

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

WENDELL DE QUEIRÓZ LAMAS

ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE UMA MINI-ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ESGOTO COM AUTO-SUFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
do Campus de Guaratinguetá, Universidade  
Estadual Paulista, para a obtenção do título  
de Doutor em Engenharia Mecânica na área  
de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Co-orientador: Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia

Guaratinguetá  
2007

Lamas, Wendell de Queiróz

L21            Análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto  
7a            com auto-suficiência energética / Wendell de Queiróz Lamas.-  
Guaratinguetá : [s.n.], 2007

135 f.: il.

Bibliografia: f. 126-135

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Guaratinguetá, 2007

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Energia – Fontes alternativas I. Título

CDU 628.31

UNESP  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE UMA MINIESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO COM AUTO-SUFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

***WENDELL DE QUEIRÓZ LAMAS***

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE  
ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira  
Coordenador

***BANCA EXAMINADORA:***

Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA  
Orientador / UNESP-FEG

Prof. Dr. JOAQUIM ANTÔNIO DOS REIS  
UNESP-FEG

Prof. Dr. LUIZ OCTÁVIO MATTOS DOS REIS  
UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO  
UNITAU

Prof. Dr. SEBASTIÃO CARDOSO  
UNITAU

Prof. Dr. GIORGIO EUGENIO OSCARE GIACAGLIA  
Co-Orientador / UNITAU (Membro Convidado)

Novembro de 2007

**DADOS CURRICULARES**  
**WENDELL DE QUEIRÓZ LAMAS**

NASCIMENTO	31.12.1968 – RIO DE JANEIRO / RJ
FILIAÇÃO	Hélio da Silveira Lamas Bernadete de Queiróz Lamas
1987/1989	Curso de Graduação Tecnologia em Técnicas Digitais, na Universidade Estácio de Sá (UNESA)
2001/2004	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Universidade de Taubaté (UNITAU)
2004/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (UNESP)

de modo especial, aos meus pais *Hélio e Bernadete*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos, e à minha noiva Miwa, por sua compreensão sobre minha ausência e seu apoio.

em saudososa memória de Alceu Lamas (1918-2006), que incentivou os meus primeiros passos em direção ao convívio com a tecnologia e a pesquisa científica.



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Luz Silveira* que jamais deixou de me incentivar.

Cuja orientação, dedicação e auxílio, foram cruciais para que o estudo aqui apresentado fosse possível;

aos amigos *Prof. Dr. Giorgio Eugenio Oscare Giacaglia*, *Prof. Dr. Luiz Octávio Mattos dos Reis* e *Prof. Dr. Ronaldo Rossi* que desde o mestrado têm me incentivado e orientado no bom caminho da pesquisa científica;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar, especialmente a *Ana Maria Ramos Antunes* e a *Grácia Luiza Novais da Silva*, sempre prestativas em suas orientações quanto à utilização do acervo e ao acesso ao portal de periódicos da CAPES, além da elaboração da ficha catalográfica deste trabalho;

às secretárias e ao secretário da pós-graduação *Elisa Mara Carvalho Nunes*, *Maria Cristina Silva de Oliva*, *Regina Célia Galvão Faria Alves* e *Sidney Eustaquio Ramos Rabelo* pela dedicação e alegria no atendimento;

aos professores *Dr. José Antônio Perrella Balestieri*, *Dr. Victor Orlando Gamarra Rosado*, *Dr. Pedro Magalhães Sobrinho* e *Dra. Cassilda Maria Ribeiro* por seu constante incentivo e por compartilhar seu conhecimento;

ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté que possibilitou o uso de recursos dessa instituição, principalmente o acesso à Rede FAPESP e à Biblioteca do Campus da Juta;

à Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, que possibilitou, por meio dos seus recursos disponíveis, a execução desse projeto.

Este trabalho contou com apoio do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico por meio de Bolsa de Doutorado, processo número 142211/2005-2.

“Há três maneiras de agir sabiamente:  
a primeira pela meditação, que é a mais sábia;  
a segunda pela imitação, que é a mais fácil;  
a terceira pela experiência, que é a mais amarga”

Confúcio

LAMAS, W. Q. **Análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética.** 2007. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

## **RESUMO**

Neste trabalho é desenvolvida uma metodologia para a alocação dos custos dos produtos gerados por uma mini-estação de tratamento de esgotos, com vistas a realizar a análise da viabilidade econômica do investimento necessário para a sua implantação, inclusive caracterizando-a como a melhor escolha a ser adotada na solução de saneamento básico em zonas rurais e em regiões de limitado poder aquisitivo, além de que tem potencial energético face à sua capacidade de transformar em eletricidade a energia contida no biogás gerado. Essa metodologia é aplicada ao sistema instalado no campus de Guaratinguetá da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, tendo sido estabelecidas as condições iniciais a partir da realidade vivida no campus e sendo relacionadas as características termodinâmicas do sistema, a partir do seu diagrama de processo. As características associadas ao diagrama de processo possibilitam construir o diagrama funcional termoeconômico do sistema e determinar as equações referentes às funções exergéticas desse sistema e os respectivos valores das exergias associados. Após esses cálculos, elabora-se um modelo estrutural para avaliar os custos de seus produtos (biogás, biofertilizante, água em condições de re-uso e energia elétrica) e avaliar a viabilidade econômica em função do retorno de capital investido. A seguir, a mesma metodologia é aplicada a um sistema comercialmente disponível, com características de tratamento muito próximas às da mini-ETE. A partir dos resultados obtidos, é possível verificar que a mini-estação de tratamento de esgoto é uma alternativa viável e muito atraente sobre o ponto de vista técnico-econômico, pois além de apresentar auto-suficiência energética, possui um retorno de investimento de aproximadamente um terço do tempo do sistema comercialmente disponível com características semelhantes para tratamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alocação de custos; análise termoeconômica; biogás; exergia; fontes alternativas de energia; tratamento de esgoto.

LAMAS, W. Q. **Thermoeconomic analysis of a small wastewater treatment station with energetic self-sufficiency**. 2007. 135 p. Thesis (Dr. in Mechanical Engineering) – Faculty of Engineering, Campus of Guaratingueta, Sao Paulo State University, Guaratingueta, 2007.

## **ABSTRACT**

In this work a methodology that allows for the allocation of costs of the generated products for a small wastewater treatment station is developed, and used to perform an analysis of its economic feasibility, to justify the investment, beside its characterization as one of the best choice to be adopted as a basic sanitation solution in rural areas, and in areas characterized by low income population, together with a major energy potential because of its capability to transform the generated biogas into electric energy. For this purpose, the methodology is applied to a system established at Guaratingueta Campus, School of Engineering, Sao Paulo State University. After establishing initial conditions based on site evaluation, the thermodynamics features of the system are related based on its process diagram. Such features, associated to process diagram, make it possible to build the thermoeconomic functional diagram for the system under analysis and, after words, the equations related to exergetic functions for the system are determined and the exergy values are calculated. After these calculations, a structural model is developed, in order to provide its products costs (biogas, biofertilizer, water in reuse conditions and electric energy). The economic viability is evaluated as a function of the estimated return on investment. The same methodology is then applied to a commercially available system, with characteristics close to a small wastewater treatment station. Based on the results of this work it is possible to verify that the small wastewater treatment station is a viable and attractive alternative in the technical and economic point of view, showing self-sufficiency in energy, and a pay-back period about one-third of estimated time of the commercial system referred to with similar features.

**KEYWORDS:** Cost allocation; thermoeconomic analysis; biogas; exergy; alternative energy sources; wastewater treatment.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xviii
LISTA DE TABELAS .....	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xxii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xxiv
<b>1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>30</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	30
1.2 OBJETIVOS .....	34
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	35
1.4 METODOLOGIA .....	45
<b>2 PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO .....</b>	<b>47</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	47
2.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO .....	48
2.2.1 Níveis de tratamento .....	49
2.2.2 Tratamento do lodo .....	58
2.3 CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO E DO SEU PROCESSO DE TRATAMENTO .....	59
2.3.1 Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) .....	59
2.3.2 Demanda química de oxigênio (DQO) .....	60
2.3.3 Tempo de retenção hidráulica (tr) .....	60
2.3.4 Aeração .....	61
2.3.5 Oxigênio dissolvido (OD) .....	62



2.3.6	<b>Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico (pH)</b> .....	62
2.3.7	<b>Turbidez</b> .....	62
2.3.8	<b>Total de sólidos dissolvidos (TSD)</b> .....	63
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DO CUSTO DE TRATAMENTO DE ESGOTO BASEADA NA UTILIZAÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL</b> .....	<b>64</b>
3.1	IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA .....	64
3.2	CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMOECONÔMICO .....	68
3.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO .....	69
3.3.1	<b>Determinação das expressões para as funções exergéticas (restrições)</b> ...	70
3.3.2	<b>Determinação das equações matemáticas dos custos dos produtos associados</b> .....	71
3.3.3	<b>Cálculo dos custos associados ao sistema BGM</b> .....	73
3.3.4	<b>Estudo da viabilidade econômica</b> .....	77
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA À MINI-ETE</b> .....	<b>80</b>
4.1	IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA .....	80
4.2	CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMOECONÔMICO .....	83
4.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO .....	85
4.3.1	<b>Determinação das expressões para as funções exergéticas (restrições)</b> ...	85
4.3.2	<b>Determinação das equações matemáticas dos custos dos produtos associados</b> .....	88
4.3.3	<b>Cálculo dos custos associados à mini-ETE</b> .....	90

4.3.4	<b>Estudo da viabilidade econômica</b> .....	95
<b>5</b>	<b>ANÁLISE TERMOECONÔMICA DA MINI-ETE SEM A AUTO-SUFICIÊNCIA ENERGÉTICA</b> .....	<b>98</b>
5.1	IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA .....	98
5.2	CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMOECONÔMICO	100
5.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO .....	101
5.3.1	<b>Determinação das expressões para as funções exergéticas (restrições)</b> ...	101
5.3.2	<b>Determinação das equações matemáticas dos custos dos produtos associados</b> .....	101
5.3.3	<b>Cálculo dos custos associados à mini-ETE</b> .....	102
5.3.4	<b>Estudo da viabilidade econômica</b> .....	103
<b>6</b>	<b>COMPARAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA MINI- ETE COM UM SISTEMA COMERCIALMENTE DISPONÍVEL</b> .....	<b>106</b>
6.1	IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA .....	106
6.2	CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMOECONÔMICO	109
6.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO .....	110
6.3.1	<b>Determinação das expressões para as funções exergéticas (restrições)</b> ...	110
6.3.2	<b>Determinação das equações matemáticas do custo dos produtos associados</b> .....	112
6.3.3	<b>Cálculo dos custos associados à mini-ETE sem auto-suficiência energética</b> .....	114
6.3.4	<b>Estudo da viabilidade econômica</b> .....	118
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>122</b>

7.1	CONCLUSÕES .....	122
7.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	123
7.2.1	<b>Desenvolvimento de algoritmo para reconhecimento de padrões com base nos modelos termodinâmico e fluidodinâmico .....</b>	<b>123</b>
7.2.2	<b>Instrumentação analítica aplicada à medição indireta de DBO e de DQO em uma mini-ETE .....</b>	<b>124</b>
7.2.3	<b>Automatização e controle de uma mini-ETE .....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>126</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....</b>	<b>131</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Mini-estação de tratamento de esgoto implantada na UNESP, campus de Guaratinguetá (visão geral) .....	31
FIGURA 2	– Mini-estação de tratamento de esgoto implantada na UNESP, campus de Guaratinguetá (vista frontal) .....	32
FIGURA 3	– Mini-estação de tratamento de esgoto implantada na UNESP, campus de Guaratinguetá, com a roda d'água em funcionamento ..	33
FIGURA 4	– Diagrama de blocos da mini-ETE .....	33
FIGURA 5	– Rede pública de coleta de esgoto sanitário residencial .....	48
FIGURA 6	– Etapas do tratamento de esgoto .....	49
FIGURA 7	– Tratamento preliminar do esgoto .....	50
FIGURA 8	– Tratamento primário do esgoto .....	51
FIGURA 9	– Reator anaeróbio de manta de lodo .....	52
FIGURA 10	– Lagoa de estabilização .....	53
FIGURA 11	– Tanque de aeração com lodo ativado .....	54
FIGURA 12	– Filtro biológico .....	55
FIGURA 13	– Tanque anaeróbio ou sistema Imhoff .....	55
FIGURA 14	– Disposição no solo .....	56
FIGURA 15	– Sistema de tratamento terciário .....	57
FIGURA 16	– Sistema com lâmpadas ultravioleta para desinfecção do esgoto .....	57
FIGURA 17	– Digestor anaeróbio para estabilização de lodo .....	58
FIGURA 18	– Diagrama de processo para o sistema BGFM .....	65
FIGURA 19	– Diagrama funcional termoeconômico para o sistema BGFM .....	68

FIGURA 20 – Modelo estrutural baseado em custos para o sistema BGFM .....	72
FIGURA 21 – Custos da água de esgoto pré-tratada pelo sistema BGFM .....	75
FIGURA 22 – Custos do biofertilizante produzido pelo sistema BGFM .....	75
FIGURA 23 – Custos do biogás produzido pelo sistema BGFM .....	76
FIGURA 24 – Custos da eletricidade gerada no MCI do sistema BGFM .....	76
FIGURA 25 – Custo de manufatura exergético do sistema BGFM .....	77
FIGURA 26 – Receita anual do sistema BGFM para os períodos observados .....	79
FIGURA 27 – Diagrama de processo para a mini-ETE .....	81
FIGURA 28 – Diagrama funcional termoeconômico para a mini-ETE .....	84
FIGURA 29 – Modelo estrutural baseado em custos para a mini-ETE .....	88
FIGURA 30 – Custos da água de esgoto que é pré-tratada pela mini-ETE .....	91
FIGURA 31 – Custos da água de esgoto que é tratada pela mini-ETE .....	92
FIGURA 32 – Custos do ar produzido para aeração na mini-ETE .....	92
FIGURA 33 – Custos do biofertilizante produzido pela mini-ETE .....	93
FIGURA 34 – Custos do biogás produzido pela mini-ETE .....	93
FIGURA 35 – Custos da eletricidade gerada no MCI da mini-ETE .....	94
FIGURA 36 – Custo da manufatura exergético da mini-ETE .....	94
FIGURA 37 – Receita anual para a mini-ETE nos períodos observados .....	97
FIGURA 38 – Diagrama de processo para a mini-ETE sem auto-suficiência energética .....	99
FIGURA 39 – Diagrama funcional termoeconômico para a mini-ETE sem auto- suficiência energética .....	100
FIGURA 40 – Modelo estrutural baseado em custos para a mini-ETE sem auto- suficiência energética .....	102

FIGURA 41 – Receita anual para a mini-ETE sem auto-suficiência energética nos períodos observados .....	104
FIGURA 42 – Estação de tratamento de esgoto MIZUMO Linha Plus .....	107
FIGURA 43 – Diagrama de processo de uma estação de tratamento de esgoto disponível no mercado .....	108
FIGURA 44 – Diagrama funcional correspondente à estação de tratamento de esgoto disponível no mercado .....	109
FIGURA 45 – Modelo estrutural baseado em custos para o sistema disponível no mercado .....	112
FIGURA 46 – Custo do biogás produzido para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise .....	115
FIGURA 47 – Custo do biofertilizante para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise .....	116
FIGURA 48 – Custo da água pré-tratada para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise .....	116
FIGURA 49 – Custo da água tratada para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise .....	117
FIGURA 50 – Custo de manufatura exergético do sistema comercialmente disponível .....	117
FIGURA 51 – Receita anual para o sistema disponível no mercado nos períodos observados .....	119
FIGURA 52 – Comparação entre as receitas dos três casos estudados com juros de 4%a.a. ....	120
FIGURA 53 – Comparação entre os custos da água tratada pela mini-ETE e pelo sistema comercialmente disponível .....	120

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Representação das características termodinâmicas do sistema BGFM .....	65
TABELA 2 – Valores dos fluxos exergéticos associados ao sistema BGFM .....	71
TABELA 3 – Considerações iniciais tomadas como referência .....	73
TABELA 4 – Valores dos custos para o sistema BGFM nas diversas condições de análise .....	74
TABELA 5 – Valores da receita para o sistema BGFM nos períodos observados .....	78
TABELA 6 – Características da mini-estação de tratamento de esgoto .....	82
TABELA 7 – Valores dos fluxos exergéticos associados à mini-ETE .....	87
TABELA 8 – Valores dos custos para a mini-ETE nas diversas condições de análise .....	91
TABELA 9 – Valores da receita para a mini-ETE nos períodos observados .....	96
TABELA 10 – Valores da receita para a mini-ETE sem auto-suficiência energética nos períodos observados .....	104
TABELA 11 – Características técnicas do sistema MIZUMO Plus .....	107
TABELA 12 – Características termodinâmicas da estação de tratamento de esgoto disponível no mercado .....	108
TABELA 13 – Valores dos fluxos exergéticos associados a um sistema disponível no mercado .....	111
TABELA 14 – Valores dos custos para um sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise .....	115
TABELA 15 – Valores da receita para um sistema disponível no mercado nos períodos observados .....	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BGFM – Acrônimo adotado para representar o sistema composto por Biodigestor, Gasômetro, Filtro e Motor, utilizado no desenvolvimento da metodologia proposta
- CLP – Controlador lógico programável
- DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
- DQO – Demanda química de oxigênio
- ETE – Estação de tratamento de esgoto (efluentes)
- MCI – Motor de combustão interna
- Mini-ETE – Mini-estação de tratamento de esgoto
- OD – Oxigênio dissolvido (do inglês *Dissolved oxygen*)
- PCI – Poder calorífico inferior
- pH – Potencial de hidrogênio ou potencial hidrogeniônico (do inglês *Potential of hydrogen*)
- POR – Potencial de oxi-redução (do inglês *Oxi-reduction potential*)
- SCADA – Sistema de controle e aquisição de dados (do inglês *Supervisory, Control, And Data Acquisition*)
- TSD – Total de sólidos dissolvidos (do inglês *Total dissolved solids*)
- UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente em Manta de Lodo (do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)



UT – Unidades de turbidez

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c_{ae}$	Custo da produção de água de esgoto	$US\$/kWh$
$c_{aer}$	Custo da energia produzida na roda d'água (aeração)	$US\$/kWh$
$c_{ap}$	Custo da produção de água pré-tratada	$US\$/kWh$
$c_{at}$	Custo da produção de água tratada (em condições de re-uso)	$US\$/kWh$
$c_{bf}$	Custo do biofertilizante	$US\$/kWh$
$c_{bg}$	Custo da produção de biogás	$US\$/kWh$
$c_{el}$	Custo da produção de eletricidade	$US\$/kWh$
$c_i$	Custo exerético do produto no ponto $i$	$US\$/kWh$
$CM_{ex}$	Custo de manutenção exerético	$US\$/kWh$
$c_{OMA}$	Custo de operação e manutenção dos biodigestores anaeróbios – considerada a ênfase na produção do biogás	$US\$/kWh$
$c_{OMAA}$	Custo de operação e manutenção do biodigestor aeróbio-anóxico – considerada a ênfase no tratamento de água	$US\$/m^3$
$c_{OMDI}$	Custo de operação e manutenção da unidade de desinfecção	$US\$/m^3$

$c_{OMDS}$	Custo de operação e manutenção do decantador secundário	$US\$/m^3$
$c_{OMel}$	Custo de operação e manutenção dos equipamentos para geração e distribuição de eletricidade – MCI, poste, cabeamento etc.	$US\$/kWh$
$c_{OMr}$	Custo de operação e manutenção da roda d'água	$US\$/m^3$
$cp_{ar}$	Calor específico a pressão constante do ar ambiente	$kJ/kg.K$
$cp_{ge}$	Calor específico a pressão constante dos gases de exaustão	$kJ/kg.K$
$DBO_{afluente}$	DBO na entrada do sistema	$mg/L$
$DBO_{effluente}$	DBO na saída do sistema	$mg/L$
$E_r$	Eficiência de remoção de DBO	%
$E_p$	Fluxo da energia elétrica produzida	$kW$
$ex_{ar}$	Exergia específica do ar	$kJ/kg$
$ex_{ge}$	Exergia específica dos gases de exaustão	$kJ/kg$
$f$	Fator de anuidade	$ano^{-1}$
$fp_{ae}$	Fator de produção (ponderação) da água de esgoto	-
$fp_{ap}$	Fator de produção (ponderação) da água pré-tratada	-
$fp_{bf}$	Fator de produção (ponderação) do biofertilizante	-
$fp_{bg}$	Fator de produção (ponderação) do biogás	-

g      Aceleração da gravidade

$\dot{m}_{bf}$	Vazão mássica do biofertilizante	$kg/s$
$\dot{m}_{bg}$	Vazão mássica do biogás	$kg/s$
$M_{bg}$	Massa molecular de um mol de biogás	$g/mol$
$\dot{m}_{es}$	Vazão mássica de esgoto	$kg/s$
$\dot{m}_{ge}$	Vazão mássica dos gases de exaustão	$kg/s$
$\dot{m}_i$	Vazão mássica no ponto $i$	$kg/s$
$P_{ae}$	Valor médio da água de esgoto praticado pelas Companhias de Saneamento (média nacional) – pré- tratamento	$US\$/m^3$
$P_{at}$	Valor médio do tratamento de esgoto praticado pelas Companhias de Saneamento (média nacional)	$US\$/m^3$
$P_{el}$	Valor médio da tarifação de energia elétrica	$US\$/MWh$
$PCI_{bf}$	Poder calorífico inferior do biofertilizante	$kJ/kg$
$PCI_{bg}$	Poder calorífico inferior do biogás	$kJ/kg$
$q$	Valor do capital	-
$Q_a$	Vazão do afluente	$m^3/h$
$Q_{ae}$	Vazão volumétrica da água de esgoto	$m^3/s$
$Q_{ap}$	Vazão volumétrica da água pré-tratada	$m^3/s$
$Q_{ar}$	Vazão volumétrica do ar	$m^3/s$

$Q_{at}$	Vazão volumétrica da água tratada	$m^3/s$
$Q_{bf}$	Vazão volumétrica do biofertilizante	$m^3/s$
$Q_{bg}$	Vazão volumétrica do biogás	$m^3/s$
$Q_{es}$	Vazão volumétrica do esgoto	$m^3/s$
R	Receita anual	US\$/ano
r	Taxa anual de juros	%a.a.
rs	Resíduo seco	ppm
$s_0$	Entropia específica de referência	$kJ/kg.K$
$s_i$	Entropia específica do ponto $i$	$kJ/kg.K$
$T_0$	Temperatura de referência	K
$T_{ar}$	Temperatura do ar	K
$T_{ge}$	Temperatura dos gases de exaustão	K
$T_i$	Temperatura no ponto $i$	K
tr	Tempo de retenção hidráulica	h
TSD	Total de sólidos dissolvidos	ppm
v	Velocidade média do líquido ou velocidade de subida no tanque	m/h
$V_{bg}$	Volume molecular do biogás	$m^3/mol$
$V_d$	Volume do decantador (tanque)	$m^3$

$Y$	Funções exergéticas em base incremental	$kW$
$Y_{i,j}$	j-ésima entrada à i-ésima unidade	$kW$
$Y_{i,k}$	k-ésima saída à i-ésima unidade	$kW$
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar	$kg/m^3$
$\rho_{bg}$	Massa específica do biogás	$kg/m^3$
$\rho_{es}$	Massa específica do esgoto	$kg/m^3$
$\gamma$	Peso específico	$N/m^3$
$v_{\acute{a}gua}$	Volume específico da água a 25°C	$m^3/kg$

## CAPÍTULO 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo contém as impressões iniciais a respeito do estudo realizado, manifestando o estado da arte correlato a esta pesquisa científica, suas contribuições científica e social, a motivação para sua realização e os materiais e métodos empregados em sua elaboração e em seu desenvolvimento. Este capítulo compreende uma Introdução, a apresentação dos Objetivos, a Revisão Bibliográfica, e a Metodologia adotada em sua execução.

