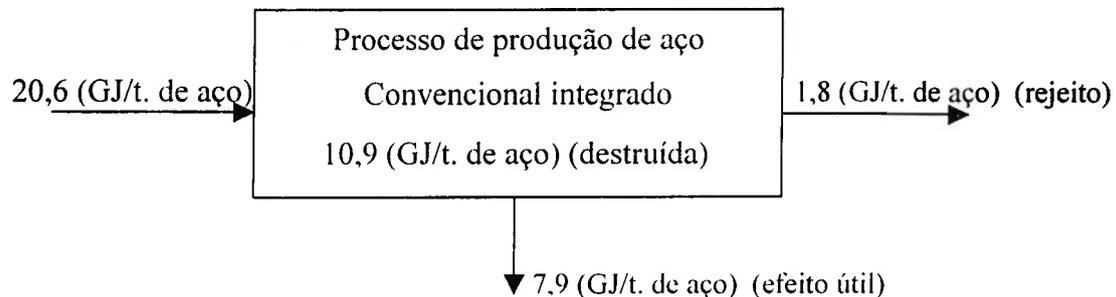


Figura 5.5 Balanço exerгético do processo de produção de aço convencional integrado

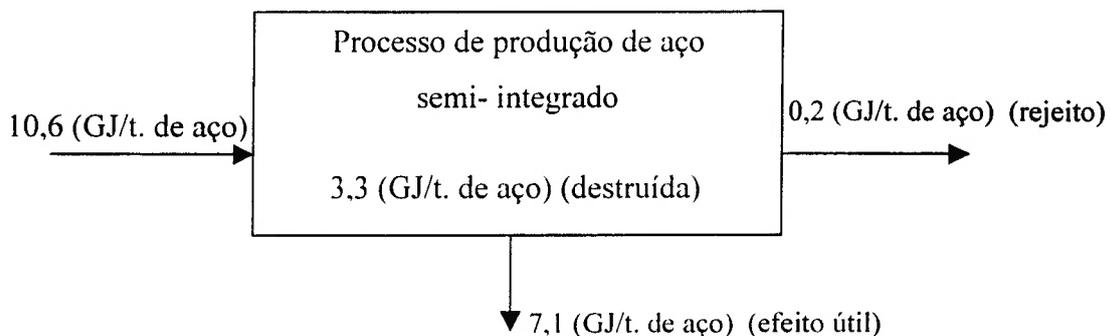


Figura 5.6 Balanço exerгético do processo de produção de aço semi-integrado

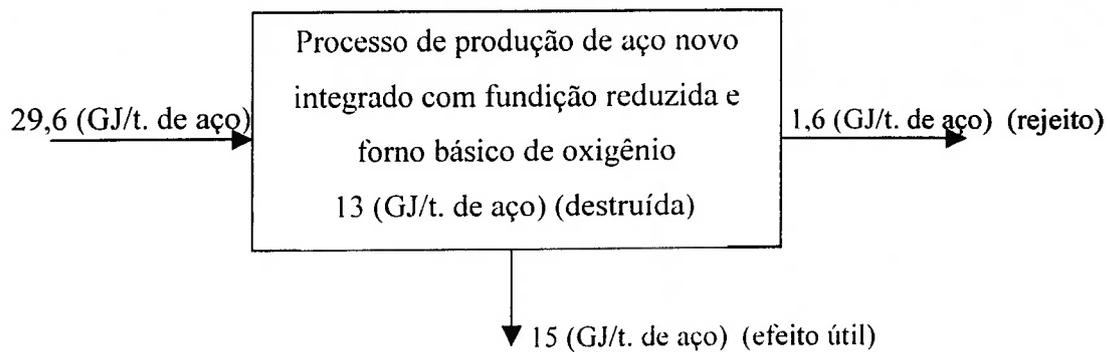


Figura 5.7 Balanço exergético do processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio

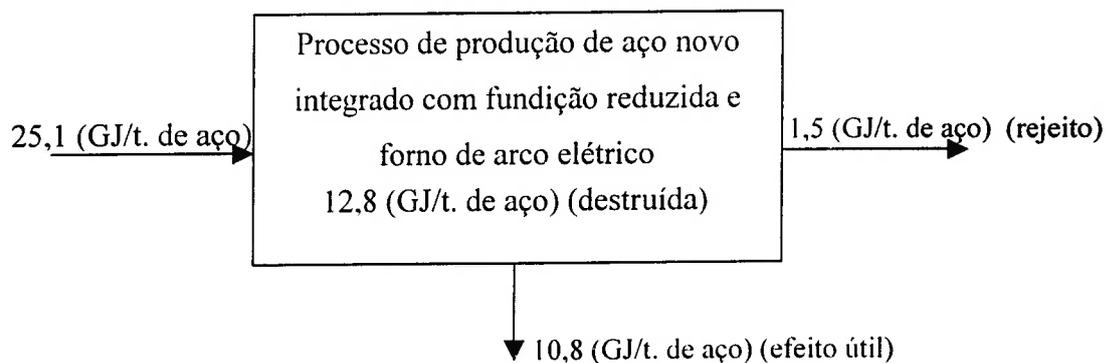


Figura 5.8 Balanço exergético do processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico

Costa; Schaeffer; Worrell (2001) apresentaram e compararam a eficiência exergética (η_{exerg}), e a exergia das emissões no ar (material particulado, SO_2 , NO_x , CO , CO_2 , VOCs, H_2S , HCl , HF , PAHs “hidrocarboneto aromático policíclico”, PCDD/F policloro de benzeno -p- dioxinas e furanos (“polychlorinated dibenzo-p-dioxins and furans”), benzeno, NH_3 e CH_4) 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.

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

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

Com os dados gerados pela análise exergética foi avaliada a eficiência exergética 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 exergética ambiental, da taxa de poluição total e da eficiência exergética para quatro processos de produção de aço

Processo	Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$	η_{exerg}	Exergia das emissões e dos rejeitos (GJ/t. de aço)
Convencional integrado		0,38	1,61	0,38	0,9
Semi-integrado		0,67	0,50	0,67	0,04
Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio		0,51	0,97	0,51	0,4
Novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico		0,43	1,32	0,43	0,4

Nesta Tabela, observa-se que tanto os resultados da análise dos índices do impacto ambiental ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), 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 $R_{pol,t}$ (0,50) 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

Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$
Processo		
Processo do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	0,42	1,4
Processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	0,50	1,0
Convencional integrado	0,38	1,61
Semi-integrado	0,67	0,50
Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio	0,51	0,97
Novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	0,43	1,32

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 $R_{pol,t}$ (0,50). 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 do 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 quatro diferentes arranjos de uma planta de cogeração

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

Nas Figuras 5-9, 5-10, 5-11, 5-12 e 5-13 são apresentados os balanços exerгéticos 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.