### 1.1 INTRODUÇÃO

As diversas crises energéticas que vêm afetando o mundo, em menor ou maior escala, têm incentivado a procura de soluções alternativas às formas existentes para gerar energia eletromecânica e térmica, além de fomentar o uso racional da energia gerada a partir das formas tradicionais. Há de se destacar que a preocupação com a manutenção do meio-ambiente também tem tido grande influência nessas pesquisas.

Essa nova perspectiva focada em fontes alternativas de energia (BEDUSCHI et al, 1983; GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004) propiciou o surgimento de novas técnicas para a modelagem mais precisa desses sistemas com vistas à possibilidade de uma análise técnico-econômica mais rigorosa e criteriosa. Assim, os modelos de análise exergoeconômica, ou termoeconômica, ganharam força nesse cenário, sendo ferramentas muito utilizadas na otimização de sistemas energéticos (SILVEIRA, 1998).

O metano que está presente no biogás, gerado a partir do tratamento anaeróbio de esgoto, é cerca de 21 vezes mais prejudicial para a atmosfera, com relação ao efeito estufa, do que o gás carbônico; assim, o aproveitamento energético do biogás torna-se muito interessante, principalmente quando concilia a geração de energia renovável e o saneamento ambiental. Se faz pois necessário obter o melhor desempenho do sistema para maior aproveitamento do biogás e menor emissão dos gases de exaustão (GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004).



Para a mini-estação de tratamento de esgoto (mini-ETE), implantada no Campus Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (Figuras 1 a 3), foi dimensionado um sistema de auto-geração, para aproveitamento do biogás produzido na própria mini-ETE, que tem a finalidade de gerar energia elétrica para o sistema. Também se utiliza a queda d’água da parte aeróbia para produzir potência mecânica para o sistema de geração que é parte integrante dessa planta de tratamento de esgoto. Há também a perspectiva do uso do efluente tratado (biofertilizante) para a ferti-irrigação de um bosque de plantas em formação, existente no campus de Guaratinguetá.



Figura 1 – Mini-estação de tratamento de esgoto implantada na UNESP, campus de Guaratinguetá (visão geral)



Figura 2 – Mini-estação de tratamento de esgoto implantada na UNESP, campus de Guaratinguetá (vista frontal)

O sistema de auto-geração é composto por um motor de combustão interna (MCI), refrigerado a ar, o qual será acionado pela combustão do biogás oriundo do gasômetro que acumula o biogás gerado nos biodigestores anaeróbios e o condiciona à pressão adequada para ser utilizado no sistema. A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos da mini-estação de tratamento de esgoto associando a auto-geração a biogás e a queda d'água.



Figura 3 – Mini-estação de tratamento de esgoto implantada na UNESP, campus de Guaratinguetá, com a roda d'água em funcionamento



Figura 4 – Diagrama de blocos da mini-ETE

O esgoto proveniente do prédio da administração e da cantina do Campus (Figura 2) entra no sistema pela caixa de gordura, que é o tratamento preliminar das águas residuárias, eliminando os sólidos mais grosseiros, por exemplo blocos de gordura, via gradeamento.

A seguir, o esgoto passa por um sistema anaeróbio, composto por três biodigestores tipo manta de lodo, que, por meio de um separador de fases em formato helicoidal, separa os resíduos sólidos (lodo), do biogás e da água do esgoto (pré-tratada). Nesse estágio, o lodo excedente é retirado e torna-se biofertilizante. A outra parte do lodo é mantida, pois os micro-organismos ali presentes, com predominância do gênero *Methanosaeta*, segundo Oliveira e Foresti (2004), digerem a matéria orgânica presente no esgoto e produzem o biogás. Esse biogás é transferido ao gasômetro onde é concentrado e colocado à pressão apropriada para alimentar o MCI, que gera energia elétrica suficiente para manter pequenos sistemas, como uma sala de controle, a iluminação da área em torno da mini-ETE, uma bomba etc.

A água do esgoto segue o fluxo do sistema até o quarto biodigestor, aeróbio-anóxico, onde micro-organismos aeróbios digerem a matéria orgânica que não foi digerida anaerobicamente, além de transformar o nitrogênio amoniacal em nitrato. Cabe aos micro-organismos anóxicos presentes nesse biodigestor transformar o nitrato em nitrogênio gasoso e remover parte do fósforo na forma de biomassa bacteriana do lodo. Nesse estágio, a água em condição de re-uso passa por uma roda d'água que gera potência mecânica a ser utilizada no funcionamento do aerador, o qual supre o biodigestor aeróbio de ar para as bactérias. A água em condição de re-uso (tratada) pode ser utilizada na ferti-irrigação de área verde.

## 1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia que possibilite determinar os custos relacionados à implantação de um sistema de tratamento de esgoto a partir da análise de viabilidade econômica das alternativas disponíveis, considerando a alocação dos custos dos produtos gerados pela mini-ETE.

Como objetivo social, tem-se a possibilidade de aprimorar a utilização dos recursos gerados a partir do re-aproveitamento de resíduos sanitários, contribuindo para o desenvolvimento de populações menos favorecidas economicamente, de alternativas de saneamento ambiental a um menor custo com a geração de energia renovável, tendo como consequência direta a melhoria da qualidade de vida dessas populações.

### 1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na elaboração desta Tese foi consultada literatura especializada nas áreas de biodigestores, de tratamento de efluentes, de geração de energia, de controle, de modelagem e de otimização de sistemas termodinâmicos, com o intuito de consolidar e subsidiar o conhecimento para possibilitar o desenvolvimento da metodologia, estabelecendo um critério consistente para a identificação, a formulação e a solução do problema proposto.

Beduschi *et al.* (1983) relataram seu estudo a respeito da viabilidade econômica do uso de biodigestores, estimando o custo de construção de um biodigestor projetado para produzir 10 m<sup>3</sup> de biogás e 500 litros de fertilizante ao dia (Cr\$ 152.885,00, em outubro de 1981). Essa publicação foi importante para a elaboração desta Tese pois contribuiu para o estabelecimento de padrões de custo com relação à produção de biofertilizante, sendo relacionada sua produção como sendo equivalente a 0,017% do esgoto que é tratado em sistemas baseados em biodigestão anaeróbia e 0,05% do biogás gerado durante esse tratamento, e aspectos construtivos, além de custos de operação e manutenção.

Hu (1986) enfocara a evolução dos projetos de cogeração, incluindo aspectos de economia, regulamentação, gestão ambiental, legislação e institucionais. Sua relevância para esta proposta de pesquisa decorre dos princípios básicos relacionados ao projeto de um sistema de auto-geração e os principais enfoques a serem considerados em sua implantação. Este livro está dividido em duas partes, sendo a primeira voltada àqueles leitores interessados no estudo de viabilidade de projetos de

cogeração e auto-geração específicos e a segunda parte apresenta uma visão geral do mercado e as tendências das tecnologias. Na primeira parte destacam-se assuntos como: as tecnologias; os métodos de alocação de custos; dimensionamento e operação de sistemas de cogeração; onde aplicar a cogeração; acordos comerciais sobre demanda energética; métodos de cálculos de cogeração. A segunda parte dessa publicação contempla assuntos como: potencial da cogeração; tendências e desenvolvimento de sistemas de cogeração; a aplicação da cogeração nas indústrias de cimento, em prédios comerciais, residenciais ou institucionais, na indústria de celulose e papel em parques tecnológicos e industriais.

Silveira (1990) apresentara uma análise exergoeconômica de sistema de cogeração associado ao segmento de celulose e papel. Daqui, foram utilizados os principais conceitos de análise exérgica e exergoeconômica.

Kambhampati et. al. (1992) apresentaram um modelo matemático padrão para processos fermentativos com o objetivo de otimizar esse tipo de processo, onde são definidos conceitos fundamentais como modelo matemático e otimização, além de serem relacionados trabalhos anteriores correlatos a sua pesquisa. A seguir, o problema de otimização do controle (OCP) é estudado, sendo apresentados critérios para sua elaboração, obtendo-se, assim, um modelo matemático generalizado para os processos fermentativos. É proposto um algoritmo para elaboração do modelo matemático a partir de informações coletadas diretamente no processo, por meio de medições. Também é verificado o quão ótimo é o algoritmo com a aplicação de três teoremas. O desempenho desse algoritmo é testado pela sua aplicação a um processo de simulação a partir das equações de Monod para representar o processo em tempo contínuo.

Os autores concluíram, a partir dos resultados obtidos na simulação, que é possível otimizar processos fermentativos contínuos. Enfatizam, também, que o algoritmo proposto não é específico de nenhum processo podendo ser utilizado para o desempenho de qualquer processo fermentativo contínuo, podendo, ainda, ser aplicado tanto a processos lineares quanto a não-lineares.

Russel (1994) é um clássico da literatura a respeito de Química Geral. O autor relata os conceitos que foram utilizados como orientação para a obtenção do poder

calorífico inferior (PCI) do biogás produzido pela mini-estação de tratamento de esgoto da UNESP, Guaratinguetá.

Chen e Chung (1996) descreveram uma metodologia para projetar um sistema de controle PID (proporcional-integral-derivativo) com estrutura variável utilizando lógica neuro-nebulosa (*neural/fuzzy VSPID*), sendo apresentadas as técnicas de projeto associadas ao controlador do tipo PID, como redes de funções com base radial (RBFN), redes neurais com propagação de retorno (BPNN) e sistema com lógica nebulosa (*Fuzzy Logic System – FLS*), os quais são utilizados para prover a funcionalidade desejada ao controlador PID com estrutura variável utilizando lógica neuro-nebulosa para processos não-lineares. Caracterizam as topologias de redes neurais de múltiplas camadas (*Multi Layer Neural Network – MLNN*) e de sistemas de lógica nebulosa (FLS), onde são destacadas as propriedades inerentes às partes componentes do sistema "*neural/fuzzy VSPID*": equivalência entre funcionalidades de LooRBFN\_VSPID e FL\_VSPID com VSPID linear; ação integral do controlador "*neural/fuzzy VSPID*" é de contorno; ganho do controlador PD (proporcional-derivativo) neuro-nebuloso; suficiência do critério para estabilidade do sistema de controle PD neuro-nebuloso. Os procedimentos de aprendizado do sistema de controle são relacionados, sendo o seu objetivo, minimizar as medidas de desempenho. Os autores concluíram que o método de projeto de um sistema de controle PID com estrutura neuro-nebulosa variável contempla os objetivos relacionados, com aplicação do modo PD na ocorrência de erros muito grandes para respostas rápidas e aplicação do modo PI (proporcional-integral) em condições de pequenos erros para eliminar o erro sistêmico.

Le Goff e Hornut (1998) apresentaram um modelo para otimização de processos industriais a partir de análise exergética e utilizando modelo exergo-econômico.

permitir a otimização do projeto de plantas térmicas.

Essa publicação foi base para a elaboração do método proposto nessa Tese e contribuiu para grande parte da formulação adotada para o modelamento matemático dos sistemas em estudo.

Genovesi, Harmand e Steyer (1999) apresentaram uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico, do tipo detecção e isolamento de falhas (FDI – *Fault Detection and Isolation*), baseado também em lógica nebulosa, onde são destacados os desenvolvimentos similares e/ou aqueles que são utilizados como fonte de informação para a elaboração de seu FDI. São salientados alguns trabalhos desenvolvidos na pesquisa e desenvolvimento de FDI eficientes, principalmente aqueles adotados em sistemas biológicos (bioprocessos). Com base nos resultados estudados, oriundos dos diversos métodos de desenvolvimento de FDI apresentados, os autores optaram por uma estrutura aberta que agregasse características residuais de vários métodos. Assim, são definidos três tipos de sinais de falha: falhas de sensor (SF – *Sensor Fault*); falhas em sub-processos (SPF – *Sub-Process Fault*); e falhas no processo (PF – *Process Fault*). Cada sinal de falha é gerado usando a teoria da lógica nebulosa e a estrutura Mamdani é usada por todos esses sinais. As regras básicas são definidas a partir do conhecimento de operadores humanos, onde as entradas estão relacionadas a dois casos de sinal de saída: "problema" e "sem problema". um algoritmo para denebulização dos sinais de saída é desenvolvido com o intuito de validar os resultados com referência às reações de um operador humano. Os autores concluíram que os resultados obtidos demonstram a habilidade do esquema de FDI com lógica nebulosa para manter o conhecimento humano em uma linha sistêmica e representa uma ferramenta potencialmente poderosa para uso em FDI em ambiente industrial. Tal estratégia possibilita a detecção de diferentes tipos de falha: desconexão do sensor; parada do atuador; problemas com malha local e problemas com processos biológicos.

Tuna (1999) apresentara uma metodologia de análise exergoeconômica aplicada a sistemas de cogeração (produção de calor útil e potência elétrica ou mecânica), baseada na Segunda Lei da Termodinâmica e na análise termoeconômica, com o objetivo de otimizar o custo global de aquisição e operação de um sistema empregando



turbinas a vapor ou a gás. O autor concluiu que o método de otimização econômica desenvolvido associado à análise termodinâmica, considerando a exergoeconomia dos sistemas, apesar das eventuais complexidades iniciais, revelou-se uma ferramenta poderosa para uma concepção correta de investimento e das condições de operação de sistemas de cogeração.

Bakken, Belsnes e Roynstrand (2000) elaboraram uma metodologia robusta e flexível para analisar sistemas de distribuição de energia complexos com múltiplos portadores de energia. São caracterizados os tipos de processos que constituem os sistemas de energia: transmissão de energia por uma distância geográfica; conversão entre diferentes portadores de energia; e armazenagem de energia. É destacado pelos autores que a metodologia inclui aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. A metodologia elaborada é aplicada a uma planta, em menor escala, de um sistema de distribuição de energia municipal (Trodneim, Noruega), onde pode-se observar que este modelo tem características de estruturas complexas de rede, modelos de fluxo de carga e programação linear, sendo utilizada técnica de otimização híbrida para a solução do problema de multicritério gerado, ou seja, o problema é dividido em problemas menores e são aplicadas técnicas de otimização pontuais para cada subproblema. O modelo adotado para o estudo de caso mencionado é composto por um sistema de cogeração baseado em biomassa e em lixo urbano como combustíveis. Os autores concluem que a metodologia habilita as companhias geradoras de energia a terem uma análise compreensiva de seus sistemas de fornecimento de energia, permitindo, assim, a racionalização dessa distribuição contendo custos desnecessários.

Dhillon e Kothari (2000) apresentaram um problema multi-objetivo de despacho de potência térmica que é resolvido com objetivos não comensuráveis, tais como custo operacional e mínimo de emissões de gases. Os autores descrevem o estado da arte das metodologias adotadas para a solução desse tipo de problema e sua evolução no transcorrer do tempo. A seguir, o problema é formulado, para cada um dos objetivos separadamente. O método elaborado é descrito e tem suas principais características destacadas, merecendo destaque ainda maior o algoritmo elaborado para a solução do problema proposto. O sistema utilizado para testar a metodologia também é descrito, assim como os casos a serem estudados com o método elaborado pelos autores. Os

autores concluem que a estrutura de análise multi-objetiva é adequada para uso em casos nos quais o custo e a emissão de gases sejam objetivos conflitantes e sujeitos a interação mútua. Assim, o método proposto funciona como um intermediário entre o modelo matemático e a tomada de decisão para a solução do problema apresentado.

Velázquez (2000) utilizara técnicas de análise econômica para definir a contribuição do uso da cogeração no segmento de celulose e papel à matriz energética do Brasil. Dessa Tese, foram extraídos os principais conceitos com relação à análise energo-econômica e algumas informações de referência.

Oliveira (2001) relacionara em apostila de curso ministrado na UNESP-FCA informações a respeito de resíduos sólidos urbanos, os principais tipos, suas características físico-químicas, composição etc. Nesse documento, obteve-se os valores típicos de poder calorífico inferior para resíduos sólidos urbanos, em diversas condições e composições, como, por exemplo, RSU misturados com base em papel de escritório, papel corrugado, madeira verde, resíduo alimentar misturado etc.

Salamon et al. (2001) apresentaram uma síntese do controle de processos termodinâmicos, na qual é realizada uma discussão sobre nove princípios gerais, a serem considerados na revisão qualitativa do controle desses processos, para encontrar o melhor desenvolvimento na efetivação da conversão de energia no tempo finito, a partir de pesquisas realizadas por vários outros autores. É destacado o desenvolvimento das equações dinâmicas representativas de um sistema termodinâmico, salientando as características das variáveis de estado e de controle. Os princípios mencionados são divididos em três grupos: princípios de simplificação do problema; princípios relacionados à menor produção de entropia; e princípios relacionados à máxima potência.

Torres (2001) apresentara uma metodologia para análise exergetica de sistemas térmicos, destacando alguns estudos de casos.

Uche, Serra e Valero (2001) apresentaram uma análise termo-econômica visando a otimização de uma planta de desalinização associada a uma planta para geração de energia. Em um primeiro momento são realizadas considerações sobre os aspectos termo-econômicos para a planta de duplo propósito e a metodologia a ser utilizada na obtenção de uma função objetivo global e sua solução, destacando a aplicação dos

multiplicadores de Lagrange na decomposição do sistema a partir da Segunda Lei da Termodinâmica. Nessa metodologia, a planta será considerada um sistema de cogeração, no qual busca-se maximizar seus dois produtos gerados: eletricidade e água, minimizando seu custo total. Também são definidas as condições de isolamento termo-econômico e os modelos físico e termo-econômico a serem adotados. Os autores concluem que uma planta complexa com características de duplo propósito pode ser otimizada pela aplicação de otimização local baseada em técnicas de termo-economia, sendo os dispositivos isolados e analisados, para então buscar-se uma solução global.

Balestieri (2002) contemplara o estudo de sistemas de cogeração. Conceitos fundamentais de termodinâmica e máquinas térmicas são vistos, com o intuito de consolidar o estudo da análise técnica e da análise econômica das configurações de sistemas de cogeração mais usuais. A sua importância para este trabalho advém da conceituação apresentada, em particular as análises técnica e econômica de sistemas de cogeração.

Brizi (2002) descrevera as características técnicas e aplicações possíveis de um sistema de cogeração a gás natural e a biogás. Sua relevância para esta Tese é acerca do dimensionamento de um sistema cogrador e suas características funcionais, possibilitando estabelecer as características termodinâmicas do sistema de cogeração associado à mini-estação de tratamento de esgoto.

Cziesla e Tsatsaronis (2002) apresentaram uma solução para a redução de custos nos projetos de plantas termoelétricas e uma combinação interativa de técnicas de otimização exergo-econômica com sistemas nebulosos de inferência. São demonstrados os passos para a definição de regras, que são aplicadas a uma planta termo-elétrica típica. Como parte do desenvolvimento, são ilustradas as matrizes nebulosas de memória associadas (FAM), muito úteis na elaboração de regras de nebulização. Alguns conceitos a respeito da lógica nebulosa são consolidados por meio da aplicação apresentada no artigo de Cziesla e Tsatsaronis (2002).

Kishimoto et. al. (2002) apresentaram a aplicação em biodigestores a biomassa de um sistema de controle baseado em lógica nebulosa, onde são relacionados trabalhos que descrevem os tipos mais comuns de biodigestores e suas aplicações típicas, assim como a teoria fundamental da lógica nebulosa e sua aplicação em

processos biológicos. Também descrevem os instrumentos utilizados nas medições realizadas durante os procedimentos experimentais, os critérios de análise e metodologia adotados. Os critérios adotados durante a elaboração do programa computacional baseado em lógica nebulosa são relacionados, assim como os resultados analíticos obtidos. A partir desses resultados, os autores concluem que a aplicação da lógica nebulosa é bastante eficaz para o controle de um biodigestor com células imobilizadas, apesar de muitos fatores inerentes ao processo contribuírem para mudanças aleatórias que o tornam um "processo instável", tais como crescimento da célula, deformação da biomassa (BSP) e presença de turbulência e pequenas anomalias internas à BSP.

Borgnakke, Sonntag e van Wylen (2003) é um clássico da termodinâmica. Boa parte da conceituação e da metodologia de análise de sistemas termodinâmicos adotados neste trabalho são baseados nessa publicação. Além disso, o aplicativo CATT2 disponível nessa edição é utilizado para cálculo dos valores de entalpia, entropia e exergia específica dos diversos fluidos estudados.

O alcance das fontes de energia renovável como substitutas de fontes tradicionais no cenário de energia comercial com relação ao impacto social e ambiental fora discutido nesse artigo de Iniyar e Sumathy (2003). Um modelo matemático otimizado para energia renovável (OREM) é desenvolvido para substituição de fontes de energia renováveis na Índia nos anos de 2010-11, 2015-16 e 2020-21. É um modelo de programação linear, o qual aloca de forma ótima as fontes de energia renováveis para diferentes finalidades, tais como: iluminação, cozimento, bombeamento, aquecimento, refrigeração e transporte. O modelo é desenvolvido com o objetivo de minimizar a relação entre custo e benefício baseando-se na aceitação social, na confiabilidade, na demanda e no potencial como restrições. Os autores concluem que o modelo OREM é eficiente ao auxílio para estabelecer a substituição de fontes de energia convencional pelas renováveis. Eles apontam para uma eficiência entre 25 e 100% da utilização de fontes renováveis como alternativas às atualmente comercializadas, sendo o biogás, a biomassa e o etanol os que mais mereceram seu destaque.

Nikulshin, Wu e Nikulshina (2003) apresentaram uma proposta de metodologia para modelagem e otimização de sistemas com estrutura linear baseado em grafos.

Eles aplicam essa metodologia para a otimização de um sistema fotovoltaico para geração de eletricidade, a qual é utilizada no aquecimento de água com reservatório de água quente. As restrições inerentes à análise desse sistema são relacionadas com a sua capacidade de produzir calor, as dimensões do coletor solar, a capacidade do reservatório de água quente, a capacidade da bomba de calor e a capacidade de calor do aquecedor elétrico.

Vargas e Sifuentes (2003) compararam os principais métodos de otimização para a solução do problema de Despacho Econômico Hidrotérmico de Curto Prazo (DEHCP) e a adoção do método mais adequado a essa solução. O problema apresentado é a determinação da melhor expedição de energia pelas unidades de geração hidráulica e térmica de um sistema interconectado de modo a ser obtido o menor custo operacional. As restrições podem ser relacionadas como: das Unidades Térmicas; das Interconexões Internacionais; das Unidades Hidrelétricas; das Represas; de Parâmetros Elétricos; dos Recursos Primários; de Contratos; para Manutenção dos Componentes dos Sistemas; do Sistema. Os métodos utilizados são: programação dinâmica; programação linear; programação inteira mista; relaxação Langrangeana; decomposição de Benders; e a combinação de vários desses. A partir daí, cada um desses métodos é descrito, tendo relacionadas as suas principais características e quais dessas apresentam melhores resultados na solução do problema de DEHCP proposto, seja uma solução global ou para parte do sistema. Desta forma, os autores concluem que o método mais adequado à solução do problema de DEHCP é o da Decomposição de Benders.

Godoy Júnior, Silveira e Giacaglia (2004) realizaram a análise técnico-econômica de uma mini-estação de tratamento de efluente por processo integrado anaeróbio, aeróbio e anóxico. O artigo é relevante para esta Tese pelo dimensionamento da mini-ETE, pela metodologia para a análise técnico-econômica da mini-ETE associada à cogeração a biogás e pela pesquisa dos valores de custos de investimento, manutenção e operação e da média das tarifas de tratamento de esgoto adotadas no Brasil.

Gohokar, Khedkar e Dhole (2004) apresentaram uma proposta para otimizar a formulação do problema de reconfiguração da distribuição de energia usando

topologia de rede e um esquema interativo para o fluxo de carga simples e eficiente. São salientadas as metodologias atualmente utilizadas e as que estão em desenvolvimento para a solução desse problema. A formulação adotada para o desenvolvimento da metodologia proposta é apresentada e associada à arquitetura de rede proposta. A seguir, é realizada uma análise do fluxo de carga do sistema de distribuição radial, sendo ilustrado um sistema de teste hipotético. Os autores concluem que sua proposta permite a solução eficiente para redes de distribuição complexa e radial usando topologia de rede, sendo obtida uma redução de até 5% nas perdas com a reconfiguração.

Jordão e Além Sobrinho (2004) discutiram a respeito das atuais condições do tratamento de esgoto no Brasil e propõem uma comparação entre cinco tipos de pós-tratamento para reatores anaeróbios: processo de lodo ativado; filtro percolador convencional com meio de pedra britada grosso; filtro submerso aerado com pedra britada e com meio de PVC (meio plástico); lagoas aeradas seguidas por lagoas de sedimentação; e, flotação de ar dissolvido com coagulação por cloreto férrico e floculação. A partir dos resultados obtidos, os autores concluem quais os melhores tipos de pós-tratamento para situações específicas, principalmente por sua eficiência mediante o tipo de substrato e a temperatura elevada das condições brasileiras.

Oliveira e Foresti (2004) relataram experimentos para a obtenção do balanço de massa de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo a partir dos valores médios das determinações de demanda química de oxigênio e da produção de metano. Esse artigo possibilitou obter características químicas desse tipo de biodigestor.

Yilmaz (2004) realizou uma análise de desempenho baseada em critério alternativo de desempenho para um ciclo reversível de Carnot, modificado para cogeração, com irreversibilidades externas. Os valores ótimos para os parâmetros de projeto do ciclo de cogeração são obtidos por meio da análise termoeconômica do desempenho exergético do sistema. As restrições consideradas no estudo são: as irreversibilidades externas da transferência de calor, as temperaturas dos reservatórios de calor, as temperaturas da troca de calor dos fluidos, a razão da transferência de calor entre a fonte de calor e o fluido aquecido, a razão de transferência de calor do

fluido resfriado com absorvedor de calor e a razão entre a transferência de calor do fluido e o dispositivo que demanda calor.

Dias (2005) apresentara análises energética, exergética e econômica de sistema de cogeração associado ao segmento de celulose e papel, especificamente da empresa Votorantim Celulose e Papel S.A., que inclui a turbina a vapor que é a base do estudo apresentado neste trabalho. Neste trabalho foram extraídos alguns valores inerentes ao processo em estudo.

Guardabassi e Pires (2006) estudaram a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do esgoto de um conjunto residencial na cidade de São Paulo para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido, associado a gás natural contratado, com o intuito de suprir parcialmente a demanda energética desse conjunto residencial. Esse trabalho possibilitou ter uma visão sobre características gerais de biodigestores utilizados em sistemas de autogeração para áreas urbanas.

Martins, Guardabassi e Costa (2006) relataram estudos de casos a respeito do aproveitamento para geração de energia elétrica do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto da SABESP, na Grande São Paulo. Nesse trabalho pôde-se observar o aproveitamento do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto, antes queimado em *flares*, para a geração de energia elétrica a ser utilizada para suprir parte da demanda energética da planta.

As referências de preços de combustível e de equipamentos, assim como informações sobre o processo ao qual o sistema de cogeração baseado em motor de combustão interna é utilizado, puderam ser obtidas em GASPETRO (2004), em ANP (2004) e em PETROBRAS (2004). Além dessas referências, as taxas de juros praticadas no Brasil foram obtidas em BACEN (2006).

#### 1.4. METODOLOGIA

Propõe-se como metodologia para o desenvolvimento deste trabalho, adaptando o modelo de Silveira (1998), a identificação dos subsistemas constituintes da mini-ETE, o levantamento das características termodinâmicas da mini-ETE, a construção do

diagrama funcional termoeconômico, a formulação do problema de custos dos produtos associados, estudo de casos (mini-ETE, serviço de abastecimento e tratamento de água e sistema disponível no mercado), a tabulação e análise dos resultados e o relacionamento das conclusões.



## **CAPÍTULO 2 PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO**

Neste capítulo são relacionadas as principais características do tratamento de esgoto, incluindo os principais tipos de processos de tratamento e algumas características do esgoto.

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A água é um recurso vital para a vida e está presente no dia-a-dia dos seres vivos. Depois que a água é eliminada em atividades como tomar banho, lavar louça, irrigação, descarga do vaso sanitário etc., passa a ser chamada de esgoto. O esgoto pode ter origem doméstica (a partir das residências), pluvial (decorrente da ação da água das chuvas), industrial (a partir da água utilizada nos processos industriais) e rural (onde há incidência de dejetos animais) (CORSAN, 2005; COPASA, 2005).

A ausência de tratamento adequado para o esgoto pode ocasionar prejuízos à saúde pública por meio da transmissão de doenças, seja por contato direto com as águas residuais ou através de ratos, baratas, moscas etc. Além disso, o esgoto não tratado pode contaminar rios e fontes, afetando os recursos hídricos e a vida vegetal e animal. Com o intuito de evitar tais problemas, as autoridades sanitárias instituíram padrões de qualidade de efluentes a ser seguidos pelas empresas de saneamento básico, onde a saúde pública e a preservação ambiental são os principais alicerces do planejamento de um sistema de esgoto (CORSAN, 2005; COPASA, 2005).

Em geral, o esgoto sai de sua origem (residências, indústrias, comércio, zonas rurais etc) e chega à estação de tratamento de esgoto, denominada ETE – Estação de Tratamento de Esgoto, através da rede coletora pública, um sistema longo de canais subterrâneos onde é recolhido o esgoto dos ramais prediais, das “bocas de lobo” etc. (CORSAN, 2005). A Figura 5 ilustra a ligação de uma residência à rede coletora (COPASA, 2005).

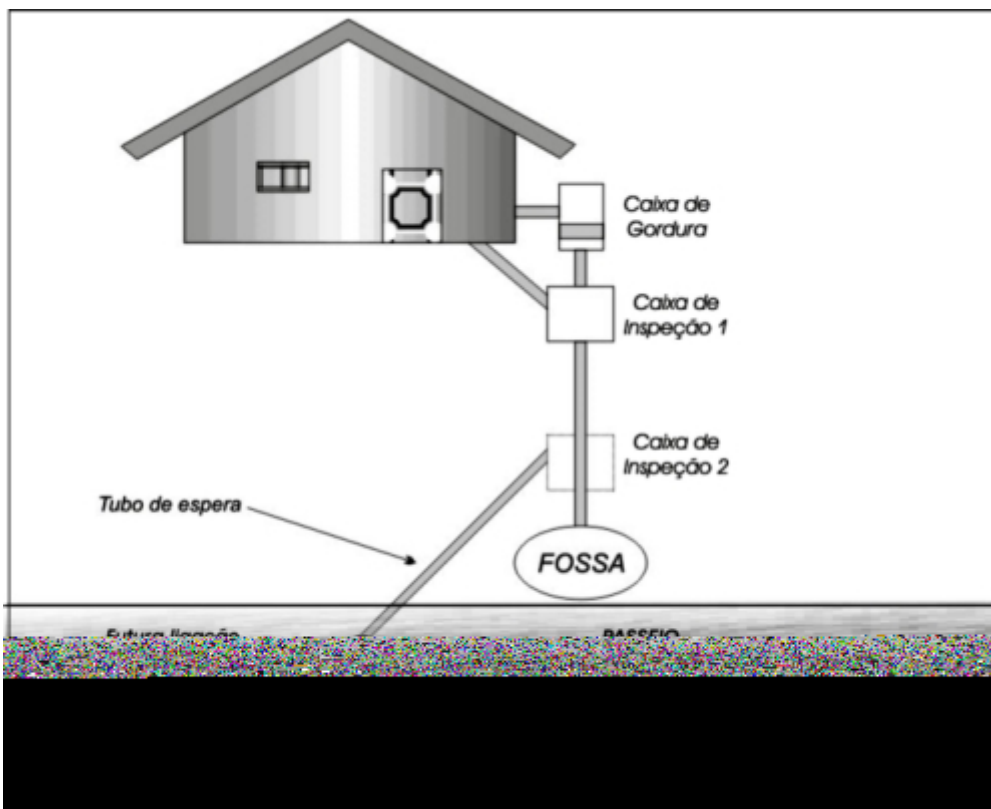


Figura 5 – Rede pública de coleta de esgoto sanitário residencial  
 (Fonte: [http://www.copasa.com.br/media/LigEsgoto\\_3.jpg](http://www.copasa.com.br/media/LigEsgoto_3.jpg) – 02/07/2005)

## 2.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO

Existem vários processos de tratamento de esgoto que se diferenciam, principalmente, pelo grau de tratamento exigido pelo corpo receptor (rios, lagos etc.). Em linhas gerais, consiste em separar as partes líquida e sólida do esgoto, para tratá-las separadamente, reduzindo ao máximo a carga poluidora, de forma que possam ser dispostas adequadamente, sem prejuízo ao meio ambiente (CORSAN, 2005; COPASA, 2005).

As Estações de Tratamento de Esgoto reproduzem, num menor espaço e tempo, a capacidade que os cursos d'água têm naturalmente de decompor a matéria orgânica. Para isso, as bactérias aeróbias ou anaeróbias que se reproduzem em grande quantidade, são utilizadas como agentes de tratamento, degradando a matéria orgânica presente nos esgotos, quando encontram condições favoráveis. Os níveis e a maneira de se tratar os esgotos dependem: da carga orgânica presente, da classificação das

águas do rio que receberá o efluente tratado, da capacidade de autodepuração do rio que receberá o efluente tratado e da disponibilidade de área e energia elétrica. A Figura 6 ilustra o processo de tratamento de esgoto adotado pela SABESP (2005) em suas unidades na Grande São Paulo.

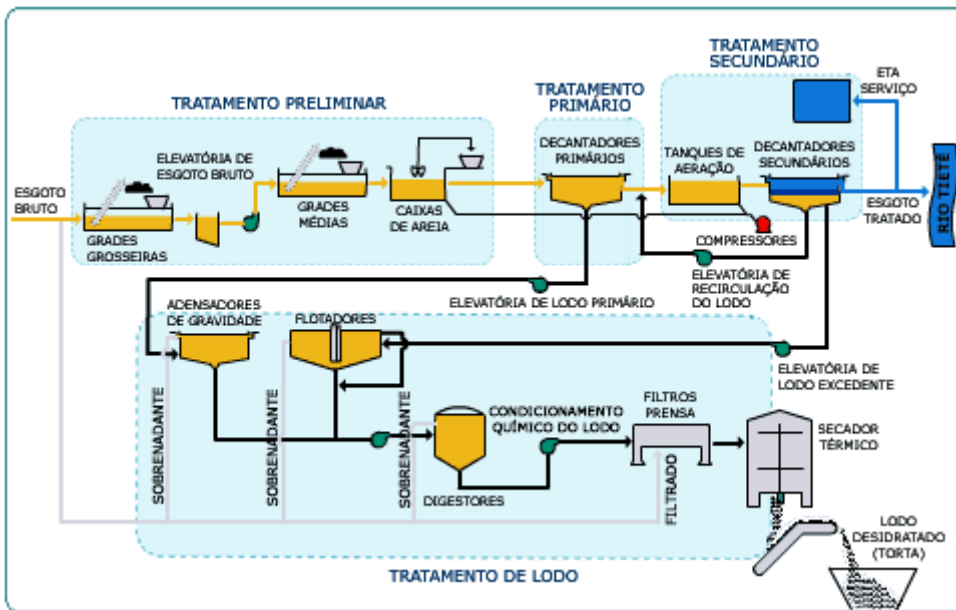


Figura 6 – Etapas do tratamento de esgoto

(Fonte:

[http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/site/tratamento\\_esgoto.gif/\\$File/tratamento\\_esgoto.gif?OpenElement](http://www.sabesp.com.br/sabesp/filesmng.nsf/site/tratamento_esgoto.gif/$File/tratamento_esgoto.gif?OpenElement) – 02/07/2005)

### 2.2.1. Níveis de tratamento

Como parte de um tratamento preliminar, são retirados do esgoto os sólidos grosseiros, como lixo, gordura e areia, utilizando processos físicos, como gradeamento, peneiramento e a sedimentação. A Figura 7 ilustra a etapa de tratamento preliminar (COPASA, 2005).



Figura 7 – Tratamento preliminar do esgoto  
(Fonte: [http://www.copasa.com.br/media/arrudas\\_preliminar.jpg](http://www.copasa.com.br/media/arrudas_preliminar.jpg) – 02/07/2005)

Na Figura 7 é possível observar as áreas onde o esgoto bruto sofre o tratamento

bombas. A Figura 8 ilustra o tratamento do esgoto em nível primário (COPASA, 2005).



Figura 8 – Tratamento primário do esgoto  
(Fonte: [http://www.copasa.com.br/media/arrudas\\_primario.jpg](http://www.copasa.com.br/media/arrudas_primario.jpg) – 02/07/2005)

Na Figura 8 observam-se decantadores primários que têm por objetivo a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis, materiais flutuantes (óleos e graxas) e parte da matéria orgânica em suspensão.

Nesse tratamento primário, o processo é anaeróbico e ocorre através da fermentação, na ausência de oxigênio, sendo os tipos mais comuns o sistema de fossa séptica e o reator anaeróbico de manta de lodo (UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (CARBON, 2007).

O sistema de fossa séptica, também conhecido por filtro anaeróbico, é muito utilizado no Brasil, principalmente no meio rural e em comunidades de pequeno porte. Os sólidos em suspensão se sedimentam no fundo da fossa séptica e formam o lodo onde ocorre a digestão anaeróbia. O líquido se encaminha para o filtro anaeróbico que

possui bactérias que crescem aderidas a uma camada suporte formando a biomassa, que reduz a carga orgânica dos esgotos (CARBON, 2007).

Em um reator anaeróbico de manta de lodo, a biomassa cresce dispersa no meio e não aderida como nos filtros. Esta biomassa, ao crescer, forma pequenos grânulos, que por sua vez, tendem a servir de meio suporte para outras bactérias. O fluxo do líquido é ascendente e são formados gases, normalmente metano e gás carbônico, resultantes do processo de fermentação anaeróbia. A Figura 9 ilustra um reator UASB implantado na Grande Porto Alegre pela Carbon Networks Projetos Ambientais (CARBON, 2007).



Figura 9 – Reator anaeróbico de manta de lodo

(Fonte: <http://www.carbonnetworks.com.br/imagens/reator%20uasb.jpg> – 17/03/2007)

No nível de tratamento secundário, a matéria orgânica e os sólidos em suspensão são removidos do esgoto, por meio de processos biológicos, que utilizam reações bioquímicas, através de microorganismos, tais como bactérias aeróbias, facultativas, protozoários e fungos (CORSAN, 2005; COPASA, 2005).

No processo aeróbio os microorganismos presentes nos esgotos se alimentam da matéria orgânica que constitui esses esgotos, convertendo-a em gás carbônico, água e material celular. Esta decomposição biológica do material orgânico requer a presença de oxigênio e outras condições ambientais adequadas como temperatura, nível do pH, tempo de contato etc. (CORSAN, 2005; COPASA, 2005).

Entre os tipos mais comuns de tratamento secundário estão: lagoas de estabilização, lodos ativados, tratamento aeróbio com biofilme, tanques Imhoff e a disposição no solo. Uma breve descrição desses tipos de tratamento é realizada a seguir (CORSAN, 2005; COPASA, 2005).

Lagoas de estabilização (ou lagoas de oxidação) e suas variantes são lagoas construídas de forma simples, onde os esgotos entram em uma extremidade e saem na oposta, sendo que a matéria orgânica, na forma de sólidos em suspensão, fica depositada no fundo da lagoa, formando um lodo que vai aos poucos sendo estabilizado. O processo se baseia nos princípios da respiração e da fotossíntese, onde as algas existentes no esgoto, na presença de luz, produzem oxigênio que é liberado por meio da fotossíntese. Esse oxigênio dissolvido (OD) é utilizado pelas bactérias aeróbias (respiração) para se alimentarem da matéria orgânica em suspensão e dissolvida, presente no esgoto. O resultado é a produção de sais minerais – alimento das algas – e de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). A Figura 10 ilustra uma lagoa de estabilização (COPASA, 2005).



Figura 10 – Lagoa de estabilização  
(Fonte: <http://www.etg.ufmg.br/tim2/tratamento2.ppt> – 17/03/2007)

Lodos ativados e suas variantes são compostos, essencialmente, por um tanque de aeração (reator biológico), um tanque de decantação (decantador secundário) e uma

bomba de recirculação do lodo. O princípio do sistema é a recirculação do lodo do fundo de uma unidade de decantação para uma de aeração. Em decorrência da recirculação contínua de lodo do decantador e da adição contínua da matéria orgânica, ocorre o aumento da biomassa de bactérias, cujo excesso é descartado periodicamente. A Figura 11 ilustra um tanque de aeração com lodo ativado (MILENIA, 2007).