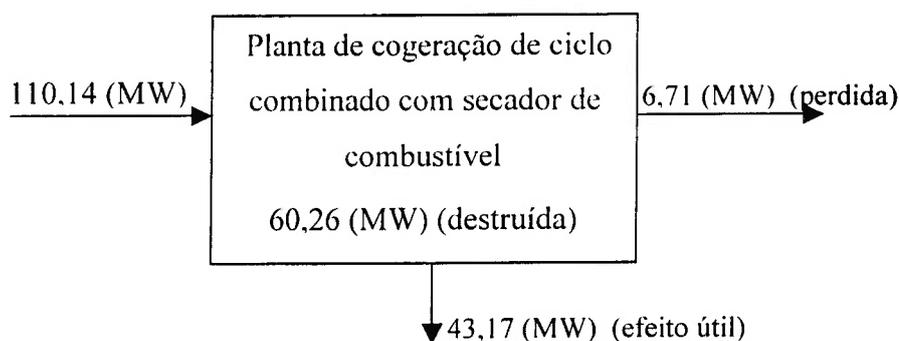


Figura 5.9 Balanço exerгético de uma planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível

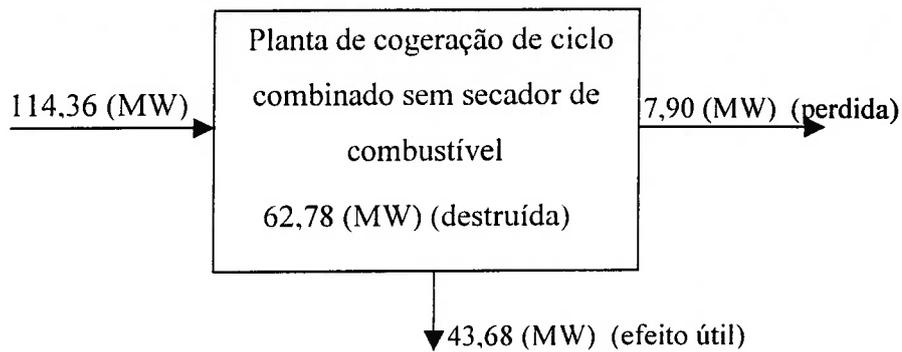


Figura 5.10 Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível

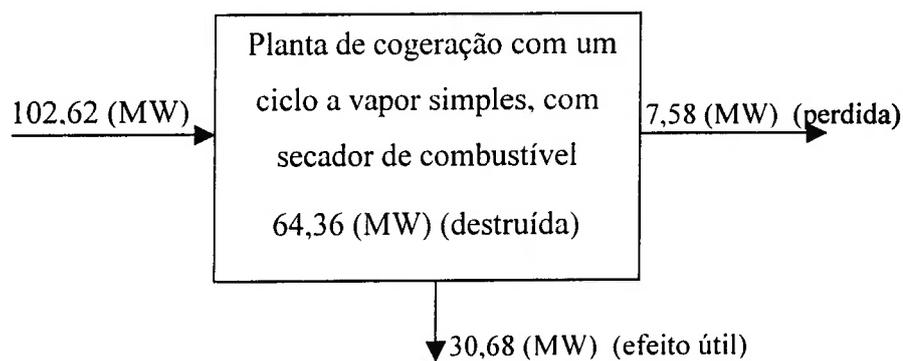


Figura 5.11 Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível

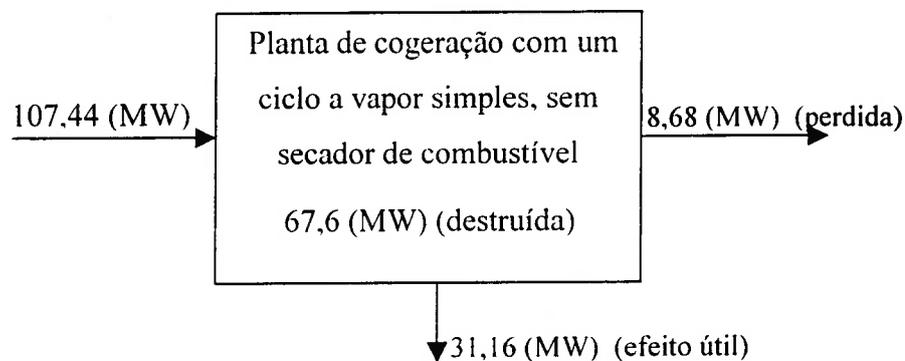


Figura 5.12 Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível

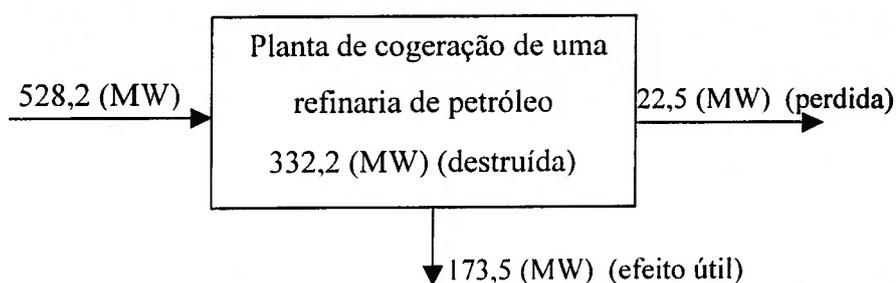


Figura 5.13 Balanço exergético de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo

Näsholm; Svedberg; Westermark (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.

Tabela 5.11 Parâmetros ambientais para quatro plantas de cogeração

Planta	Índice ambiental	
	η_{exergT}	η_{energT}
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

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 avaliados a eficiência exergética ambiental e a taxa de poluição total, para os arranjos da planta de cogeração da

industria de celulose e papel e para a planta de cogeração da 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	Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$	η_{exergT}	η_{energT}
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível		0,39	1,55	0,39	0,723
Planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível		0,38	1,62	0,38	0,711
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível		0,30	2,34	0,30	0,666
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível		0,29	2,45	0,29	0,650
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo		0,33	2,04	-	-

Nesta Tabela, observa-se que os resultados da análise dos índices do impacto ambiental ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$) para os trabalhos de Näsholm; Svedberg; Westermark (1993), e Rivero; Hernández (1996), assim como os resultados apresentados por Näsholm; Svedberg; Westermark (1993) (η_{exergT} , η_{energT}) mostram 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) e a menor $R_{pol,t}$ (1,55).

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.

O valor da taxa de poluição total $R_{pol,t}$ (1,55), para o arranjo da planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível foi o mais baixo. Isto é devido a que um combustível (neste caso biomassa), com um teor menor de umidade produz menos perdas exergéticas; a secagem do combustível reduz a exergia necessária para a evaporação da umidade na combustão (na caldeira).

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

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 exergéticos e o parâmetro ambiental analisado por Anaya et al. (1990), para os dois casos da refinaria.

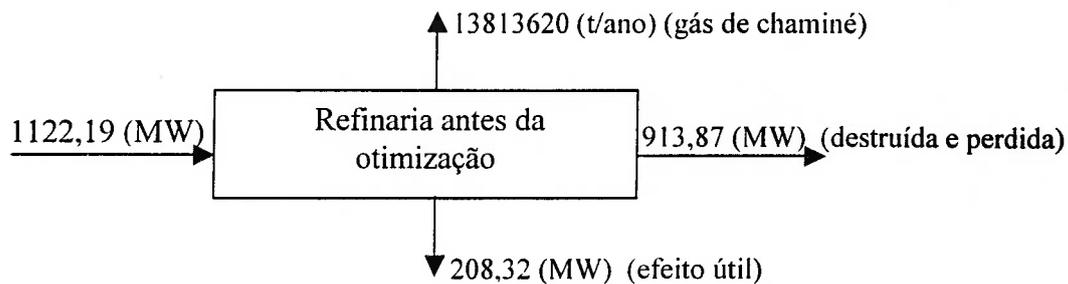


Figura 5.14 Balanço exergético e parâmetro ambiental para o caso da refinaria antes da otimização

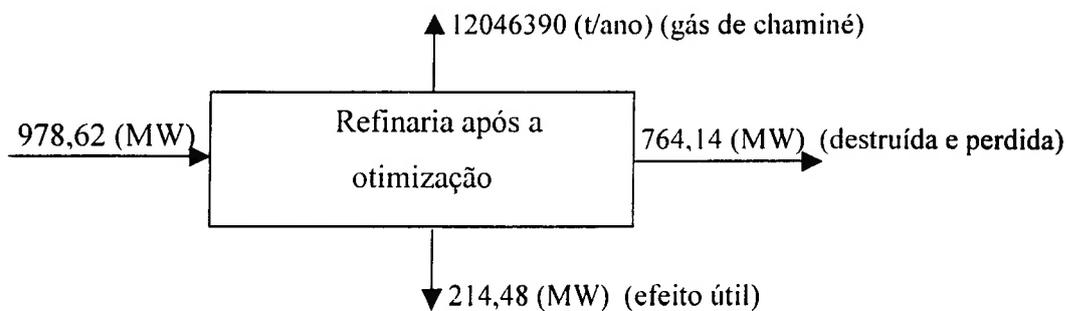


Figura 5.15 Balanço exergético e parâmetro ambiental para a refinaria após a otimização

Com os dados gerados pela análise exergética foram avaliadas a eficiência exergética ambiental e taxa de poluição total. Da análise dos índices do impacto 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) e a menor $R_{pol,t}$ (3,56).

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 exergetica ambiental, da taxa de poluição total e do parâmetro ambiental (emissões ambientais) para os dois casos da refinaria

Refinaria	Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$	Emissões (t/ano)
Refinaria		0,19	4,40	13813620
Refinaria após de ser feita a otimização		0,22	3,56	12046390

Neste estudo de caso, a avaliação do impacto ambiental por meio dos indicadores exergeticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), 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 SPM 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 exergetica. Os balanços de massa e energia para os dois processos são apresentados a seguir nas Fig. 5-16 (a) e (b), respectivamente.

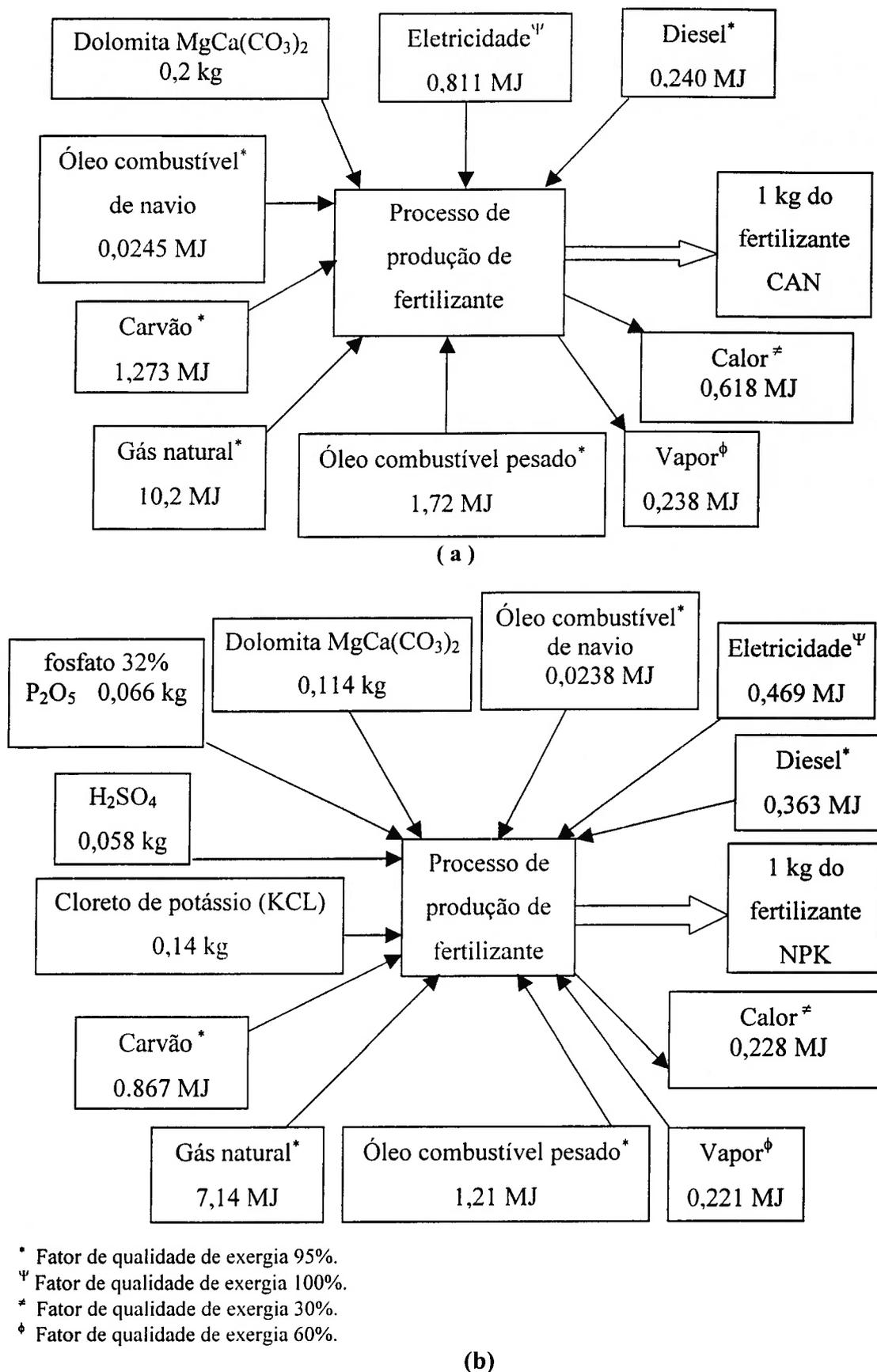


Figura 5.16 Consumo de recursos e energia na produção de: (a) fertilizante CAN e, (b) fertilizante NPK. Fonte: Hovelius; Hansson (1999).

Hoveliuss; 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 Hoveliuss; 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, perdida 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 perdida para dois processos de produção de fertilizantes

Processo	Exergia	Entrada (MJ)	Saída (MJ)	Perdida 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 apresentados os balanços exergéticos dos processos de produção dos fertilizantes CAN e NPK, respectivamente.

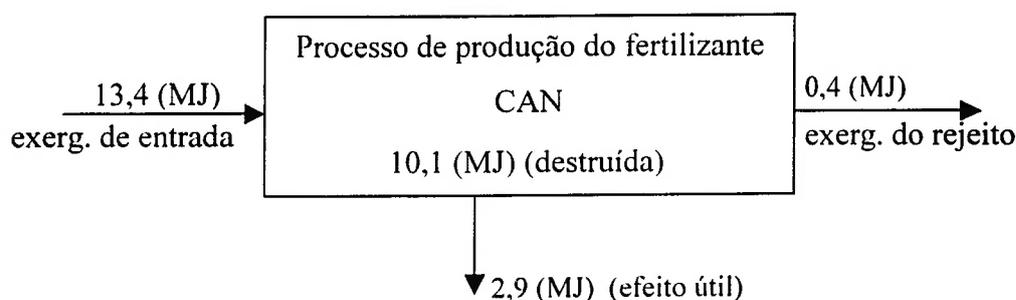


Figura 5.17 Balanço exergético do processo de produção do fertilizante CAN

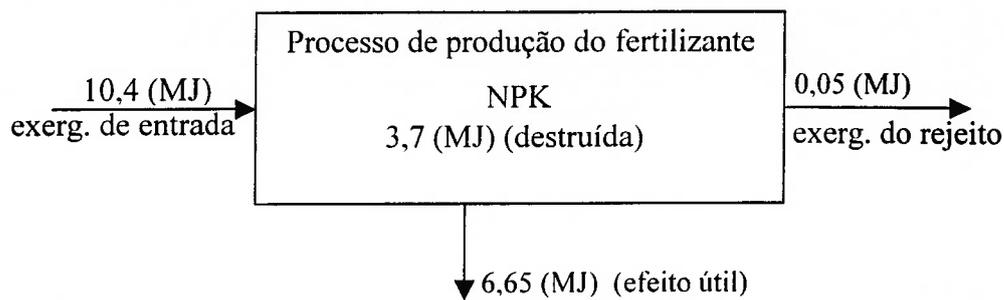


Figura 5.18 Balanço exergético do processo de produção do fertilizante NPK

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 $R_{pol,t}$ (0,56). 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	Índice ambiental	
	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$
Processo de produção de CAN	0,22	3,62
Processo de produção de NPK	0,64	0,56