Figura 11 – Tanque de aeração com lodo ativado

(Fonte: <http://www.milenia.com.br/imagens/desenvolvimento/residuos/foto5.jpg> – 17/03/2007)

Tratamento aeróbio com biofilme é quando os esgotos são aplicados sobre um leito de material grosseiro, como pedras e ripas ou material plástico, e percola em direção a drenos no fundo. Este fluxo do esgoto permite o crescimento de bactérias na superfície do leito, formando uma película de microorganismos. O ar circula nos espaços vazios entre as pedras ou ripas, fornecendo oxigênio para os microorganismos decompor a matéria orgânica. A Figura 12 ilustra um filtro biológico (COPASA, 2005).





Figura 12 – Filtro biológico

(Fonte: <http://www.etg.ufmg.br/tim2/tratamento2.ppt> – 17/03/2007)

Tanque Imhoff é um sistema formado por unidades compactadas que possuem no mesmo tanque os processos de decantação e digestão do lodo, feitos por bactérias anaeróbicas, isto é, que não necessitam de oxigênio. Do tanque Imhoff saem três correntes: esgoto tratado, com redução de sua carga orgânica, biogás gerado no processo de digestão do lodo e o lodo digerido, que vai para o leito de secagem. A Figura 13 ilustra um sistema Imhoff, também conhecido como tanque anaeróbio (COPASA, 2005).



Figura 13 – Tanque anaeróbio ou sistema Imhoff

(Fonte: <http://www.etg.ufmg.br/tim2/tratamento2.ppt> – 17/03/2007)

A disposição de esgoto doméstico no solo como processo de tratamento comunitário é uma prática já antiga adotada pelo homem. Neste processo, o esgoto é absorvido pela camada de solo através de bacias de infiltração. A Figura 14 ilustra uma área preparada para a deposição do esgoto no solo (COPASA, 2005).



Figura 14 – Disposição no solo  
(Fonte: <http://www.etg.ufmg.br/tim2/tratamento2.ppt> – 17/03/2007)

O nível de tratamento terciário visa a remoção de poluentes específicos, sejam micronutrientes e patogênicos, além de outros poluentes não retidos nos tratamentos primário e secundário, sendo utilizado quando há o desejo de se obter um tratamento de qualidade superior para os esgotos. Neste tratamento remove-se compostos como nitrogênio e fósforo, além da remoção completa da matéria orgânica, por meio de processos por radiação ultravioleta, químicos e outros. A Figura 15 ilustra o sistema de tratamento terciário da fábrica da Motorola (CEOLATO, 2003).

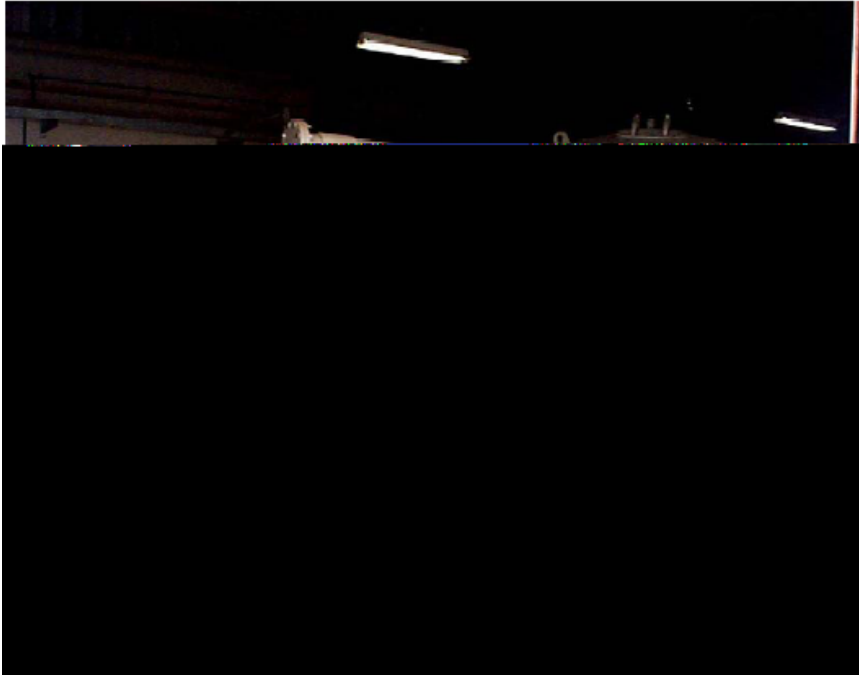


Figura 15 – Sistema de tratamento terciário (CEOLATO, 2003)

O sistema observado na Figura 15 é composto por filtros de Antracito e areia para eliminação de partículas sólidas em suspensão. Após a filtração, são utilizadas lâmpadas ultravioletas para a desinfecção do esgoto, conforme ilustrado na Figura 16 (CEOLATO, 2003).



Figura 16 – Sistema com lâmpadas ultravioleta para desinfecção do esgoto (CEOLATO, 2003)

### 2.2.2. Tratamento do lodo

Todos os processos de tratamento de esgoto resultam em subprodutos: o material gradeado, areia, espuma (bolhas esbranquiçadas), lodo primário e lodo secundário, que devem ser tratados para serem lançados no meio ambiente. Quando o lodo está estabilizado é realizada a disposição do lodo em aterros sanitários ou aplicando como fertilizante na agricultura, após tratamento adequado (CEDAE, 2007).

No caso contrário, ou seja quando o lodo não está estabilizado, alguns processos lhe são aplicados com o intuito de adequá-lo às condições necessárias para o seu descarte. Alguns dos processos são: adensamento, para remoção da umidade; estabilização para remoção da matéria orgânica; condicionamento para preparar para a desidratação; desidratação para remover a umidade, com redução do volume, em leitos de secagem, lagoas de lodo e equipamentos mecânicos; e disposição final em aterros sanitários, aplicação no solo etc. A Figura 17 ilustra um reator anaeróbio utilizado para estabilização do lodo (CEDAE, 2007).

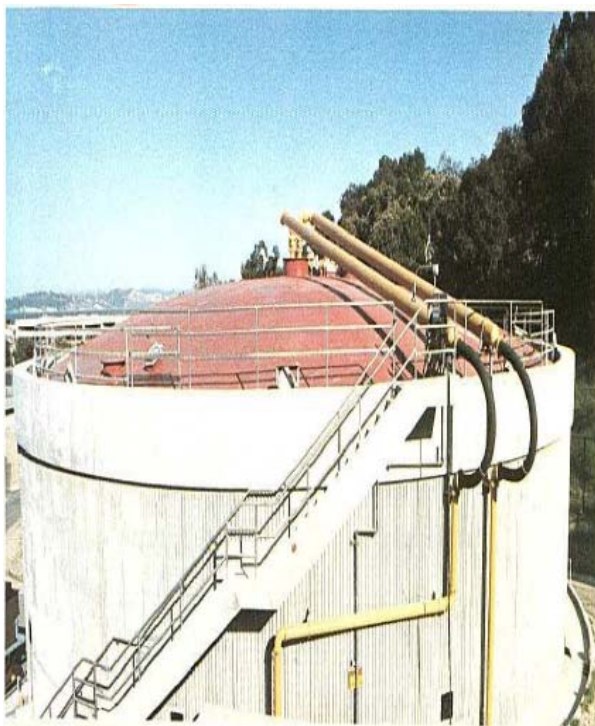


Figura 17 – Digestor anaeróbio para estabilização de lodo  
(Fonte: <http://www.cedae.rj.gov.br> – 17/03/2007)

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO E DO SEU PROCESSO DE TRATAMENTO

Neste item são descritas as principais características do esgoto e de seu processo de tratamento como demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, tempo de retenção hidráulica, aeração, oxigênio dissolvido, potencial de hidrogênio, turbidez e total de sólidos dissolvidos.

### 2.3.1. Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)

A demanda bioquímica de oxigênio é o parâmetro mais utilizado para a medição da carga poluidora de um resíduo. A DBO, com frequência, é referida como um poluente presente na água, o que é equivocado, pois é um meio utilizado para mensurar a carga de poluentes de uma água residual, que contém inúmeros poluentes compostos de muitos e variados tipos de materiais orgânicos e inorgânicos, os quais são difíceis de serem mensurados individualmente (SAAEG, 2005).

Os micro-organismos demandam oxigênio ao se alimentarem das substâncias orgânicas presentes nos poluentes, assim, quanto maior a quantidade de poluentes, maior será a quantidade de oxigênio requerida para a alimentação dos micro-organismos. Desta forma, a quantidade de oxigênio necessária aos micro-organismos para removerem as substâncias orgânicas das águas residuais é utilizada como parâmetro principal para quantificar a carga poluidora de uma corrente (SAAEG, 2005).

Um sistema de tratamento de esgotos eficiente, normalmente, deverá ter uma taxa de remoção de DBO solúvel igual ou superior a 90%, contudo, antes de considerar um sistema ineficiente, com baixa taxa de remoção de DBO, devem ser observadas as seguintes condições: Todas as análises de DBO que forem realizadas para verificar estas condições devem ser realizadas em amostras filtradas; A DBO solúvel do efluente deve ser maior do que a de projeto ou das concentrações da

apuração normal (SAAEG, 2005). A equação (1) representa a ponderação necessária para que se obtenha a eficiência de remoção de DBO.

$$E_r = \frac{(DBO_{\text{afluente}} - DBO_{\text{efluente}})}{DBO_{\text{afluente}}} \times 100\% \quad (1)$$

O teste de DBO tem como desvantagem requerer cinco dias para estar completo. Esse é um tempo muito longo se for levada em conta a tomada de decisões dentro de uma planta. Por isso, foi desenvolvido o teste da demanda química de oxigênio (DQO), utilizado para estimar a DBO, com a utilização de substâncias químicas em lugar dos micro-organismos para quebrar (oxidar) os poluentes contidos nas águas residuais. Esse teste demora três horas para ser concluído (SAAEG, 2005).

### 2.3.2. Demanda química de oxigênio (DQO)

Esse método de análise tem por objetivo mensurar a quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica. Consiste em oxidar uma amostra de matéria orgânica com um agente oxidante, por exemplo dicromato de potássio, em meio ácido, por exemplo ácido sulfúrico. A DQO em um despejo, geralmente, é mais alta que a DBO, devido à maior facilidade de oxidação do composto por via química do que por via biológica (SAAEG, 2005).

### 2.3.3. Tempo de retenção hidráulica (tr)

O tempo de retenção de um decantador primário é o período de tempo que os esgotos permanecem dentro do tanque. Esse período pode ser obtido ao relacionar-se o volume do tanque com a vazão afluyente, equação (2).

$$tr = \frac{V_d \left[ \frac{m^3}{h} \right]}{Q_a \left[ \frac{m^3}{h} \right]} \quad (2)$$

O tempo de retenção também pode ser obtido com base na altura de uma unidade e na velocidade média do líquido ou velocidade de subida no tanque, equação (3).

$$tr = \frac{h_u \left[ \frac{m}{h} \right]}{v \left[ \frac{m}{h} \right]} \quad (3)$$

Ao se observar a operação dos decantadores primários é possível perceber que tempos de retenção superiores a duas horas apresentam acréscimos na remoção de sólidos suspensos e na remoção de DBO, além da possibilidade de provocar a fermentação dos lodos e a septicidade dos esgotos dentro do decantador, principalmente quando sujeitos a clima tropical (SAAEG, 2005).

#### 2.3.4. Aeração

A aeração é o processo de inserção de ar em um líquido, no processo de tratamento de esgotos por lodos ativados, por um ou mais dos seguintes métodos básicos: aspersão do líquido no ar, como ocorre, por exemplo, na irrigação por aspersão da água de esgoto tratada; insuflação do ar no líquido, como ocorre, por exemplo, na aeração por ar difuso, no processo de tratamento de esgotos por lodos ativados; agitação do líquido para promover a absorção superficial, como ocorre, por exemplo, na aeração mecânica, no processo de tratamento de esgotos por lodos ativados; e escoamento do líquido, em camadas muito finas, sobre um vertedor ou sobre degraus (SAAEG, 2005; COPASA, 2005).

Essa operação visa fornecer o oxigênio necessário para os micro-organismos do lodo ativado e em provocar a agitação e a homogeneização suficiente para assegurar um contato íntimo entre o meio vivo, os elementos poluentes e o oxigênio introduzido (SAAEG, 2005).

### **2.3.5. Oxigênio dissolvido (OD)**

O oxigênio dissolvido (OD) indica o grau de arejamento da água, sendo um excelente indicativo de sua qualidade. Sua presença é importante para a sobrevivência dos seres aquáticos aeróbios, sendo inserido no recurso hídrico por meio da fotossíntese, da ação de aeradores ou do próprio contato com o ar atmosférico. Por outro lado, sua ausência propicia a vida dos micro-organismos anaeróbios (SAAEG, 2005).

### **2.3.6. Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico (pH)**

O monitoramento do potencial de hidrogênio de uma água permite avaliar seu poder de corrosão, da quantidade de reagentes necessários à coagulação e do crescimento de micro-organismos. Com o intuito de aumentar a eficiência do processo de desinfecção da água, é recomendado manter o pH da mesma um pouco abaixo de sete, porém, a água em condição de re-uso pode ter seu valor de pH entre seis e nove e meio (ENASA, 2005; SAAEG, 2005).

### **2.3.7. Turbidez**

Indica a presença de partículas em estado coloidal, em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, plâncton e outros micro-organismos. Uma água para ser considerada adequada ao re-uso deve estar com valores que não ultrapassem a cinco unidades de turbidez – UT. A sua medida é realizada pela comparação da intensidade luminosa espalhada pela superfície da água em condições pré-definidas com a intensidade em uma amostra padrão. Quanto maior seja a intensidade da luz espalhada, maior será a turbidez (ENASA, 2005; SAAEG, 2005).



### 2.3.8. Total de sólidos dissolvidos (TSD)

O total de sólidos dissolvidos (TSD) é um parâmetro que corresponde ao peso total das substâncias dissolvidas na água, incluindo matéria orgânica, minerais e outras substâncias inorgânicas, voláteis ou não, por unidade de volume. Esse valor pode ser estimado a partir da condutividade da água (equação (4)) e altos valores indicam uma qualidade inferior da água (ENASA, 2005; SAAEG, 2005).

$$\text{TSD} \approx rs + \frac{1}{2} \cdot \text{ppm} \cdot \text{CO}_3\text{H}^- \quad (4)$$

## **CAPÍTULO 3 DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DO CUSTO DE TRATAMENTO DE ESGOTO BASEADA NA UTILIZAÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL**

Neste capítulo é desenvolvida uma metodologia baseada na utilização do diagrama funcional termoeconômico que será posteriormente aplicado para a alocação dos custos dos produtos gerados na mini-ETE já implantada na UNESP de Guaratinguetá. A metodologia é baseada na identificação das funções do sistema como um todo e de cada unidade individualmente, na construção do diagrama funcional termoeconômico, na formulação do problema de custo do tratamento de esgoto e na solução do sistema de equações de custos dos produtos associados (SILVEIRA, 1998).

### **3.1. IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA**

O primeiro passo para a determinação dos custos associados ao sistema é a identificação de seus componentes. Assim, para cada sistema ter-se-á uma solução particular, haja vista a dependência da sua configuração específica e de suas particularidades.

Com vistas à melhor compreensão desta etapa, é construída a representação física da configuração da planta (Figura 18), onde fica estabelecida a função do sistema como um todo e de cada unidade individualmente, tendo-se em consideração que a função global representativa do sistema depende do propósito ou objetivo da planta e que cada componente da planta tem a sua importância relacionada à sua finalidade no sistema.

Para esse desenvolvimento foi utilizada uma planta composta por Biodigestor anaeróbio, Gasômetro, Filtro para remoção de H<sub>2</sub>S e MCI, doravante denominado sistema BGFM. A Figura 18 ilustra o diagrama de processo simplificado como modelo de referência para a melhor compreensão das etapas constituintes da metodologia elaborada.

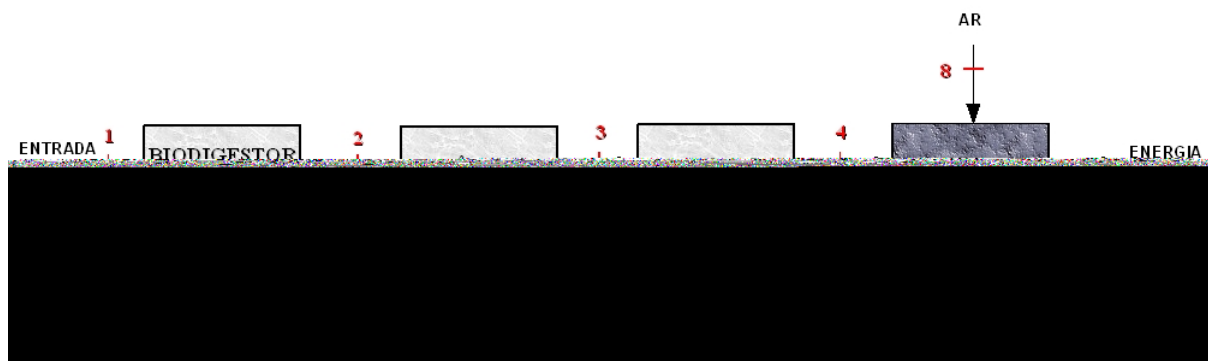


Figura 18 – Diagrama de processo para o sistema BGFM

A partir do diagrama de processo para o sistema BGFM é elaborada a Tabela 1 que relaciona todas as características termodinâmicas do sistema considerado: tipo de fluido, vazão, pressão, temperatura, entalpia, entropia e exergia específica (ou PCI, quando for o caso). Essas características devem ser referentes a cada ponto do processo, que está devidamente indicado no diagrama de processo.

Tabela 1 – Representação das características termodinâmicas do sistema BGFM

<i>Ponto</i>	<i>Fluido</i>	<i>Vazão kg/s</i>	<i>Pressão MPa</i>	<i>Temperatura K</i>	<i>Entalpia Específica kJ/kg</i>	<i>Entropia Específica kJ/kg.K</i>	<i>Exergia Específica kJ/kg</i>
1	esgoto	0,0160806	0,200	298,15	105	0,3673	104,8
2	biogás	0,0005789	0,160	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
3	biogás	0,0005789	0,200	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
4	biogás	0,0005789	0,160	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
5	biofertilizante	0,0000027	0,200	299,15	109,2	0,3813	5.477,06 <sup>(*)</sup>
6	água de esgoto	0,0154989	0,180	299,15	109,2	0,3813	125,7
7	gases de exaustão	0,0096105	0,300	450	-	-	31,85 <sup>(**)</sup>
8	ar	0,0090316	0,200	298,15	-	-	0,0016816 <sup>(***)</sup>

(\*) As exergias específicas do biogás e do biofertilizante são seus próprios PCI.

(\*\*) A exergia específica dos gases de exaustão é calculada por

$$ex_{ge} = cp_{ge} \cdot \left[ (T_{ge} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T_{ge}}{T_0} \right) \right].$$

(\*\*\*) A exergia específica do ar é calculada por  $ex_{ar} = cp_{ar} \cdot \left[ (T_{ar} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T_{ar}}{T_0} \right) \right].$

A Tabela 1 foi construída com dados obtidos de Godoy Júnior, Silveira e Giacaglia (2004) para vazão, temperatura e pressão, sendo entalpia, entropia e exergia específica calculados com o programa aplicativo CATT2 (BORGNAKKE; SONNTAG; VAN WYLEN, 2003) ou consultados em Silveira (1998).

Segundo Beduschi et al (1983) é possível estimar-se a produção de biofertilizante como sendo equivalente a 0,017% do esgoto que é tratado em sistemas baseados em biodigestão anaeróbia e 0,05% do biogás gerado durante esse tratamento.

De acordo com Guardabassi e Pires (2006) a relação entre o biogás produzido e o esgoto residencial tratado por biodigestão anaeróbia é entre 20% e 30%, conforme a quantidade de sólidos existentes no efluente.

Em Martins, Guardabassi e Costa (2006) observa-se que essa mesma relação para uma ETE da SABESP cai para valores em torno de 3,6%, haja vista a maior incidência de água oriunda das chuvas e de instalações comerciais e industriais, que têm maior concentração de água do que o esgoto residencial.

Deve ser salientado que cada ponto do sistema representa o fluido que entra e/ou sai da unidade, por exemplo biogás, ar e água, podendo haver mais de um fluido, que entra ou sai de cada unidade.

Algumas considerações são observadas e relacionadas para utilização nas análises a serem realizadas. Um dia de funcionamento da mini-estação de tratamento de esgoto corresponde a 10 horas de operação, sendo previstos 365 dias de funcionamento por ano. Além disso, são considerados os valores de 22.000 kJ/Nm<sup>3</sup> (28.500 kJ/kg) para o poder calorífico inferior do biogás, 1,005 kJ/kg.K para o ar ambiente e 1,094 kJ/kg.K para o calor específico a pressão constante dos gases de exaustão (SILVEIRA, 1998; GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004), além de 0,001003 m<sup>3</sup>/kg para o volume específico da água a 25°C (BORGNAKKE;

SONNTAG; VAN WYLEN, 2003) e de 1.316,6 kcal/kg (5.477,056 kJ/kg) para o poder calorífico inferior do biofertilizante, baseado em resíduo alimentar (OLIVEIRA, 2001).

Para a estimativa da massa do biogás produzido pelo sistema BGFM são adotadas as CNTP e que, para essas condições, um mol de biogás corresponde a 22,4 litros ou  $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$  de biogás com 70% de metano em sua composição (RUSSELL, 1994).

A massa molecular de um mol do biogás produzido no sistema BGFM pode ser representada por (GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004):

$$M_{\text{bg}} = 0,70 \cdot \text{CH}_4 + 0,25 \cdot \text{CO}_2 + 0,05 \cdot \text{N}_2 \quad (5)$$

sendo que as massas atômicas são: C = 12 g/mol; H = 1 g/mol; O = 16 g/mol; e N = 14 g/mol.

Assim, a massa molecular do mol do biogás produzido no sistema BGFM é equivalente a

$$M_{\text{bg}} = 0,70 \cdot (12 + 1 \cdot 4) + 0,25 \cdot (12 + 16 \cdot 2) + 0,05 \cdot (14 \cdot 2) = 23,60 \text{ g/mol} \quad (6)$$

$$\dot{m}_{\text{bg}} = \frac{M_{\text{bg}}}{V_{\text{bg}}} = \frac{23,60 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}{22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}} = 1,0535 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (7)$$

Considerando um poder calorífico inferior para o biogás de 22.000 kJ/Nm<sup>3</sup> e uma densidade específica ( $\rho$ ) para o biogás produzido com 70% de metano de 0,77 kg/Nm<sup>3</sup>, é possível estimar o PCI<sub>bg</sub> em kJ/kg:

$$\text{PCI}_{\text{bg}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] = \frac{\text{PCI}_{\text{bg}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right]}{\rho_{\text{bg}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \right]} = \frac{22.000 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3}}{0,77 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}} = 28.500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}. \quad (8)$$

### 3.2. CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMoeCONÔMICO

De acordo com o método desenvolvido por Silveira (1998), o diagrama funcional termoeconômico é ferramenta fundamental para a análise que se pretende realizar.

Fundamentalmente, o diagrama funcional termoeconômico é composto por figuras geométricas que representam as unidades constituintes da planta que está sendo analisada e os processos que interagem com essa planta e de uma rede de linhas que representam as funções unitárias em termos exergéticos.

A notação adotada nos diagramas funcionais termoeconômicos é:

$Y$  – funções exergéticas (em base incremental);

$Y_{i,j}$  –  $j$ -ésima entrada à  $i$ -ésima unidade;

$Y_{i,k}$  –  $k$ -ésima saída da  $i$ -ésima unidade.

Com base no diagrama de processo construído, Figura 18, é elaborado o diagrama funcional termoeconômico para o sistema BGFM, conforme ilustrado na Figura 19.

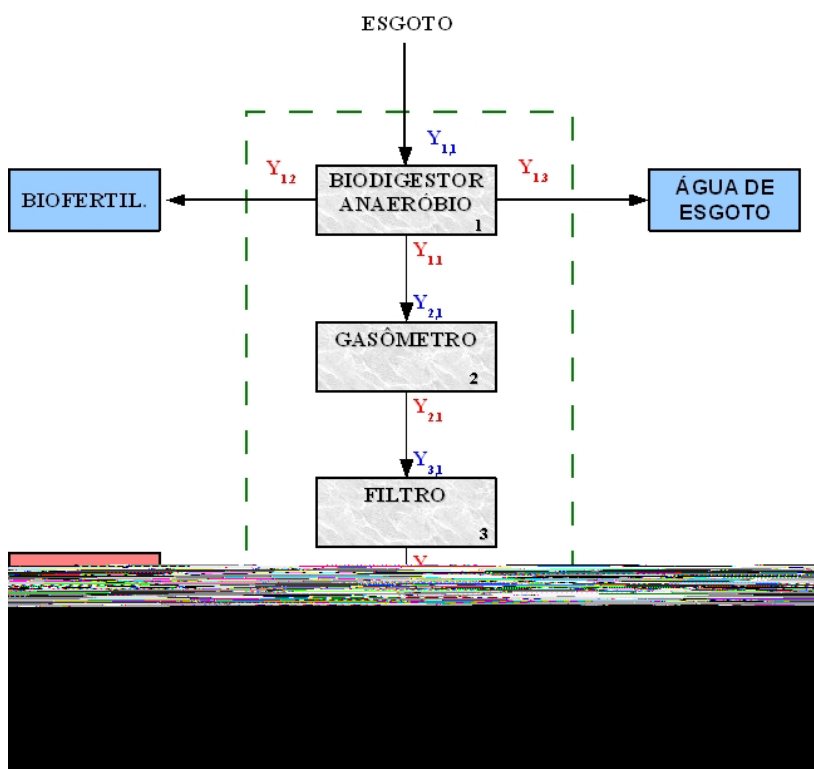


Figura 19 – Diagrama funcional termoeconômico para o sistema BGFM

Cada unidade recebe um número de identificação que é transposto do diagrama de processo para o diagrama funcional termoeconômico do sistema. Também deve ser observado que os fluxos considerados se referem aos incrementos exergéticos e não ao valor absoluto dessa propriedade termodinâmica.

A função da linha funcional de fronteira é separar os insumos e os produtos do sistema e do meio exterior, sendo que, apesar dessa separação, o diagrama funcional termoeconômico considera os processos externos ao sistema.

### 3.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO

A formulação do custo do tratamento de esgoto visa a modelagem matemática que associe parâmetros termodinâmicos (em base exergética) a custos. Ela tem sido utilizada como ferramenta auxiliar nas decisões de operação e de seleção de equipamentos, e, desse modo, no projeto de plantas térmicas (SILVEIRA, 1998). Tais conceitos podem ser utilizados para a elaboração do problema de alocação dos custos de tratamento de esgoto.

A equação (9) pode representar a função objetivo do problema de otimização termoeconômica do sistema BGFM, onde a meta é obter o custo de manufatura exergética ( $CM_{ex}$ ) a partir dos custos dos produtos da mini-estação.

$$CM_{ex} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{h}} \right] = \sum_i c_i \cdot Y_{i,k} \quad (9)$$

Na equação (9), os índices  $i$  e  $k$  representam os produtos associados ao sistema BGFM, como a água de esgoto, o biofertilizante, a eletricidade etc. O índice  $i$  representa a unidade a que pertence o insumo e o índice  $k$ , à sua  $k$ -ésima saída.

Especificamente nesse caso,  $c_i$  representa o custo exergético do produto do sistema BGFM em US\$/kWh e  $Y_{i,k}$  a exergia em kW associada ao referido produto.

### 3.3.1. Determinação das expressões para as funções exergéticas (restrições)

A partir do diagrama de processo ilustrado na Figura 18 e dos valores das propriedades termodinâmicas indicadas na Tabela 1, pode-se determinar os valores dos fluxos exergéticos em base incremental, associados ao diagrama funcional termoeconômico ilustrado na Figura 19. Vale salientar que cada unidade presta a sua própria contribuição exergética ao sistema.

A seguir são relacionadas as equações referentes aos insumos e produtos destacado no diagrama funcional (Figura 19), com o intuito de determinar as restrições do sistema BGFM.

Para o desenvolvimento deste trabalho, o biofertilizante foi considerado com 40% de umidade, por isso em  $Y_{1,2}$  aparecem as proporções da parte sólida (0,6) e da parte úmida (0,4).

#### Unidade 1: Biodigestor Anaeróbio

$$Y_{1,1} = \dot{m}_1 \cdot [(h_1 - h_0) - T_1 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (10)$$

$$Y_{1,1} = \dot{m}_2 \cdot PCI_{bg} \quad (11)$$

$$Y_{1,2} = [0,6 \cdot (\dot{m}_5 \cdot PCI_{bf})] + \{0,4 \cdot \dot{m}_5 \cdot [(h_5 - h_1) - T_5 \cdot (s_5 - s_1)]\} \quad (12)$$

$$Y_{1,3} = \dot{m}_6 \cdot [(h_6 - h_1) - T_6 \cdot (s_6 - s_1)] \quad (13)$$

#### Unidade 2: Gasômetro

$$Y_{2,1} = Y_{1,1} \quad (14)$$

$$Y_{2,1} = \dot{m}_3 \cdot PCI_{bg} \quad (15)$$

#### Unidade 3: Filtro

$$Y_{3,1} = Y_{2,1} \quad (16)$$

$$Y_{3,1} = \dot{m}_4 \cdot PCI_{bg} \quad (17)$$



#### Unidade 4: Motor de Combustão Interna

$$Y_{4,1} = Y_{3,1} \quad (18)$$

$$Y_{4,2} = \dot{m}_8 \cdot c_{p_{ar}} \cdot \left[ (T_8 - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T_8}{T_0} \right) \right] \quad (19)$$

$$Y_{4,1} = E_p \quad (20)$$

$$Y_{4,2} = \dot{m}_7 \cdot c_{p_{ge}} \cdot \left[ (T_7 - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T_7}{T_0} \right) \right] \quad (21)$$

A Tabela 2 relaciona os valores dos fluxos exergéticos associados às unidades descritas nos diagramas de processo e funcional, ilustrados respectivamente nas Figuras 18 e 19.

Tabela 2 – Valores dos fluxos exergéticos associados ao sistema BGMF

Unidade 1: Biodigestor			Unidade 2: Gasômetro			Unidade 3: Filtro			Unidade 4: MCI		
	Valor	Un.		Valor	Un.		Valor	Un.		Valor	Un.
Y <sub>1,1</sub>	0	kW	Y <sub>2,1</sub>	16,5	kW	Y <sub>3,1</sub>	16,5	kW	Y <sub>4,1</sub>	16,5	kW
Y <sub>1,1</sub>	16,5	kW	Y <sub>2,1</sub>	16,5	kW	Y <sub>3,1</sub>	16,5	kW	Y <sub>4,2</sub>	0,00001519	kW
Y <sub>1,2</sub>	0,00898	kW							Y <sub>4,1</sub>	3,3	kW
Y <sub>1,3</sub>	0,0001844	kW							Y <sub>4,2</sub>	0,30613	kW

#### 3.3.2. Determinação das equações matemáticas dos custos dos produtos associados

O objetivo da determinação destas equações matemáticas é obter o custo exergético da manufatura (custo operacional), que é constituído fundamentalmente pelos custos de produção dos insumos relacionados, dependendo diretamente do tipo do sistema considerado.

A determinação das equações matemáticas dos custos dos produtos associados é efetuada a partir da análise do modelo estrutural baseado em custos associados à manufatura, em base exergética, ilustrado na Figura 20, que relaciona os custos

alocados em função da unidade constituinte do sistema como um todo.



Figura 20 – Modelo estrutural baseado em custos para o sistema BGFM

Para o modelo estrutural elaborado, as unidades têm associados os custos da produção de biofertilizante ( $c_{bf}$ ), de água de esgoto ( $c_{ae}$ ), de biogás ( $c_{bg}$ ) e de eletricidade ( $c_{el}$ ). Assim, o custo de manufatura exergetico ( $CM_{ex}$ ) pode ser definido por

$$CM_{ex} = c_{ae} \cdot Y_{1.3} + c_{bf} \cdot Y_{1.2} + c_{el} \cdot Y_{4.1} \quad (22)$$

Para essa formulação, são relacionados a seguir os custos referentes a esses produtos gerados no sistema composto por biodigestor anaeróbio, gasômetro, filtro e motor, equações (23) a (29).

$$fp_{ae} = \frac{Y_{1.3}}{Y_{1.2} + Y_{1.3} + Y_{3.1}} \quad (23)$$

$$c_{ae} = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot Y_{1.3}} + c_{OM_A} \right) \cdot fp_{ae} \quad (24)$$

$$fp_{bf} = \frac{Y_{1.2}}{Y_{1.2} + Y_{1.3} + Y_{3.1}} \quad (25)$$

$$c_{bf} = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot Y_{1.2}} + c_{OM_A} \right) \cdot fp_{bf} \quad (26)$$

$$fp_{bg} = \frac{Y_{3,1}}{Y_{1,2} + Y_{1,3} + Y_{3,1}} \quad (27)$$

$$c_{bg} = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot Y_{3,1}} + c_{OM_A} \right) \cdot fp_{bg} \quad (28)$$

$$c_{el} = \frac{I_{el} \cdot f}{H \cdot Y_{4,1}} + c_{OM_{el}} + c_{bg} \cdot \frac{Y_{3,1}}{Y_{4,1}} \quad (29)$$

### 3.3.3. Cálculo dos custos associados ao sistema BGM

Para o desenvolvimento dos cálculos referentes aos custos associados aos produtos do sistema BGM devem ser considerados alguns valores estabelecidos anteriormente na literatura (SILVEIRA, 1998; GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004). Essas considerações iniciais estão relacionadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Considerações iniciais tomadas como referência

<i>Variável</i>	<i>Valor</i>	<i>Variável</i>	<i>Valor</i>
<b>H (h/ano)</b>	3.650	<b>I<sub>r</sub> (US\$)</b>	300,00
<b>E<sub>P</sub> (kW)</b>	3,3	<b>C<sub>OMr</sub> (US\$/m<sup>3</sup>)</b>	0,00100
<b>I<sub>el</sub> (US\$)</b>	800,00	<b>Q<sub>bg</sub> (Nm<sup>3</sup>/h)</b>	0,002
<b>C<sub>OMel</sub> (US\$/kWh)</b>	0,00600	<b>Q<sub>ap</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	0,056
<b>I<sub>A</sub> (US\$)</b>	2.000,00	<b>Q<sub>at</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	0,056
<b>C<sub>OMa</sub> (US\$/kWh)</b>	0,00100	<b>Q<sub>bf</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	0,00001
<b>I<sub>AA</sub> (US\$)</b>	500,00	<b>Q<sub>es</sub> (m<sup>3</sup>/h)</b>	0,06
<b>C<sub>OMaa</sub> (US\$/kWh)</b>	0,00100		

Os valores relacionados na Tabela 3 são aplicados às equações (23) a (29), que foram desenvolvidas neste capítulo, para obter os custos dos produtos do sistema BGM para as condições de análise estabelecidas: taxas de juros de 4, 8, 12 e 16 %a.a.

e períodos de amortização de 2, 4, 6, 8 e 10 anos.

As equações (30) e (31) são utilizadas para o cálculo do fator de anuidade necessário ao desenvolvimento dos cálculos dos custos dos produtos associados ao sistema BGFM (Tabela 4), à mini-ETE (Tabela 8) e ao sistema comercialmente disponível (Tabela 12).

$$f = \frac{q^k \cdot (q - 1)}{q^k - 1} \quad (30)$$

onde:

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (31)$$

Tabela 4 – Valores dos custos para o sistema BGFM nas diversas condições de análise

r (%aa)	k (anos)	q	f	c <sub>ae</sub> (US\$/kWh)	c <sub>bf</sub> (US\$/kWh)	c <sub>bg</sub> (US\$/kWh)	c <sub>el</sub> (US\$/kWh)	CM <sub>ex</sub> (US\$/h)
4	2	1,04	0,53	0,018	0,018	0,019	0,134	0,443
4	4	1,04	0,28	0,009	0,009	0,010	0,075	0,248
4	6	1,04	0,19	0,006	0,006	0,007	0,055	0,183
4	8	1,04	0,15	0,005	0,005	0,006	0,045	0,150
4	10	1,04	0,12	0,004	0,004	0,005	0,040	0,131
8	2	1,08	0,56	0,019	0,019	0,020	0,141	0,466
8	4	1,08	0,30	0,010	0,010	0,011	0,081	0,268
8	6	1,08	0,22	0,007	0,007	0,008	0,061	0,202
8	8	1,08	0,17	0,006	0,006	0,007	0,051	0,170
8	10	1,08	0,15	0,005	0,005	0,006	0,046	0,151
12	2	1,12	0,59	0,020	0,020	0,021	0,148	0,490
12	4	1,12	0,33	0,011	0,011	0,012	0,087	0,289
12	6	1,12	0,24	0,008	0,008	0,009	0,067	0,223
12	8	1,12	0,20	0,007	0,007	0,008	0,058	0,191
12	10	1,12	0,18	0,006	0,006	0,007	0,052	0,172
16	2	1,16	0,62	0,021	0,021	0,022	0,156	0,514
16	4	1,16	0,36	0,012	0,012	0,013	0,094	0,310
16	6	1,16	0,27	0,009	0,009	0,010	0,074	0,244
16	8	1,16	0,23	0,008	0,008	0,009	0,064	0,213
16	10	1,16	0,21	0,007	0,007	0,008	0,059	0,195

A Tabela 4 relaciona os valores dos custos dos produtos do sistema BGFM, assim como os fatores de anuidade, para as condições de análise estabelecidas, sendo

que os períodos de amortização e as taxas de juros estão baseadas nos valores praticados comercialmente, orientados pelo Banco Central do Brasil (BACEN, 2006).

Após serem estabelecidos os custos dos produtos gerados pelo sistema BGFM, esses valores são transportados para gráficos que permitem visualizar o desempenho de tais custos em função dos períodos de amortização do capital adotados. As Figuras 21 a 24 ilustram o desempenho dos custos da água de esgoto, do biofertilizante, do biogás e da eletricidade.