Os resultados da análise dos índices de impacto ambiental refletem, além do desempenho ambiental dos processos, a caracterização da destruição e perda de exergia. Neste estudo de caso, o processo de produção de fertilizante com a maior perda exergética foi o da produção do fertilizante CAN, com 78 % da entrada exergética total.

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 $18 \text{ m}^3/\text{s}$, no entanto a vazão média de esgoto tratado atualmente é de $11 \text{ m}^3/\text{s}$, 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

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). 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 m³/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 m³/s. O início de operação foi em 11/05/1988, a vazão média de projeto é 9,5 m³/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 m³/s (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, SABESP, 2002).

O processo do Tratamento do Esgoto na ETE Barueri é por lodo 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.

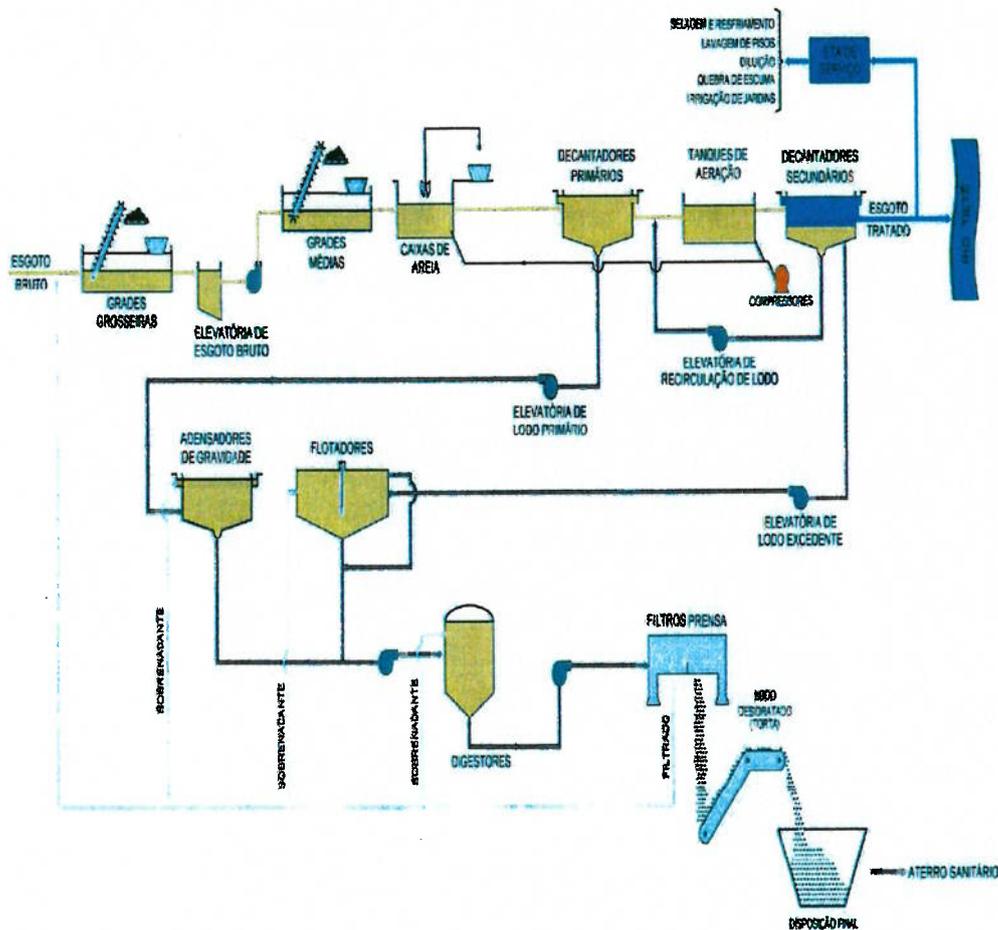


Figura 5.19 Fluxograma do processo da ETE Barueri

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

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

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)		Capacidade		
		<i>DBO</i>	<i>SST</i>	Vazão Esgoto (m ³ /s)	Carga <i>DBO</i> (kg <i>DBO</i> /d)	<i>SST</i> (kg/d)
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.

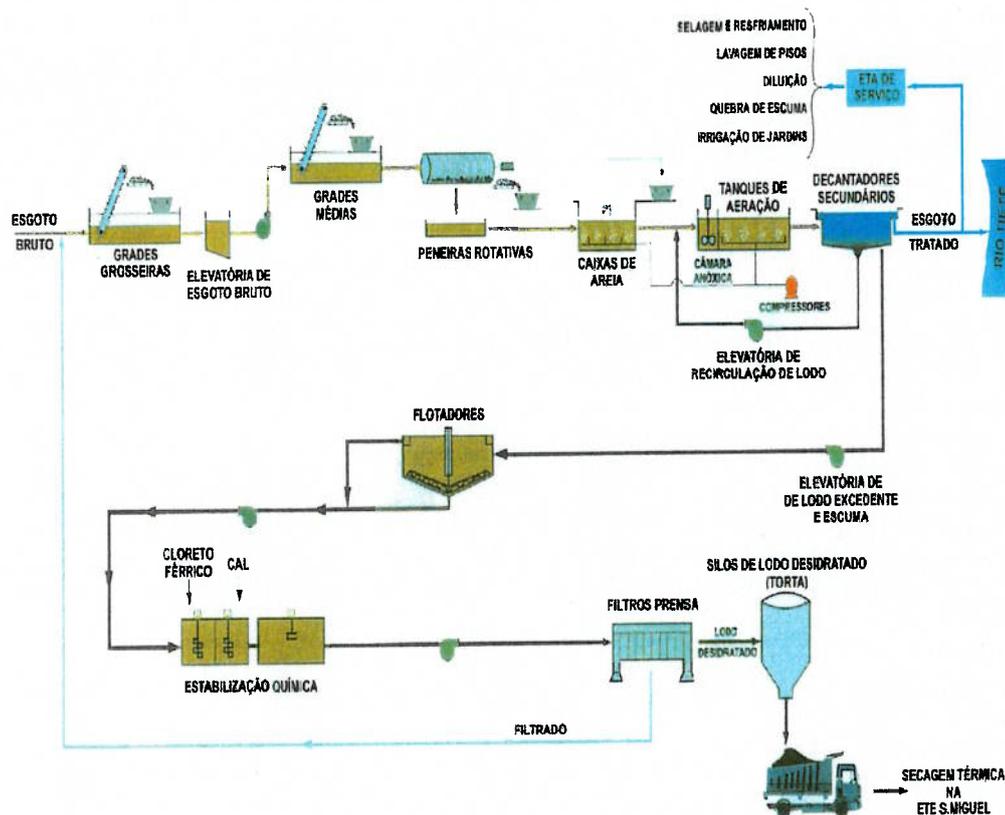


Figura 5.20 Fluxograma do processo da ETE Parque Novo Mundo

5.6.2 Coleta e tratamento dos dados das Estações de Tratamento de Esgoto, ETES

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 exérgica para cada um destes processos. Estes dados são apresentados a seguir:

Coleta de dados da Estação de Tratamento de Esgoto Barueri

Os dados dos principais insumos da ETE Barueri (energia elétrica, água de reúso, 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.

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
<i>DBO</i> (mg/L)	242	15,4
<i>DQO</i> (mg/L)	390	45,7
pH	7,4	7,3
<i>T</i> (°C)	26,6	26,6
<i>SS</i> (mL/L)	4,4	0,2
<i>SST</i> (mg/L)	169	15
<i>SSV</i> (mg/L)	121	11
<i>NTK</i> (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
Merúrio (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 do 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 gradeado (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
Manganês	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
<i>DBO</i> (mol/L)	0,0076	0,0005
<i>DOO</i> (mol/L)	0,0122	0,0014
NH ₃ (mol/L)	0,0015	0,0002
NO ₃ (mol/L)	1,6E-06	1,7E-06
NO ₂ (mol/L)	1,1E-07	2,3E-06
S ₂ (mol/L)	1,6E-05	1,6E-05
SO ₄ (mol/L)	0,0004	0,0003
Cádmio (mol/L)	5,3E-08	5,3E-08
Níquel (mol/L)	6,3E-07	6,6E-07
Prata (mol/L)	1,0E-07	3,7E-08
Zinco (mol/L)	3,6E-06	1,44E-06
Manganês (mol/L)	1,7E-06	1,2E-06
Molibdênio (mol/L)	2,1E-07	2,1E-07
Chumbo (mol/L)	1,7E-07	1,4E-07
Cobre (mol/L)	8,7E-07	4,1E-07
Cromo Total (mol/L)	1,4E-06	3,8E-07
Cromo + 6 (mol/L)	1,9E-07	1,9E-07
Ferro (mol/L)	5,4E-05	8,6E-06
Fenol (mol/L)	3,4E-06	5,1E-07
Fósforo (mol/L)	0,0001	5,8E-05
Surfactantes (mol/L)	0,0004	3,7E-05
Estanho (mol/L)	1,1E-06	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
Manganês	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, FeCl₃, 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)	2130	
	Afluente	Efluente
DBO (mg/L)	115,5	23,5
DQO (mg/L)	291,1	43,5
PH	6,8	6,5
T (°C)	26,2	26,5
SS (mL/L)	2,4	0,4
SST (mg/L)	107	19
SSV (mg/L)	89	15
NTK (mg/L)	16,9	8,1
NH ₃ (mg/L)	13,1	6,1
NO ₃ (mg/L)	0,6	3,7
NO ₂ (mg/L)	0,05	0,37
OG (mg/L)	39,5	8,9
S ₂ (mg/L)	1,1	< 0,6
SO ₄ (mg/L)	47,2	44,2
Cádmio (mg/L)	< 0,01	< 0,01
Merúrio (µg/L)	5,5	2,7
Níquel (mg/L)	0,13	0,15
Prata (mg/L)	< 0,02	< 0,02
Zinco (mg/L)	0,2	0,1
Manganês (mg/L)	0,1	0,1
Boro (mg/L)	-	-
Selênio (µg/L)	< 0,7	< 0,5
Chumbo (mg/L)	< 0,1	< 0,1
Cobre (mg/L)	0,11	0,03
Cromo Total (mg/L)	0,09	< 0,07
Cromo + 6 (mg/L)	0,007	0,006
Ferro (mg/L)	2,2	0,5
Fenol (mg/L)	0,17	0,12
Fósforo (mg/L)	3,3	1,3
Surfactantes (mg/L)	4,9	0,1
Estanho (mg/L)	< 0,48	< 0,48
Coliformes totais (NMP)	2,3 . 10 ⁹	1,8 . 10 ⁶
E. Coli (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 peneirado (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
Manganês (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
<i>DBO</i> (mol/L)	0,0040	0,0007
<i>DOO</i> (mol/L)	0,0091	0,0014
NH ₃ (mol/L)	0,0008	0,0004
NO ₃ (mol/L)	9,2E-06	5,9E-05
NO ₂ (mol/L)	1,0E-06	8,0E-06
S ₂ (mol/L)	1,7E-05	8,7E-06
SO ₄ (mol/L)	0,0005	0,0005
Cádmio (mol/L)	7,1E-08	7,1E-08
Merúrio (mol/L)	2,7E-08	1,4E-08
Níquel (mol/L)	2,3E-06	2,5E-06
Prata (mol/L)	1,7E-07	1,7E-07
Zinco (mol/L)	3,7E-06	1,8E-06
Manganês (mol/L)	2,3E-06	1,8E-06
Selênio (mol/L)	8,5E-09	6,3E-09
Chumbo (mol/L)	3,9E-07	3,9E-07
Cobre (mol/L)	1,7E-06	4,7E-07
Cromo Total (mol/L)	1,7E-06	1,3E-06
Cromo + 6 (mol/L)	1,3E-07	1,1E-07
Ferro (mol/L)	3,9E-05	8,8E-06
Fenol (mol/L)	1,8E-06	1,3E-06
Fósforo (mol/L)	0,0001	4,1E-05
Surfactantes (mol/L)	0,0001	3,7E-06
Estanho (mol/L)	4,0E-06	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
Manganês	0,0050
Ferro	0,8375
Níquel	0,0015
Zinco	0,0123
Prata	9,5E-05
Molibdênio	0,0001
Arsênio	0,0001
Cobalto	0,0001
Mercúrio	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 exergética 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 exergéticos 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 kg/L e 0,011 kg/L respectivamente;
 - Densidade do esgoto bruto afluente e efluente final da ETE PNM = 0,107 kg/L e 0,02 kg/L respectivamente.
 - $R = 8,314 \text{ kJ/kmol K}$
- ix. Conforme apresentado no item 3.8, a equação do balanço exergético aplicada para este estudo de caso ficou como segue: $(\sum \text{fluxos exergéticos de entrada} - \sum \text{fluxos exergéticos de saída}) = (\sum \text{fluxos de exergia perdida}) + (\text{exergia destruída})$.
Para a ETE Barueri, os fluxos exergéticos 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 reúso. O fluxo exergético 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 exergética 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 exergéticos 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 $T_n = 298,15 \text{ K}$, $P_n = 101.325 \text{ kPa}$ (Szargut, 1988).