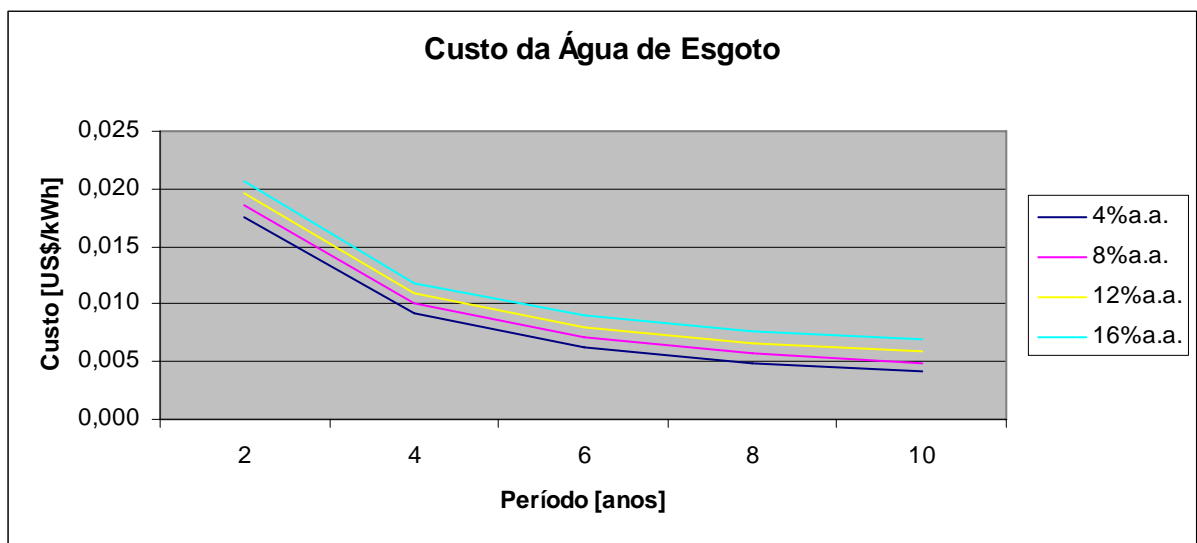


Figura 21 – Custos da água de esgoto pré-tratada pelo sistema BGFM

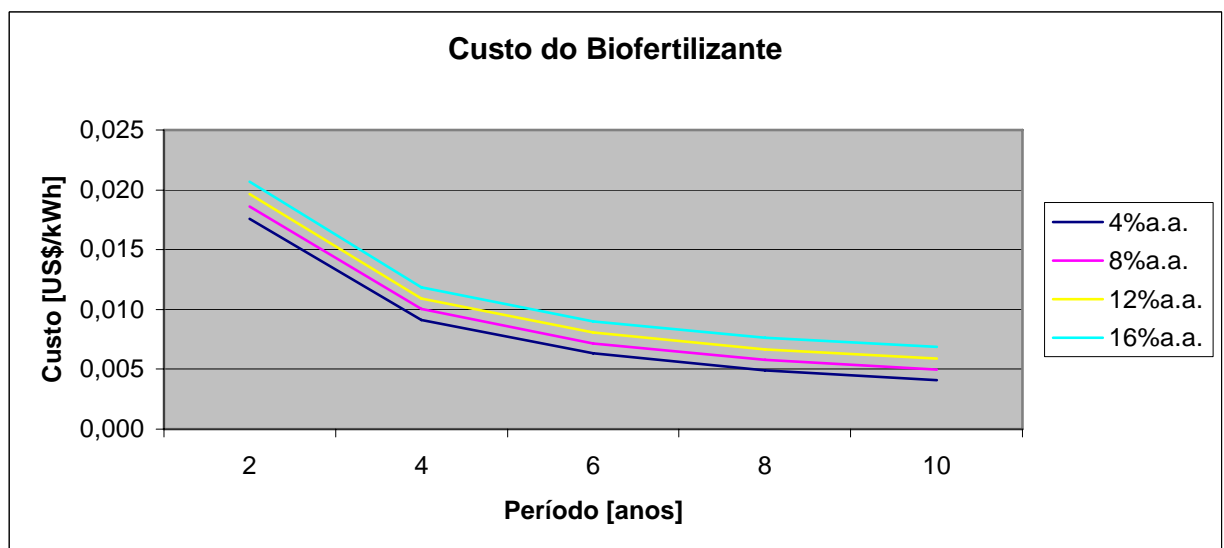


Figura 22 – Custos do biofertilizante produzido pelo sistema BGFM

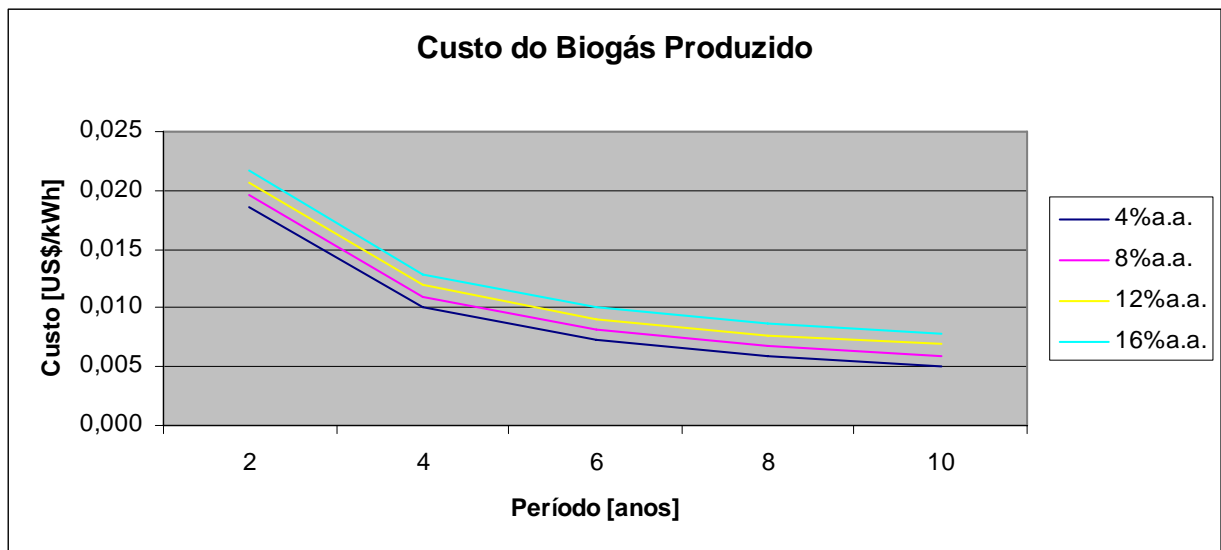


Figura 23 – Custos do biogás produzido pelo sistema BGFM

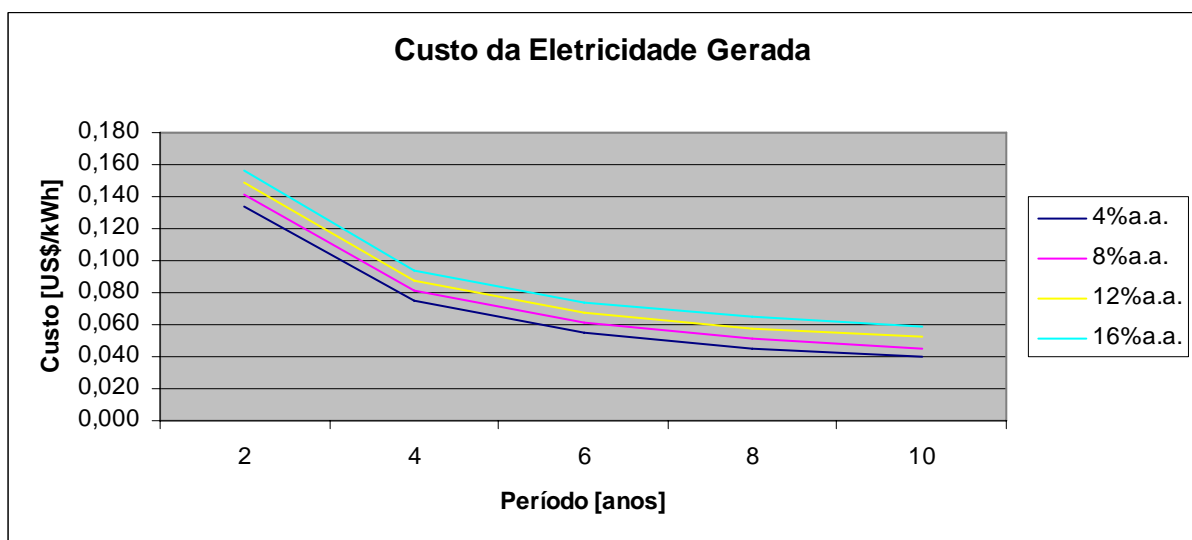


Figura 24 – Custos da eletricidade gerada no MCI do sistema BGFM

Esses gráficos possibilitam observar o período de retorno do capital investido (*payback*) no sistema BGFM de acordo com o desempenho de cada um dos produtos associados.

A Figura 25 ilustra o custo de manufatura exergetico ( $CM_{ex}$ ) do sistema BGFM, considerando os custos dos produtos e suas exergias.

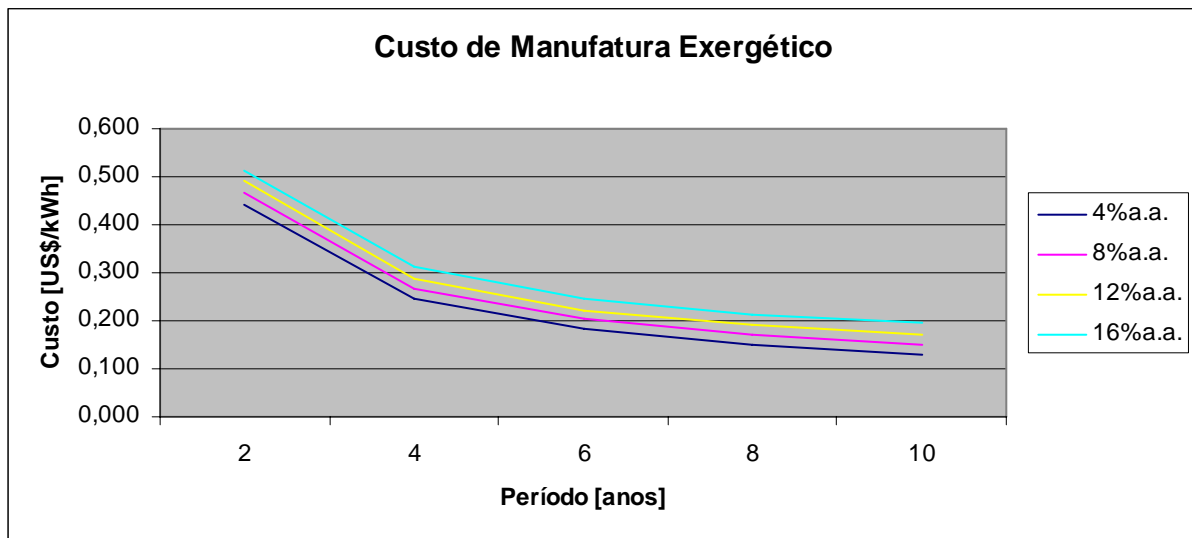


Figura 25 – Custo de manufatura exergético do sistema BGFM

### 3.3.4. Estudo da viabilidade econômica

Tendo como referência os valores praticados pelas concessionárias do serviço de fornecimento de energia elétrica no território nacional, além das taxas de juros e períodos de amortização adotados, é realizado o levantamento das receitas de capital para as condições estabelecidas.

A equação (32) apresenta a relação entre os custos da eletricidade produzida pelo sistema BGFM, pela média nacional das concessionárias do serviço de fornecimento de energia elétrica, pelos custos da água tratada e pela média nacional das concessionárias do serviço de tratamento de águas e esgotos.

$$R \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right] = \left\{ \left[ (P_{el} - c_{el}) \cdot E_p \right] + \left[ (P_{ac} - c_{ac}) \cdot Q_{ac} \right] \right\} \cdot H \quad (32)$$

Como o sistema BGFM não prioriza o tratamento de esgoto, foram considerados os valores de tratamento de esgoto calculados para a mini-ETE (Capítulo 4).

A seguir, a Tabela 5 relaciona os valores calculados, considerando valor médio de tarifação praticado no País, que é de US\$ 70,00/MWh, segundo a ANEEL (2006), e o valor de US\$ 0,70/m<sup>3</sup>

GIACAGLIA, 2004).

Tabela 5 – Valores da receita para o sistema BGFM nos períodos observados

<b>r</b> (%aa)	<b>k</b> (anos)	<b>P<sub>el</sub>-C<sub>el</sub></b> (US\$/kWh)	<b>E<sub>P</sub></b> (kW)	<b>P<sub>ae</sub>-C<sub>ae</sub></b> (US\$/m <sup>3</sup> )	<b>Q<sub>ae</sub></b> (m <sup>3</sup> /h)	<b>H</b> (h/ano)	<b>R</b> (US\$/ano)
4	2	-0,064	3,3	0,573492	0,056	3650	-655,720
4	4	-0,005	3,3	0,633306	0,056	3650	69,207
4	6	0,015	3,3	0,653203	0,056	3650	310,355
4	8	0,025	3,3	0,663121	0,056	3650	430,559
4	10	0,030	3,3	0,669047	0,056	3650	502,386
8	2	-0,071	3,3	0,566313	0,056	3650	-742,735
8	4	-0,011	3,3	0,627099	0,056	3650	-6,018
8	6	0,009	3,3	0,647202	0,056	3650	237,626
8	8	0,019	3,3	0,657135	0,056	3650	358,019
8	10	0,024	3,3	0,663003	0,056	3650	429,131
12	2	-0,078	3,3	0,559049	0,056	3650	-830,763
12	4	-0,017	3,3	0,620685	0,056	3650	-83,757
12	6	0,003	3,3	0,640882	0,056	3650	161,036
12	8	0,012	3,3	0,650727	0,056	3650	280,354
12	10	0,018	3,3	0,656438	0,056	3650	349,568
16	2	-0,086	3,3	0,551707	0,056	3650	-919,747
16	4	-0,024	3,3	0,614076	0,056	3650	-163,849
16	6	-0,004	3,3	0,634269	0,056	3650	80,877
16	8	0,006	3,3	0,643936	0,056	3650	198,040
16	10	0,011	3,3	0,649413	0,056	3650	264,421

Por fim, os resultados são utilizados para a elaboração de um gráfico que permite observar o desempenho da receita do sistema, o que possibilita observar a sua viabilidade econômica. A Figura 26 ilustra o gráfico de viabilidade econômica para o sistema BGFM.



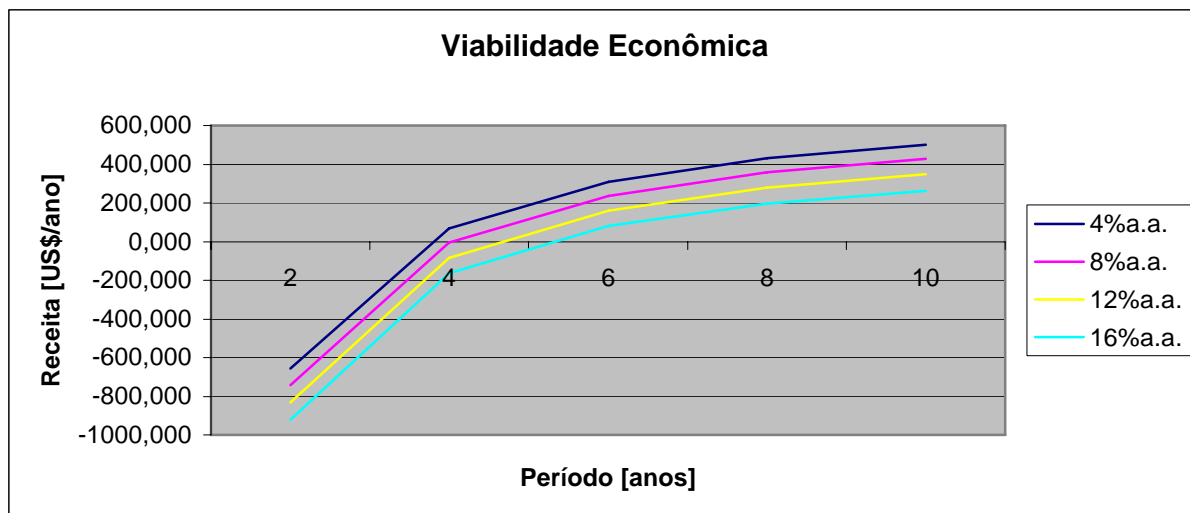


Figura 26 – Receita anual do sistema BGM para os períodos observados

## **CAPÍTULO 4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA À MINI-ETE**

Utilizando o desenvolvimento metodológico do Capítulo 3, com o intuito de caracterizar matematicamente a mini-estação de tratamento de esgoto são realizadas análises para a identificação dos sub-sistemas formadores da mini-ETE. A seguir, é construído o seu diagrama funcional termoeconômico no qual se baseia a formulação do problema de custo do tratamento de esgoto: suas restrições e a modelagem matemática para alocação dos custos dos produtos gerados pela mini-estação de tratamento de esgoto.

### **4.1. IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA**

A primeira parte da análise termoeconômica consiste em elaborar o diagrama do processo que permita visualizar todos os componentes e todos os fluxos de materiais relacionados à mini-estação de tratamento de esgoto.

Os componentes da planta e os fluxos de materiais energéticos e exergéticos associados são indicados por números que destacam o relacionamento entre os mesmos, que são utilizados na elaboração do diagrama funcional. A Figura 27 ilustra o diagrama de processo da mini-ETE.

O diagrama de processo ilustrado na Figura 27 assemelha-se ao descrito no Capítulo 1 (Figura 4). Esse diferencia-se do anterior pelo fato de que é prevista a utilização dos insumos ali produzidos, especificamente a energia elétrica, biofertilizante e a água em condição de re-uso, respectivamente para alimentação da sala de controle da mini-ETE, da iluminação e de uma bomba e para irrigação de área verde próxima à mini-ETE. Esse aproveitamento da energia produzida pelo processo de tratamento de esgoto adotado proporciona à mini-ETE sua auto-suficiência energética.

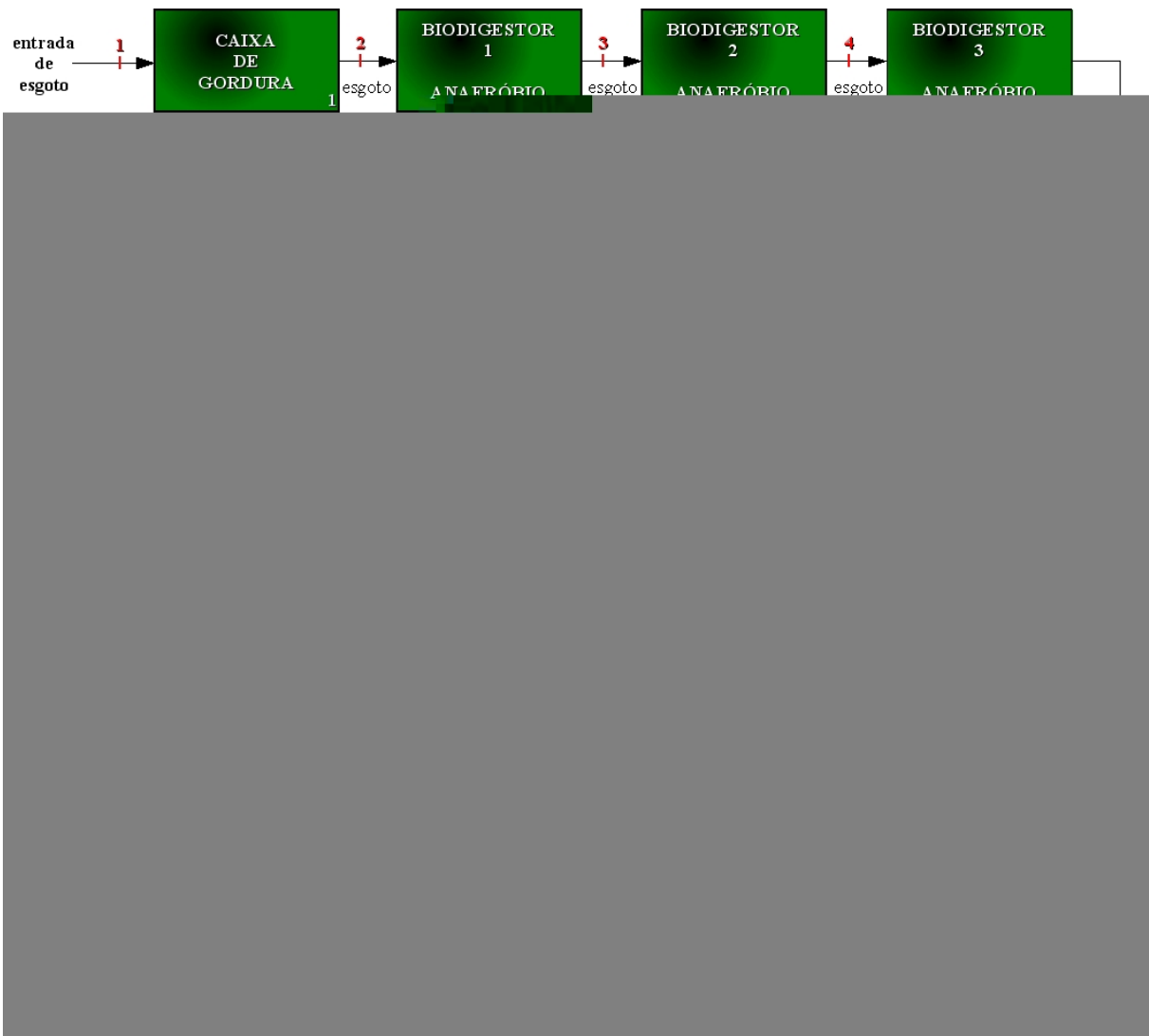


Figura 27 – Diagrama de processo para a mini-ETE

A partir do diagrama de processo é elaborada a Tabela 6 que relaciona todas as características termodinâmicas da mini-ETE: tipo de fluido, vazão, pressão, temperatura, entalpia, entropia e exergia específica. Cada ponto indicado no diagrama de processo é representado na Tabela 6 por seu respectivo número.

Tabela 6 – Características da mini-estação de tratamento de esgoto

<b>Ponto</b>	<b>Fluido</b>	<b>Vazão kg/s</b>	<b>Pressão MPa</b>	<b>Temperatura K</b>	<b>Entalpia Específica kJ/kg</b>	<b>Entropia Específica kJ/kg.K</b>	<b>Exergia Específica kJ/kg</b>
1	esgoto	0,0160806	0,200	298,15	105,00	0,3673	104,8
2	esgoto	0,0160806	0,200	298,15	105,00	0,3673	104,8
3	esgoto	0,01549896	0,180	298,20	105,20	0,3680	105,1
4	esgoto	0,01493837	0,160	298,25	105,40	0,3687	105,3
5	biogás	0,00167465	0,160	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
6	biogás	0,00167465	0,200	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
7	gases de exaustão	0,01494091	0,300	450,00	-	-	31,9
8	ar ambiente	0,10055596	0,101	298,15	-	-	0,0
9	água de esgoto	0,01439805	0,140	298,30	105,60	0,3694	105,5
10	água em condição de re-uso (pré-tratada)	0,01439805	0,180	298,20	105,20	0,3680	105,1
11	biofertilizante	0,00000273	0,180	298,20	42,08	0,15	5.477,06 <sup>(*)</sup>
12	água em condição de re-uso (tratada)	0,01439805	0,180	298,15	105,00	0,3673	104,8
13	biofertilizante	0,00000263	0,160	298,250	42,160	0,147	5.477,06 <sup>(*)</sup>
14	biofertilizante	0,00000254	0,140	298,300	42,240	0,148	5.477,06 <sup>(*)</sup>
15	ar ambiente	0,02612447	0,101	298,15	-	-	0,0
16	biogás	0,00057890	0,160	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
17	biogás	0,00055796	0,160	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>
18	biogás	0,00053778	0,160	298,15	-	-	28.500 <sup>(*)</sup>

(\*) As exergias específicas do biogás e do biofertilizante são seus próprios PCI.

Devido à não disponibilidade de dados sobre o esgoto, para fins de cálculo, o mesmo foi considerado como sendo líquido.

Segundo Snatural (2006), são necessários 600 m<sup>3</sup>/dia de ar para cada 100 m<sup>3</sup>/dia de esgoto tratado em biodigestor aeróbio. Assim, é possível estimar a relação ar/esgoto pela equação

$$\frac{\dot{m}_{\text{ar}}}{\dot{m}_{\text{es}}} = \frac{\rho_{\text{ar}} \cdot Q_{\text{ar}}}{\rho_{\text{es}} \cdot Q_{\text{es}}}. \quad (33)$$

A Tabela 6 foi construída com dados obtidos de Godoy Júnior, Silveira e Giacaglia (2004) para vazão, temperatura e pressão, sendo entalpia, entropia e exergia específica calculados com o programa aplicativo CATT2 (BORGNAKKE; SONNTAG; VAN WYLEN, 2003) e consultados em Silveira (1998).

#### 4.2. CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMOECONÔMICO

De acordo com o método desenvolvido por Silveira (1998) e com base no diagrama de processo apresentado (Figura 27) é elaborado o diagrama funcional termoeconômico para a mini-ETE, conforme ilustrado na Figura 28.