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

Compostos Nitrogenados	$b^{\circ}_{qui}*(kJ/g)$	Metais	$b^{\circ}_{qui}*(kJ/g)$
Amônia, NH ₃	19,8	Prata, Ag	0,6
Nitrato, NO ₃	0,4	Zinco, Zn	5,2
Nitrito, NO ₂	1,2	Manganês, Mn	8,8
Compostos Inorg.		Molibdênio, Mo	7,6
Arsênico, As	6,6	Selênio, Se	4,4
Cal, Cão	2,0	Chumbo, Pb	1,1
Cloreto Férrico, FeCl ₃	1,4	Cobre, Cu	2,1
Cobalto, Co	4,5	Cromo, Cr	10,5
Água, H ₂ O	0,05	Ferro, Fé	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
Metais		Fósforo, P	28,1
Cádmio, Cd	2,6	Metano, CH ₄	51,8
Mercúrio, 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	$b^{\circ}_{qui}*(kJ/mol)$	Metais	$b^{\circ}_{qui}*(kJ/mol)$
Amônia, NH ₃	337,9	Prata, Ag	70,2
Nitrato, NO ₃	22,3	Zinco, Zn	339,2
Nitrito, NO ₂	55,6	Manganês, Mn	482,3
Compostos Inorg.		Molibdênio, Mo	730,3
Arsênico, As	494,6	Selênio, Se	346,5
Cal, Cão	110,2	Chumbo, Pb	232,8
Cloreto Férrico, 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
Metais		Fósforo, P	869,7
Cádmio, Cd	293,5	Metano, CH ₄	831,6
Mercúrio, Hg	115,9	Surfactante, NaOH	74,9
Níquel, Ni	232,7		

Análise Exergética da ETE Barueri

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
<i>DBO</i>	22,0	-0,0854*
<i>DQO</i>	109,9	13,9
NH ₃	237,7	40,9
NO ₃	-1E-06*	3,3E-05
NO ₂	9,0E-08	0,0005
S ₂	0,1	0,8
SO ₄	9,6	34,9
Cádmio	2,2E-07	2,0E-06
Níquel	2,5E-05	0,0002
Prata	1,2E-07	1,6E-07
Zinco	0,0012	0,0017
Manganês	0,0004	0,0017
Molibdênio	9,1E-06	8,2E-05
Chumbo	1,7E-06	1,2E-05
Cobre	2,4E-05	5,0E-05
Cromo	0,0003	0,0003
Ferro	0,3	0,7
Fenol	0,011	0,002
Fósforo	3,9	7,7
Surfactantes	3,5	0,2
Estanho	0,0002	0,002
TOTAL	387,1	98,4

* Os valores negativos das exergias são devidos a arredondamento

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 exergéticos dos compostos químicos (FeCl_3 e Polímeros), 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
Polímeros	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 calculo 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)

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

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

Análise exergética da ETE Parque Novo Mundo (PNM)

Os fluxos de exergia associados ao esgoto bruto (afluente) e ao efluente final da Estação de Tratamento Parque Novo Mundo, 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 = 0,107 kg/L;
- Densidade do efluente final = 0,02 kg/L.

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)

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
Mercúrio	9,2E-09	1,1E-08
Níquel	0,0002	0,0010
Prata	1,7E-07	8,9E-07
Zinco	0,0006	0,0007
Manganês	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 (FeCl₃ e CaO) representam a exergia da desativação dos rejeitos, que neste caso é o lodo, que é estabilizado quimicamente por meio destes compostos.

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

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

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 simplificadora:

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

No calculo 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 Tabela 5-37.

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

Componentes	Fluxos de exergia (kW)
Cádmio	4,2E-07
Chumbo	1,4E-05
Cobre	0,0001
Cromo	0,0042
Manganês	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
Mercúrio	6,6E-16
Selênio	5,8E-15
TOTAL	108,9

Nas Figuras 5-21 e 5-22, são apresentados os balanços exerгéticos das ETEs PNM e Barueri.

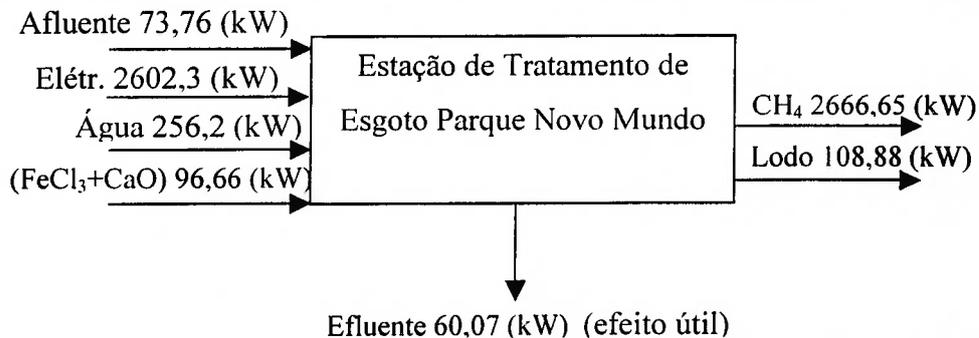


Figura 5.21 Balanço exerгético da ETE Parque Novo Mundo.

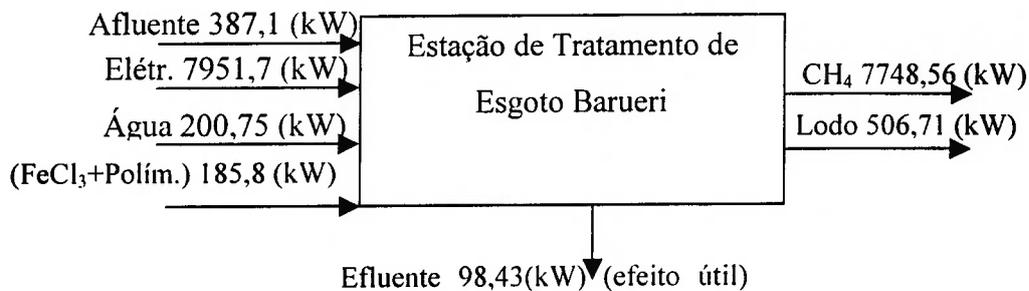


Figura 5.22 Balanço exerгético da ETE Barueri.

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

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

Fluxo de Exergia	Entrada (kW)	Saída (kW)	Destruída e perdida (kW)
Processo			
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	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,total}$
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 exergia líquida de entrada nas ETes Barueri e PNM respectivamente.

Outro termo importante no cálculo dos indicadores exergeticos é a exergia associada aos rejeitos dos processos (gás produzido e lodo desidratado). Se esta exergia fosse 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 0,02 e 0,34, respectivamente. Estes valores são apresentados na Tabela 5-40.

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

Processo	Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,total}$
Estação de Tratamento de Esgoto Parque Novo Mundo		0,97	0,34
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri		0,98	0,02

Ao serem 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 exérgico 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 exérgica relacionada aos compostos químicos utilizados na desativação dos rejeitos (estabilização química do lodo).

Foi concluído que a análise exérgica 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 exergia no cálculo do consumo dos recursos físicos, melhora a qualidade dos dados necessários para a análise de ciclo de vida.

O consumo elevado de exergia em unidades de lodos ativados é devida à aeração e mistura, na ETE Barueri o consumo de oxigênio foi 34,1 % do fluxo de exergia associado ao esgoto bruto afluente e para a ETE PNM foi 49,2 %. Deve ser notado que as perdas exérgicas 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 exérgico : no caso da ETE Barueri foram 62,4 % do fluxo de exergia associado ao esgoto bruto afluente e 49,4 % do fluxo exérgico do efluente final. Para a ETE PNM foram 41,8 % do fluxo exérgico associado ao esgoto bruto afluente e 51,1 % do fluxo exérgico 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 exergia. 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 exergia devido aos nutrientes é usado. Deve-se lembrar que a exergia 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, está 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.