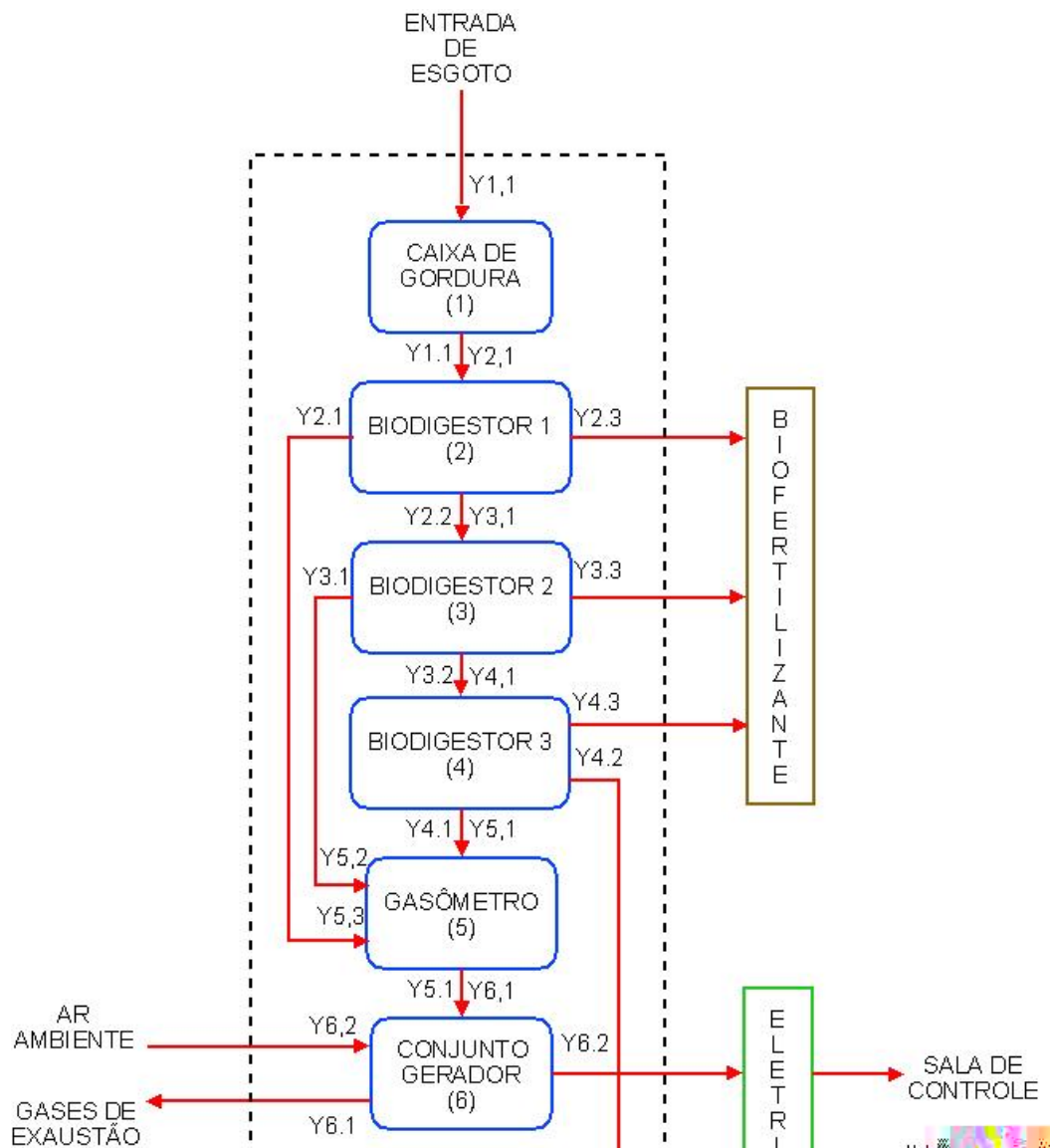


Figura 28 – Diagrama funcional termoeconômico para a mini-ETE

### 4.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO

#### 4.3.1. Determinação das expressões para as funções exeréticas (restrições)

Para a determinação das funções exeréticas associadas ao diagrama funcional termoeconômico e de modo a simplificar os cálculos sem invalidar a análise, serão desprezadas as perdas nas tubulações.

A partir do diagrama de processo ilustrado na Figura 27 e dos valores das propriedades termodinâmicas indicadas na Tabela 6, pode-se determinar os valores dos fluxos exeréticos em base incremental, associados ao diagrama funcional termoeconômico ilustrado na Figura 28.

#### Unidade 1: Caixa de Gordura

$$Y_{1,1} = \dot{m}_1 \cdot [(h_1 - h_0) - T_1 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (34)$$

$$Y_{1,1} = \dot{m}_2 \cdot [(h_2 - h_3) - T_2 \cdot (s_2 - s_3)] \quad (35)$$

#### Unidade 2: Biodigestor 1

$$Y_{2,1} = Y_{1,1} \quad (36)$$

$$Y_{2,1} = \dot{m}_{16} \cdot PCI_{bg} \quad (37)$$

$$Y_{2,2} = \dot{m}_3 \cdot [(h_3 - h_4) - T_3 \cdot (s_3 - s_4)] \quad (38)$$

$$Y_{2,3} = \dot{m}_{11} \cdot PCI_{bf} + \dot{m}_{11} \cdot [(h_{11} - h_3) - T_{11} \cdot (s_{11} - s_3)] \quad (39)$$

#### Unidade 3: Biodigestor 2

$$Y_{3,1} = Y_{2,2} \quad (40)$$

$$Y_{3,1} = \dot{m}_{17} \cdot PCI_{bg} \quad (41)$$

$$Y_{3,2} = \dot{m}_4 \cdot [(h_4 - h_9) - T_4 \cdot (s_4 - s_9)] \quad (42)$$

$$Y_{3,3} = \dot{m}_{13} \cdot PCI_{bf} + \dot{m}_{13} \cdot [(h_{13} - h_4) - T_{13} \cdot (s_{13} - s_4)] \quad (43)$$

### Unidade 4: Biodigestor 3

$$Y_{4,1} = Y_{3,2} \quad (44)$$

$$Y_{4,1} = \dot{m}_{18} \cdot PCI_{bg} \quad (45)$$

$$Y_{4,2} = \dot{m}_9 \cdot g \cdot h_9 \quad (46)$$

$$Y_{4,3} = \dot{m}_{14} \cdot PCI_{bf} + \dot{m}_{14} \cdot [(h_{14} - h_9) - T_{14} \cdot (s_{14} - s_9)] \quad (47)$$

### Unidade 5: Gasômetro

$$Y_{5,1} = Y_{4,1} \quad (48)$$

$$Y_{5,2} = Y_{3,1} \quad (49)$$

$$Y_{5,3} = Y_{2,1} \quad (50)$$

$$Y_{5,1} = \dot{m}_6 \cdot PCI_{bg} \quad (51)$$

### Unidade 6: Motor de Combustão Interna

$$Y_{6,1} = Y_{5,1} \quad (52)$$

$$Y_{6,2} = \dot{m}_{15} \cdot cp_{ar} \cdot \left[ (T_{15} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T_{15}}{T_0} \right) \right] \quad (53)$$

$$Y_{6,1} = \dot{m}_7 \cdot cp_{ge} \cdot \left[ (T_7 - T_0) - T_0 \cdot \ln \left( \frac{T_7}{T_0} \right) \right] \quad (54)$$

$$Y_{6,2} = E_p \quad (55)$$

### Unidade 7: Roda d'Água

$$Y_{7,1} = Y_{4,2} \quad (56)$$

$$Y_{7,1} = \dot{m}_{10} \cdot g \cdot h_u \quad (57)$$

$$Y_{7,2} = \dot{m}_9 \cdot g \cdot h_u \quad (58)$$

### Unidade 8: Biodigestor 4

$$Y_{8,1} = Y_{7,1} \quad (57)$$



$$Y_{8,2} = \dot{m}_8 \cdot c_{p_{ar}} \cdot \left[ (T_8 - T_r) - T_r \cdot \ln \left( \frac{T_8}{T_r} \right) \right] \quad (58)$$

$$Y_{8,1} = \dot{m}_{12} \cdot \left[ (h_{12} - h_{10}) - T_{12} \cdot (s_{12} - s_{10}) \right] \quad (59)$$

A Tabela 7 relaciona os valores dos fluxos exergéticos associados às unidades relacionadas e descritas na Tabela 6, assim como nos diagramas de processo e funcional, ilustrados respectivamente nas Figuras 27 e 28.

Tabela 7 – Valores dos fluxos exergéticos associados à mini-ETE

<b>Unidade 1: Caixa de Gordura</b>			<b>Unidade 5: Gasômetro</b>		
	<i>Valor</i>	<i>Un.</i>		<i>Valor</i>	<i>Un.</i>
Y <sub>1,1</sub>	0	kW	Y <sub>5,1</sub>	15,3	kW
Y <sub>1,1</sub>	0,00014	kW	Y <sub>5,2</sub>	15,9	kW
<b>Unidade 2: Biodigestor 1</b>			Y <sub>5,3</sub>	16,5	kW
	<i>Valor</i>	<i>Un.</i>	Y <sub>5,1</sub>	47,7	kW
Y <sub>2,1</sub>	0,00014	kW	<b>Unidade 6: Motor</b>		
Y <sub>2,1</sub>	16,5	kW		<i>Valor</i>	<i>Un.</i>
Y <sub>2,2</sub>	0,00014	kW	Y <sub>6,1</sub>	47,7	kW
Y <sub>2,3</sub>	0,01498	kW	Y <sub>6,2</sub>	0	kW
<b>Unidade 3: Biodigestor 2</b>			Y <sub>6,1</sub>	0,47592	kW
	<i>Valor</i>	<i>Un.</i>	Y <sub>6,2</sub>	3,3	kW
Y <sub>3,1</sub>	0,00014	kW	<b>Unidade 7: Roda d'Água</b>		
Y <sub>3,1</sub>	15,9	kW		<i>Valor</i>	<i>Un.</i>
Y <sub>3,2</sub>	0,00013	kW	Y <sub>7,1</sub>	0,14193	kW
Y <sub>3,3</sub>	0,01444	kW	Y <sub>7,1</sub>	0,15300	kW
<b>Unidade 4: Biodigestor 3</b>			Y <sub>7,2</sub>	1,02001	kW
	<i>Valor</i>	<i>Un.</i>	<b>Unidade 8: Biodigestor 4</b>		
Y <sub>4,1</sub>	0,00013	kW		<i>Valor</i>	<i>Un.</i>
Y <sub>4,1</sub>	15,3	kW	Y <sub>8,1</sub>	0,15300	kW
Y <sub>4,2</sub>	0,14193	kW	Y <sub>8,2</sub>	0	kW
Y <sub>4,3</sub>	0,01392	kW	Y <sub>8,1</sub>	0,15300	kW

### 4.3.2. Determinação das equações matemáticas dos custos dos produtos associados

A determinação das equações matemáticas do custo dos produtos associados é originada na análise do modelo estrutural baseado em custos ilustrado na Figura 29.



Figura 29 – Modelo estrutural baseado em custos para a mini-ETE

As equações matemáticas do custo dos produtos associados possibilitam alocar os custos dos produtos gerados pela mini-ETE, quais sejam: custo de eletricidade ( $c_{el}$ ), custo do biofertilizante ( $c_{bf}$ ) e custo da água em condições de re-uso ( $c_{at}$ ). Os demais custos são internos à mini-ETE, quais sejam custo da produção de ar para aeração ( $c_{aer}$ ), custo da água pré-tratada ( $c_{ap}$ ) e custo do biogás gerado ( $c_{bg}$ ).

Assim, o custo de manufatura exergetico ( $CM_{ex}$ ) pode ser definido por

$$CM_{ex} = c_{el} \cdot Y_{6.2} + c_{bf} \cdot (Y_{2.3} + Y_{3.3} + Y_{4.3}) + c_{at} \cdot Y_{8.1} \quad (60)$$

A equação (61) representa o custo da produção de eletricidade pelo MCI, considerando o investimento em equipamentos, o custo de operação e manutenção dos mesmos e o custo do biogás utilizado como combustível pelo motor empregado.

$$c_{el} [\text{US\$/kWh}] = \frac{I_{el} \cdot f}{H \cdot Y_{6.2}} + c_{OM_{el}} + c_{bg} \cdot \frac{Y_{5.1}}{Y_{6.2}} \quad (61)$$

A equação (62) representa o custo da produção de biogás, considerando o investimento nos biodigestores anaeróbios, incluindo o gasômetro, e o custo de operação e manutenção desse sistema.

$$c_{bg}[\text{US}\$/\text{kWh}] = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot Y_{5.1}} + c_{OM_A} \right) \cdot fp_{bg} \quad (62)$$

Além desses custos deve ser considerado o fator de ponderação do biogás, que reflete o percentual do investimento realizado que está relacionado à fração equivalente à produção de biogás no sistema de biodigestão anaeróbia, considerando todos os produtos ali gerados, sejam biogás, biofertilizante e água pré-tratada, equação (63).

$$fp_{bg} = \frac{Y_{5.1}}{Y_{5.1} + Y_{2.3} + Y_{3.3} + Y_{4.3} + Y_{4.2}} \quad (63)$$

A equação (64) representa o custo da produção de biofertilizante, considerando o investimento nos biodigestores anaeróbios e o custo de operação e manutenção do sistema. Analogamente ao biogás, para o biofertilizante também deve ser considerado seu fator de ponderação, equação (65), ou seja sua parcela de contribuição no investimento no biodigestor anaeróbio.

$$c_{bf}[\text{US}\$/\text{kWh}] = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot (Y_{2.3} + Y_{3.3} + Y_{4.3})} + c_{OM_A} \right) \cdot fp_{bf} \quad (64)$$

$$fp_{bf} = \frac{Y_{2.3} + Y_{3.3} + Y_{4.3}}{Y_{5.1} + Y_{2.3} + Y_{3.3} + Y_{4.3} + Y_{4.2}} \quad (65)$$

A equação (66) representa o custo da produção de água pré-tratada, considerando o investimento nos biodigestores anaeróbios e o custo de operação e manutenção do sistema. O fator de ponderação da água pré-tratada está representado na equação (67).

$$c_{ap}[\text{US}\$/\text{kWh}] = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot Y_{4.2}} + c_{OM_A} \right) \cdot fp_{ap} \quad (66)$$

$$fp_{ap} = \frac{Y_{4.2}}{Y_{5.1} + Y_{2.3} + Y_{3.3} + Y_{4.3} + Y_{4.2}} \quad (67)$$

A equação (68) representa o custo da produção de água tratada, que é composto pelo custo da água pré-tratada, pelo investimento no biodigestor aeróbio-anóxico e no seu custo de operação e manutenção.

$$c_{at} [\text{US\$/kWh}] = c_{ap} + \frac{I_{AA} \cdot f}{H \cdot Y_{8.1}} + c_{OM_{AA}} \quad (68)$$

A Equação 69 representa o custo da produção de ar para aeração, que é composto pelo investimento na roda d'água e pelo custo de operação e manutenção da mesma.

$$c_{aer} [\text{US\$/kWh}] = \frac{I_r \cdot f}{H \cdot Y_{7.2}} + c_{OM_r} \quad (69)$$

### 4.3.3. Cálculo dos custos associados à mini-ETE

Os valores relacionados na Tabela 3 são aplicados às equações (60) a (69), que foram desenvolvidas neste Capítulo, para obter os custos dos produtos da mini-ETE para as condições de análise estabelecidas: taxas de juros de 4, 8, 12 e 16 %a.a. e períodos de amortização de 2, 4, 6, 8 e 10 anos. As equações (30) e (31) são utilizadas para o cálculo do fator de anuidade necessário ao desenvolvimento dos cálculos dos custos dos produtos associados à mini-ETE.

A Tabela 8 relaciona os valores dos custos dos produtos da mini-ETE, assim como os fatores de anuidade, para as condições de análise estabelecidas, sendo que os períodos de amortização e as taxas de juros estão baseadas nos valores praticados comercialmente, orientados pelo Banco Central do Brasil (BACEN, 2006).

Tabela 8 – Valores dos custos para a mini-ETE nas diversas condições de análise

<b>r</b> (%aa)	<b>k</b> (anos)	<b>q</b>	<b>f</b>	<b>c<sub>bg</sub></b> (US\$/kWh)	<b>c<sub>el</sub></b> (US\$/kWh)	<b>c<sub>aer</sub></b> (US\$/kWh)	<b>c<sub>bf</sub></b> (US\$/kWh)	<b>c<sub>ap</sub></b> (US\$/kWh)	<b>c<sub>at</sub></b> (US\$/kWh)	<b>CM<sub>ex</sub></b> (US\$/h)
4	2	1,04	0,53	0,007	0,048	0,044	0,007	0,007	0,483	0,572
4	4	1,04	0,28	0,004	0,028	0,023	0,004	0,004	0,252	0,331
4	6	1,04	0,19	0,003	0,022	0,016	0,003	0,003	0,175	0,251
4	8	1,04	0,15	0,003	0,019	0,013	0,003	0,003	0,137	0,211
4	10	1,04	0,12	0,002	0,017	0,011	0,002	0,002	0,114	0,188
8	2	1,08	0,56	0,007	0,051	0,046	0,007	0,007	0,510	0,600
8	4	1,08	0,30	0,004	0,031	0,025	0,004	0,004	0,276	0,356
8	6	1,08	0,22	0,003	0,024	0,018	0,003	0,003	0,198	0,275
8	8	1,08	0,17	0,003	0,021	0,015	0,003	0,003	0,160	0,236
8	10	1,08	0,15	0,003	0,019	0,013	0,003	0,003	0,137	0,212
12	2	1,12	0,59	0,008	0,053	0,049	0,008	0,008	0,539	0,630
12	4	1,12	0,33	0,005	0,033	0,028	0,005	0,005	0,301	0,382
12	6	1,12	0,24	0,004	0,026	0,021	0,004	0,004	0,223	0,301
12	8	1,12	0,20	0,003	0,023	0,017	0,003	0,003	0,185	0,261
12	10	1,12	0,18	0,003	0,021	0,015	0,003	0,003	0,162	0,238
16	2	1,16	0,62	0,008	0,056	0,051	0,008	0,008	0,567	0,659
16	4	1,16	0,36	0,005	0,035	0,030	0,005	0,005	0,326	0,409
16	6	1,16	0,27	0,004	0,028	0,023	0,004	0,004	0,248	0,327
16	8	1,16	0,23	0,004						