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

Índice ambiental	$\eta_{exerg,amb}$	$R_{pol,t}$
Processo		
Processo de produção de cloro	0,43	1,34
Processo de produção de PVC	0,56	0,78
Processo de produção de aço do alto forno tradicional sem injeção de carvão pulverizado	0,42	1,40
Processo de produção de aço do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado	0,5	1,0
Processo de produção de aço convencional integrado	0,38	1,61
Processo de produção de aço Semi-integrado	0,67	0,50
Processo de produção de aço Novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio	0,51	0,97
Processo de produção de aço novo integrado com fundição reduzida e forno de arco elétrico	0,43	1,32
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível	0,39	1,55
Planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível	0,38	1,62
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	0,30	2,34
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	0,29	2,45
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo	0,33	2,04
Refinaria de petróleo	0,19	4,40
Refinaria após de ser feita a otimização	0,22	3,56
Processo de produção de CAN	0,22	3,62
Processo de produção de NPK	0,64	0,56

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	0,34
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri (considerando o metano e o lodo da ETE como efeito útil)	0,98	0,02

Ao fazer uma comparação global dos resultados obtidos por meio do cálculo dos índices de impacto ambiental ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), (ver Tabela 6-1), observa-se que 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 a menor $R_{pol,t}$ (0,50). Nesta comparação também é observado que de acordo com os valores de $\eta_{exerg,amb}$, (0,01), e $R_{pol,t}$ (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 ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$) 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) e a menor $R_{pol,t}$ (0,78). Para o estudo de caso 5.5 observou-se que o processo que causa o menor impacto no ambiente é o processo de produção do fertilizante NPK, já que teve a maior $\eta_{exerg,amb}$ (0,64) e a menor $R_{pol,t}$ (0,56).

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 ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), 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 $\eta_{exerg,amb}$ (0,5), a menor $R_{pol,t}$ (1,0), a menor exergia destruída e perdida (8,0 GJ/thm) e a menor emissão de CO₂ (479,2 kg-c/thm). É importante esclarecer que o efeito da injeção do carvão pulverizado foi incluído no cálculo dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$). No caso do cálculo da taxa de poluição total, essa injeção de carvão representa a parcela da exergia destruída na diminuição das emissões de CO₂.

Na comparação dos quatro processos de produção de aço (estudo de caso 5.2.2), os resultados da análise dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$) estiveram de acordo com os apresentados por Costa; Schaeffer; Worrell (2001) (η_{exerg} , *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 $\eta_{exerg,amb}$ (0,67), a menor $R_{pol,t}$ (0,50), a maior η_{exerg} (0,67) 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.

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 (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 $\eta_{exerg,amb}$ (0,67), a menor $R_{pol,t}$ (0,50). Os valores dos indicadores exergéticos obtidos para o processo do alto forno tradicional com injeção de 110 kg de carvão pulverizado, foram muito próximos aos obtidos para o processo novo integrado com fundição reduzida e forno básico de oxigênio.

Na comparação dos arranjos da planta de cogeração da indústria de celulose e papel, com uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo (estudo de caso 5.3), os resultados da análise dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$) estiveram de acordo com os apresentados por Näsholm; Svedberg; Westermarck (1993) (η_{exergT} , η_{energT}), 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 $\eta_{exerg,amb}$ (0,392), a menor $R_{pol,t}$ (1,55), a maior η_{exergT} (0,392) e a menor η_{energT} (0,723). 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 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 ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), 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), a menor $R_{pol,t}$ (3,56) e uma redução nas emissões dos gases de chaminé, que corresponde a 12,8% da emissão total da refinaria na operação real.

No caso das Estações de Tratamento de Esgoto, ETEs, Os resultados dos indicadores exergéticos ($\eta_{exerg,amb}$, $R_{pol,t}$), 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 $R_{pol,t}$ (47,8).

Os baixos valores obtidos da eficiência exergética ambiental ($\eta_{exerg,amb}$) para as duas ETEs, devem-se principalmente ao elevado consumo de eletricidade para o pequeno produto gerado, além da grande quantidade de metano e lodo desperdiçada. O

consumo de energia elétrica representa a maior percentagem do fluxo de exergia 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 exergética ambiental das ETEs, é que a exergia contida nos subprodutos gerados (metano e o lodo) no momento não está sendo aproveitada. Se essa exergia 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 ($R_{pol,t}$) para este caso seriam 0,02 e 0,34, respectivamente. 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 exergia contida em sua carga poluidora.

Concluiu-se que as análises exergéticas 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 exergéticos do impacto ambiental para os estudos de caso analisados, pode ser observado que apesar do conceito de exergia 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 exergia no ambiente ($R_{pol,t}$).

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 ETE por meio do interceptor Tietê Oeste Margem Sul (ITI-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 caçamba 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 residuária é recalcada 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.

Está 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.

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 desidratação 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 retido 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 aeração e compressores: o esgoto decantado é conduzido a tanques de aeração de forma retangular com 130 m de comprimento, 25 m de largura e 6 m de altura útil. Os oito tanques de aeração 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 afluem ao tanque de aeração 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 situados na extremidade de jusante.

O suprimento de ar para os tanques de aeração 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 aeração 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 aeração 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 espuma.

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 descarte 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 encaminhado 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 cloreto férrico (aplicação entre 3% e 5% em base seca). O lodo segue ao tanque de lodo condicionado (tanque 16), é bombeado pôr 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 zooglías 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

Acesso em : 18 de ago. 2003.

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 floco 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 floco do 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 floco 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 ciliados, 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.

Micrometazoários

São pequenos animais, ou seja, não são unicelulares. Têm uma organização complexa, com aparelhos como o digestivo, o reprodutor etc. Entre os micrometazoários do lodo ativado os rotíferos são os mais comumente encontrados. Alimentam-se de protozoários e bactérias que formam o floco, 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 Sônia.

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 á 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 desarenação 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 aeração: os tanques de aeração são do modelo “ASMODEL – Activated Sludge Model” da WCR – Water Reserch Centre, do tipo fluxo pistão (*plug-flow*). O processo de tratamento é do tipo lodos ativados com alimentação escalonada (“*step-feed*”). Este processo é precedido por um seletor biológico (câmara anóxica, que neste momento não está funcionando) 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 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 espuma. 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 espuma 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 = $156 \text{ l}/\text{s}$.
- Vazão máxima = $828 \text{ l}/\text{s}$.
- Bombas de excesso de espuma = 2 em cada elevatória
- Vazão = $82,5 \text{ l}/\text{s}$ ($297 \text{ m}^3/\text{h}$) 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 da entrada em operação de um sistema de dosagem de polímeros, visando aumentar a eficiência do sistema. As características destes flotores são: diâmetro 28 m, lâmina 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/tST, 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 lâmina 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, flotores 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, lagoa, 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), cloretos, 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 microorganismos 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 (CO₂). 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 CO₂ (oxidação da matéria carbonácea) e posteriormente transformam os compostos nitrogenados em nitritos-NO₂ e em nitratos-NO₃, (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.

O teste da *DQO* baseia-se no fato de que todos os compostos orgânicos, com poucas exceções, podem ser oxidados pela ação de um agente oxidante forte em meio ácido. 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* deverá 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 íons 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 nitrito 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 conseqüências 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 (NO_3): como citado anteriormente, o nitrogênio sob forma de amônia, se transforma com o tempo, dependendo das condições física e química do meio aquático, em nitrito 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.

i) Coliformes Fecais (COLI.F): 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 idéia, 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 gêneros 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 carbônico 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 bênticas.

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

Destinação de uso	CONAMA 20	Decreto 8468/76
Abastecimento doméstico sem prévio tratamento ou com simples desinfecção	Especial	Classe 1
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas		-----
Abastecimento doméstico com tratamento simplificado	Classe 1	-----
Proteção de comunidades aquáticas		-----
Aqüicultura		-----
Recreação de contato primário		
Irrigação de hortaliças e frutas consumidas cruas	Classe 2	Classe 2
Abastecimento doméstico após tratamento convencional		
Recreação de contato primário		
Irrigação de hortaliças e frutas		
Proteção de comunidades aquáticas	Classe 3	
Aqüicultura		
Abastecimento doméstico após tratamento convencional		
Dessedentação de animais	Classe 3	
Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras		
Navegação	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
Óleos e graxas		Ausentes	Ausente	Ausentes	Iridiscência
Odor e gosto		Ausentes	Ausente	Ausentes	NE
Corantes		Ausentes	Removí	Removív	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	0,00001	0,00001	0,00001	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	0,1	0,5	NE
Hg	mg/L	0,0002	0,0002	0,002	NE
Ni	mg/L	0,025	0,025	0,025	NE
NO ₃	mg/L	10	10	10	NE
NO ₂	mg/L	1	1	1	NE
Ag	mg/L	0,01	0,01	0,05	NE
Pentaclorofenol	mg/L	0,01	0,01	0,01	NE
Se	mg/L	0,01	0,01	0,01	NE
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	500	500	500	NE
Substâncias tensoativas	mg/L	0,5	0,5	0,5	NE
SO ₄	mg/L	250	250	250	NE
S ⁻²	mg/L	0,002	0,002	0,3	NE
Tetracloroeteno	mg/L	0,01	0,01	0,01	NE
Tricloroeteno	mg/L	0,03	0,03	0,03	NE
Tetracloroeto de carbono	mg/L	0,003	0,003	0,003	NE
2,4,6 triclorofenol	mg/L	0,01	0,01	0,01	NE
U	mg/L	0,02	0,02	0,02	NE
V	mg/L	0,1	0,1	0,1	NE
Zn	mg/L	0,18	0,18	5	NE
Aldrin	µg/L	0,01	0,01	0,03	NE
Clordano	µg/L	0,04	0,04	0,3	NE
DDT	µg/L	0,002	0,002	1	NE
Dieldrin	µg/L	0,005	0,005	0,03	NE
Endrin	µg/L	0,004	0,004	0,2	NE
Endossulfan	µg/L	0,056	0,056	150	NE
Epóxido de heptacloro	µg/L	0,01	0,01	0,1	NE
Heptacloro	µg/L	0,01	0,01	0,1	NE
Lindano (gama-BHC)	µg/L	0,02	0,02	3	NE
Metoxicloro	µg/L	0,03	0,03	30	NE
Dodecacloro + nonacloro	µg/L	0,001	0,001	0,01	NE
PCB	µg/L	0,001	0,001	0,001	NE
Toxafeno	µg/L	0,01	0,01	5	NE
Demeton	µg/L	0,1	0,1	14	NE
Gution	µg/L	0,005	0,005	0,005	NE
Malation	µg/L	0,1	0,1	100	NE
Paration	µg/L	0,04	0,04	35	NE
Carbaril	µg/L	0,02	0,02	70	NE
Organofosforados e carbamatos	µg/L	10	10	100	NE
2,4 D	µg/L	4	4	20	NE
2,4,5 TP	µg/L	10	10	10	NE
2,4,5 T	µg/L	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
Óleos e graxas		Ausentes	Ausentes	Iridiscência
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 _{media}	< 1,5* Q _{media}
Temperatura	°C	40	40
PH		5 a 9	5 a 9
Materiais flutuantes	-----	Ausentes	Ausentes
Óleos vegetais e gorduras animais	mg/L	50	----
Óleos 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	---
Tricloroeteno	mg/L	1	----
Clorofórmio	mg/L	1	----
Dicloroeteno	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 afluyente da ETE
Parque Novo Mundo

Espécie química	Afluyente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$ (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
DQO	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
Manganê	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
Mercúrio	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 exergético associado à vazão efluente da ETE
Parque Novo Mundo**

Espécie química	Efluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$ (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
Manganês	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
Mercúrio	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 exergético associado à vazão afluente da ETE Barueri

Espécie química	Afluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$ (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
Manganês	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 exergético associado à vazão efluente da ETE Barueri

Espécie química	Efluente (mol/L)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$ (kJ/mol)	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
Manganês	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 exerético associado ao lodo desidratado produzido na ETE Parque Novo Mundo

Espécie química	Lodo gerado (mol/kg)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$ (kJ/mol)	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/kg)
Cádmio	6,1E-05	7,08E-05	293,5	0,02078	-0,00168	0,01910	1,2E-06
Níquel	1,5E-03	1,74E-03	232,7	0,40616	-0,02748	0,37868	0,00057
Prata	9,5E-05	1,10E-04	70,2	0,00770	-0,00248	0,00522	5,0E-07
Zinco	1,2E-02	1,42E-02	339,2	4,81027	-0,1496	4,66066	0,05723
Mangan.	4,8E-03	5,55E-03	482,3	2,67611	-0,07144	2,60467	0,01251
Selênio	6,8E-09	7,90E-09	346,5	0,000003	-3,7E-07	2,37E-06	1,6E-14
Chumbo	4,0E-04	4,59E-04	232,8	0,10686	-0,00875	0,09811	3,9E-05
Cobre	4,4E-03	5,13E-03	134,2	0,68846	-0,06705	0,62140	0,00276
Cromo	4,4E-03	5,05E-03	544,3	2,74794	-0,06618	2,68175	0,01172
Molibd.	1,5E-04	1,78E-04	730,3	0,13011	-0,00381	0,12629	1,9E-05
Ferro	8,4E-01	9,67E-01	376,4	364,069	-0,07986	363,989	304,848
Arsênio	1,4E-04	1,64E-04	494,6	0,08135	-0,00355	0,07779	1,1E-05
Cobalto	1,1E-04	1,23E-04	265	0,03272	-0,00275	0,02996	3,2E-06
Mercúrio	4,8E-09	5,58E-09	115,9	0,000001	-2,6E-07	3,84E-07	1,8E-15
TOTAL	0,86588	1		375,7777	-0,48464	375,293	304,933

Tabela F-6 Cálculo do fluxo exergetico associado ao lodo desidratado produzido na ETE Barueri

Espécie química	Lodo gerado (mol/kg)	x_i (mol/mol)	Exergia química específica (kJ/mol)	$\sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) n_i$ (kJ/mol)	$RT_0 \sum_i n_i \ln(a_i)$ (kJ/mol)	Exergia química molar total (kJ/mol)	Exergia química específica (kJ/kg)
Cádmio	0,00011	0,00017	293,5	0,051531	-0,00376	0,0477	5,4E-06
Níquel	0,00480	0,00748	232,7	1,740924	-0,09078	1,6501	0,00793
Prata	0,00059	0,00091	70,2	0,064194	-0,01586	0,0483	2,8E-05
Zinco	0,03183	0,04958	339,2	16,81883	-0,36923	16,449	0,52366
Manganês	0,00443	0,00691	482,3	3,331902	-0,08520	3,2467	0,01440
Chumbo	0,00079	0,00123	232,8	0,286437	-0,02044	0,2660	0,00021
Cobre	0,00871	0,01357	134,2	1,821389	-0,14466	1,6767	0,01461
Cromo	0,00899	0,01399	544,3	7,619711	-0,14813	7,4716	0,06715
Molibdênio	0,00016	0,00024	730,3	0,177844	-0,00502	0,1728	2,7E-05
Ferro	0,58161	0,90589	376,4	340,9774	-0,22194	340,75	198,186
TOTAL	0,64203	1		372,8902	-1,10502	371,78	198,814

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. ; WORRELL, 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/eei.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**. 2000. São Paulo, 2000. 259p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HOVELIUS, K. ; HANSSON, P. 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-Sofi 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 : EPUSP/PME, 1996. Notas de aula.

PETELA, 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.

PHYLIPSEN, 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 refinería, 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. Zaragoza. Disponível 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 1: 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/wwweibull/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.