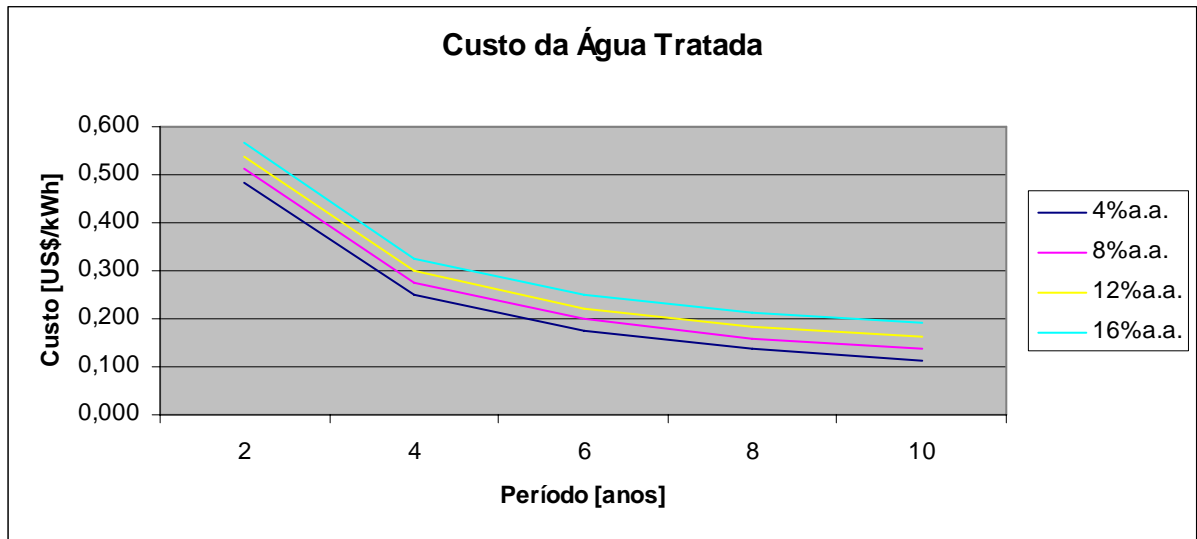


Figura 31 – Custos da água de esgoto que é tratada pela mini-ETE

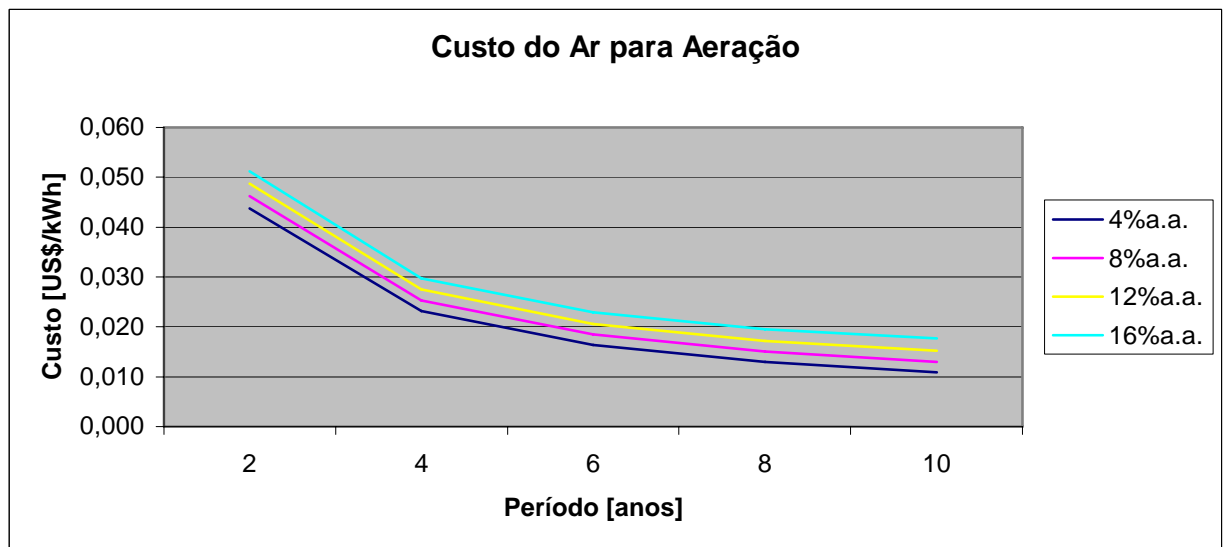


Figura 32 – Custos do ar produzido para aeração na mini-ETE

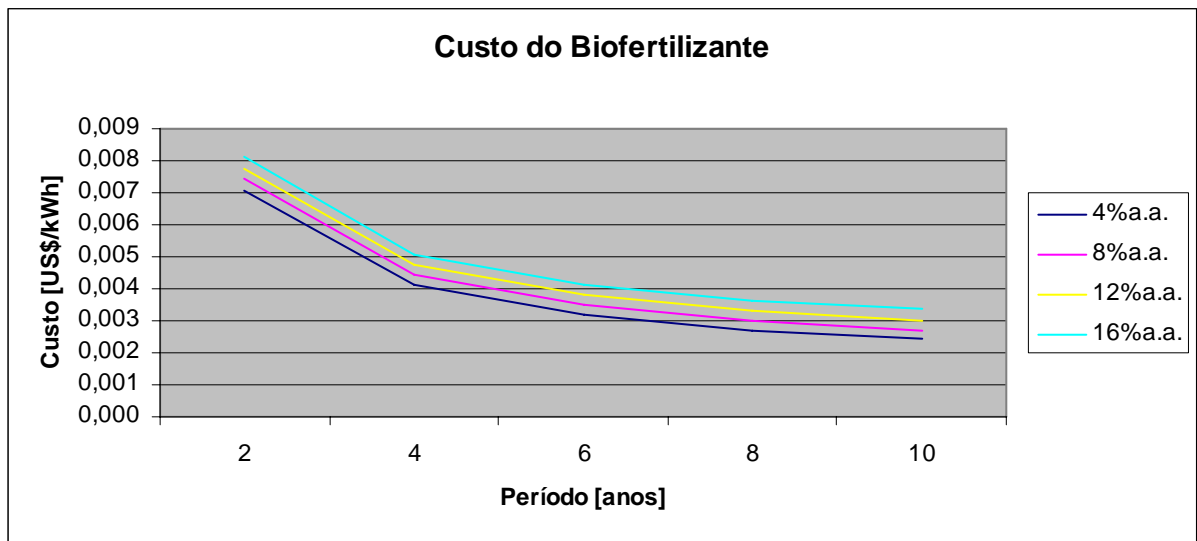


Figura 33 – Custos do biofertilizante produzido pela mini-ETE

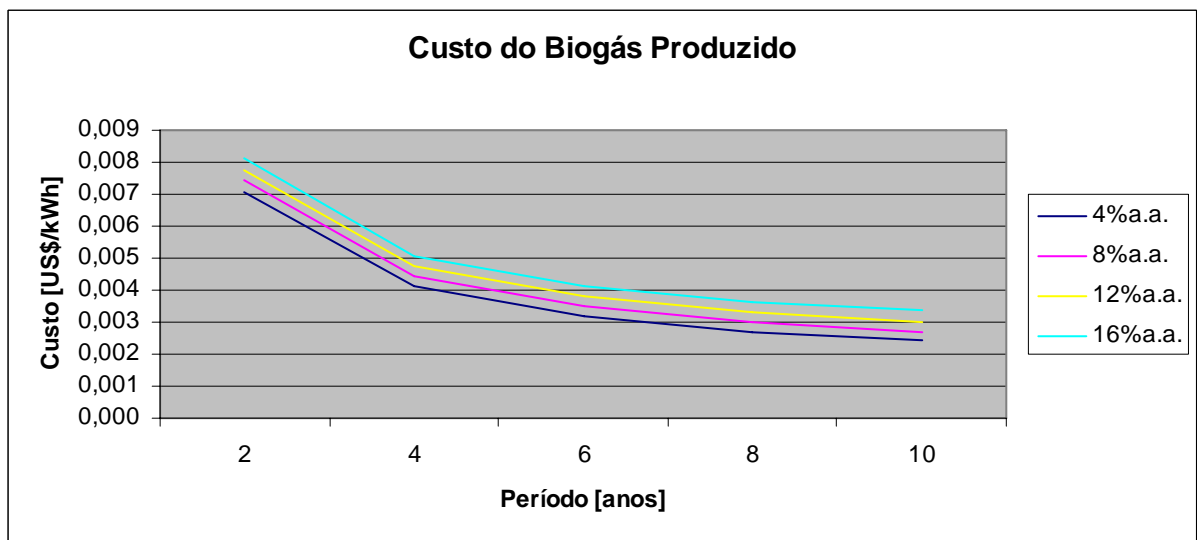


Figura 34 – Custos do biogás produzido pela mini-ETE

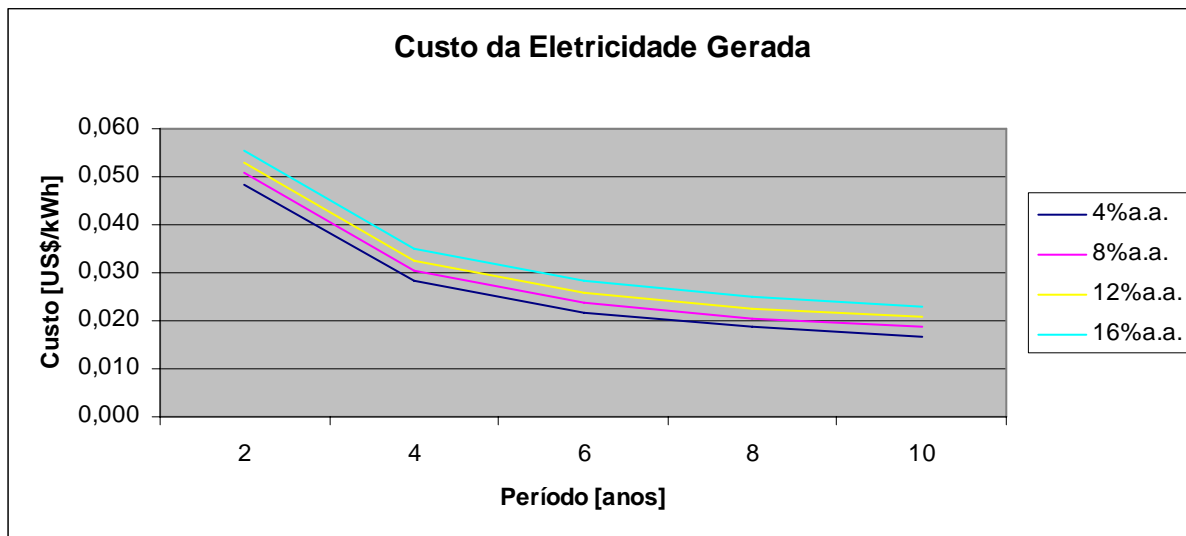


Figura 35 – Custos da eletricidade gerada no MCI da mini-ETE

Esses gráficos possibilitam observar o período de retorno do capital investido (*payback*) na mini-ETE de acordo com o desempenho de cada um dos produtos associados.

A Figura 36 ilustra o custo de manufatura exergético ( $CM_{ex}$ ) do sistema BGFM, considerando os custos dos produtos e suas exergias.

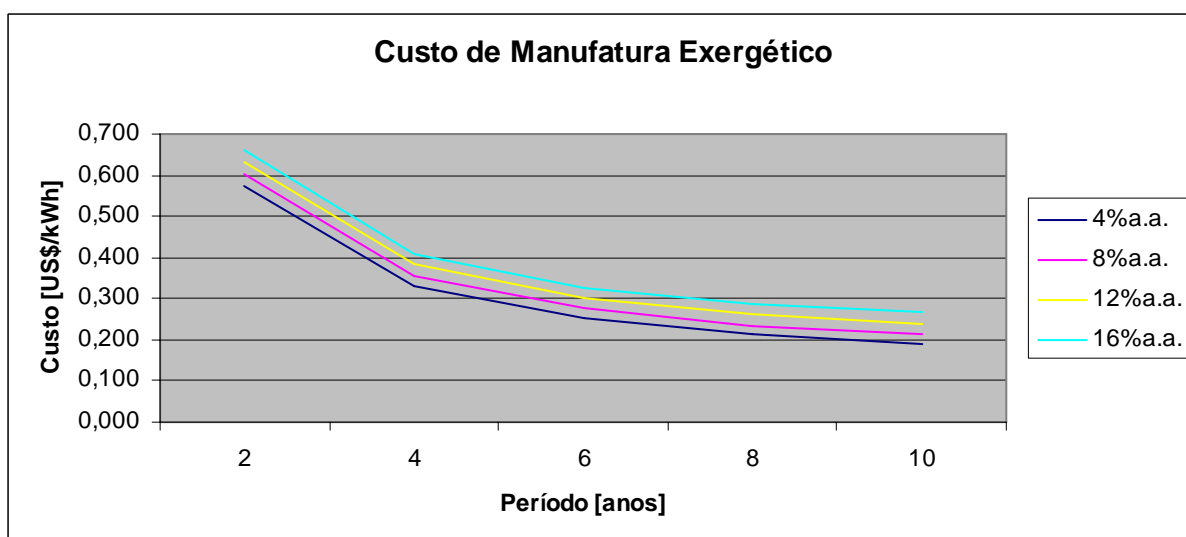


Figura 36 – Custo de manufatura exergético da mini-ETE

Em todos os gráficos é possível observar que os custos associados decrescem



com a proximidade do período de retorno do capital investido (*payback*). Outro fator que influencia diretamente o desempenho dos custos é o valor do capital investido que é dependente da taxa de juros e do período de amortização desse capital.

#### 4.3.4. Estudo da viabilidade econômica

Tendo como referência os valores praticados pelas concessionárias do serviço de tratamento de água e esgoto no território nacional, além das taxas de juros e períodos de amortização adotados, é realizado o levantamento das receitas de capital para as condições estabelecidas.

A equação (70) apresenta a relação entre os custos de água tratada pela mini-ETE e pela média nacional das concessionárias do serviço de tratamento de esgoto e a vazão volumétrica de esgoto da mini-ETE.

$$R \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right] = \left\{ \left[ (P_{el} - c_{el}) \cdot E_P \right] + \left[ (P_{at} - c_{at}) \cdot Q_{at} \right] \right\} \cdot H \quad (70)$$

As equações (71) e (72) são utilizadas para o cálculo do custo da água tratada em base volumétrica.

$$c_{ap} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = \left( \frac{I_A \cdot f}{H \cdot Q_{ap}} + c_{OM_A} \right) \cdot \left( \frac{Q_{bf}}{Q_{bg} + Q_{bf} + Q_{ap}} \right) \quad (71)$$

$$c_{at} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = c_{ap} + \frac{I_{AA} \cdot f}{H \cdot Q_{at}} + c_{OM_{AA}} \quad (72)$$

A seguir, a equação (32), elaborada no Capítulo 3 para cálculo da receita anual de uma sistema de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética, é utilizada para construir a Tabela 9, que relaciona os valores calculados, considerando o valor médio de tarifação praticado no País, que é de US\$ 70,00/MWh, segundo a ANEEL

(2006), e o valor de US\$ 0,70/m<sup>3</sup> de esgoto tratado (GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004).

Tabela 9 – Valores da receita para a mini-ETE nos períodos observados

<b>r</b> (%aa)	<b>k</b> (anos)	<b>P<sub>el-c<sub>el</sub></sub></b> (US\$/kWh)	<b>E<sub>P</sub></b> (kW)	<b>P<sub>ac-c<sub>ac</sub></sub></b> (US\$/m <sup>3</sup> )	<b>Q<sub>ac</sub></b> (m <sup>3</sup> /h)	<b>H</b> (h/ano)	<b>R</b> (US\$/ano)
4	2	0,022	3,3	-0,702	0,056	3650	118,29
4	4	0,042	3,3	-0,029	0,056	3650	494,50
4	6	0,048	3,3	0,194	0,056	3650	619,65
4	8	0,051	3,3	0,306	0,056	3650	682,03
4	10	0,053	3,3	0,372	0,056	3650	719,31
8	2	0,019	3,3	-0,782	0,056	3650	73,13
8	4	0,039	3,3	-0,099	0,056	3650	455,46
8	6	0,046	3,3	0,127	0,056	3650	581,91
8	8	0,049	3,3	0,239	0,056	3650	644,39
8	10	0,051	3,3	0,305	0,056	3650	681,29
12	2	0,017	3,3	-0,864	0,056	3650	27,45
12	4	0,037	3,3	-0,171	0,056	3650	415,12
12	6	0,044	3,3	0,056	0,056	3650	542,16
12	8	0,047	3,3	0,167	0,056	3650	604,08
12	10	0,049	3,3	0,231	0,056	3650	640,00
16	2	0,014	3,3	-0,947	0,056	3650	-18,73
16	4	0,035	3,3	-0,246	0,056	3650	373,56
16	6	0,042	3,3	-0,019	0,056	3650	500,56
16	8	0,045	3,3	0,090	0,056	3650	561,36
16	10	0,047	3,3	0,152	0,056	3650	595,81

A Figura 37 ilustra o desempenho econômico da mini-ETE para as várias condições observadas.

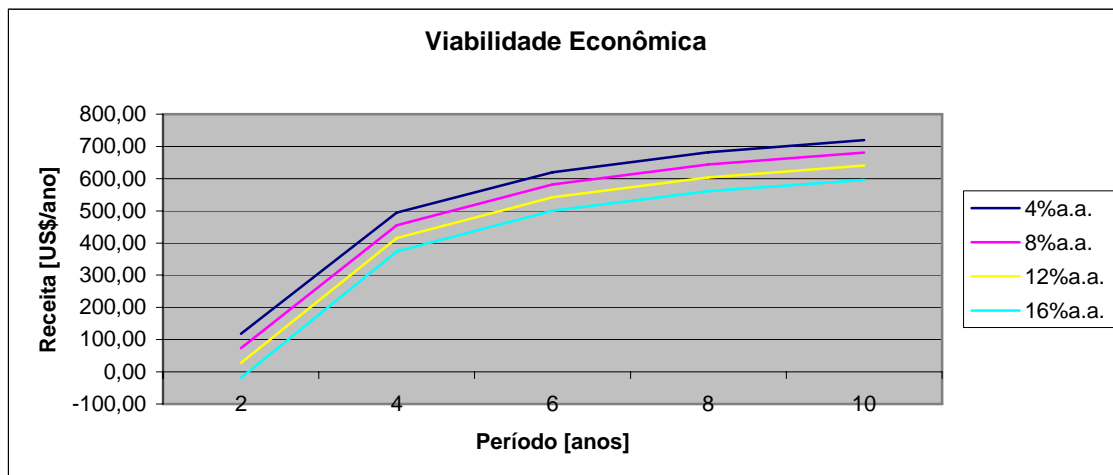


Figura 37 – Receita anual para a mini-ETE nos períodos observados

A partir do gráfico da Figura 37 é possível observar que, para as diversas taxas de juros aplicadas, o retorno do investimento na implantação de uma mini-ETE é de ente um e dois anos.

Observa-se que quanto menor a taxa de juros e o tempo de amortização, tanto menores são os custos dos produtos associados; assim, a receita torna-se maior e, como consequência, o retorno do investimento ocorre em menos tempo.

## **CAPÍTULO 5 ANÁLISE TERMoeCONÔMICA DA MINI-ETE SEM A AUTO-SUFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Este capítulo apresenta a análise termoeconômica da mini-estação de tratamento de esgoto sem a sua auto-suficiência energética. Para isso, foram “retirados” do projeto original o motor de combustão interna e a roda d’água, sendo a energia por eles gerada substituída pela rede elétrica.

### **5.1. IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA**

Para a análise do sistema sem auto-suficiência energética, foram “retirados” do projeto original o motor de combustão interna e a roda d’água, responsáveis pela geração de energia elétrica destinada à iluminação da área próxima à mini-ETE e/ou a uma cabine de controle da instrumentação utilizada, a uma bomba d’água etc. Essa análise possibilita vislumbrar a economia realizada com a re-utilização dos insumos gerados na mini-ETE. A Figura 38 ilustra o diagrama de processo da mini-ETE após serem excluídos os sub-sistemas mencionados.

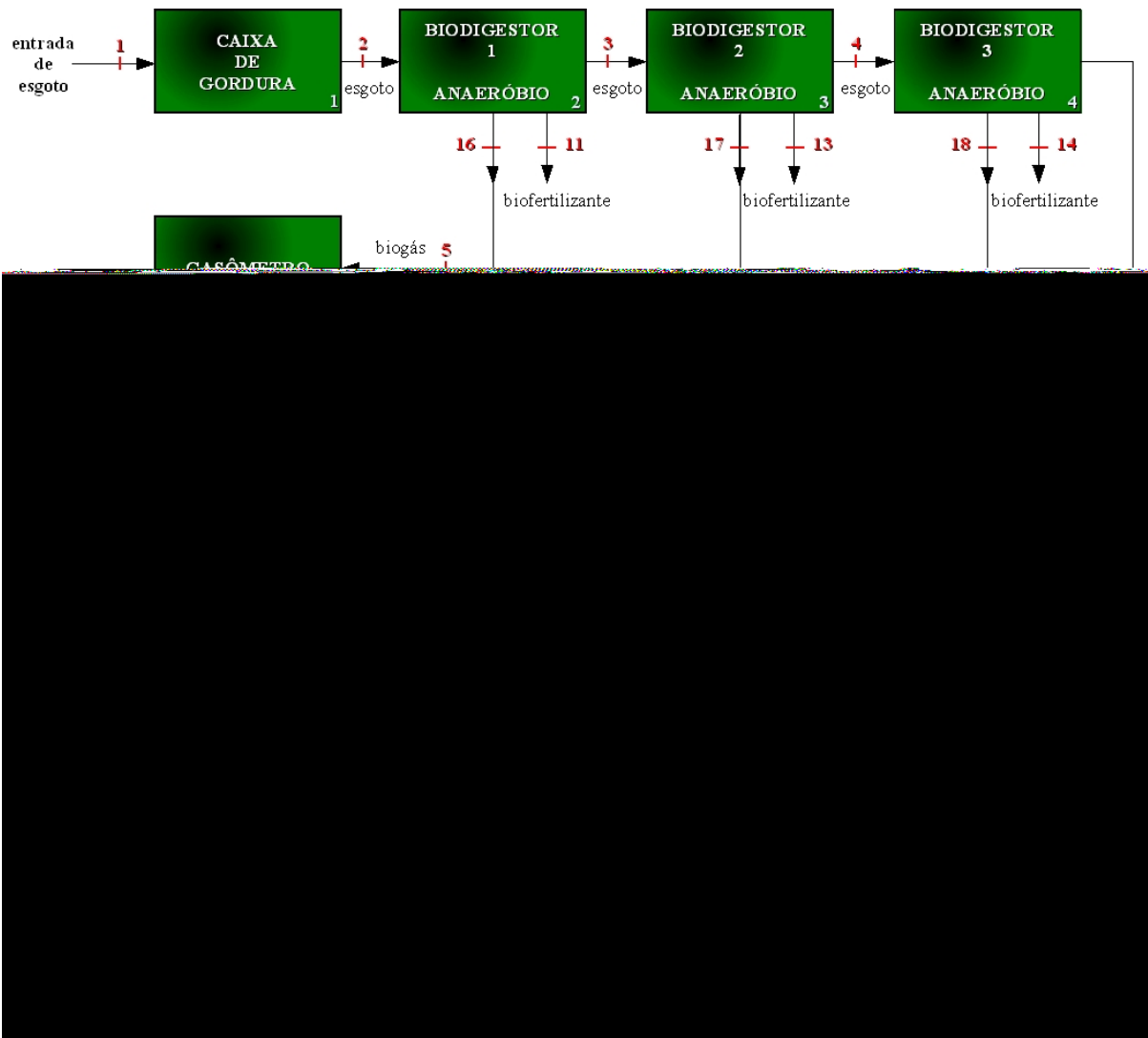


Figura 38 – Diagrama de processo para a mini-ETE sem auto-suficiência energética

O diagrama de processo ilustrado na Figura 38 assemelha-se ao descrito no Capítulo 4 (Figura 27), contudo nessa nova configuração o motor é retirado, o biogás é queimado e a energia elétrica demandada pela sala de controle da mini-ETE, pela iluminação e pela bomba é suprida pela Concessionária de fornecimento de energia elétrica local, assim, a mini-ETE fica sem sua auto-suficiência energética, o que possibilita avaliar sua viabilidade econômica mesmo com aproveitamento apenas parcial dos produtos ali gerados.

Cada ponto indicado no diagrama de processo é representado na Tabela 6 (características termodinâmicas da mini-ETE), já vista no Capítulo 4, por seu respectivo número. Há de se destacar que na Figura 38 não são encontrados os pontos

referentes ao MCI e à roda d'água, retirados do sistema.

## 5.2. CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMoeCONÔMICO

De acordo com o método desenvolvido por Silveira (1998) e com base no diagrama de processo apresentado (Figura 38) é elaborado o diagrama funcional termo-econômico para a mini-ETE sem auto-suficiência energética, conforme ilustrado na Figura 39.

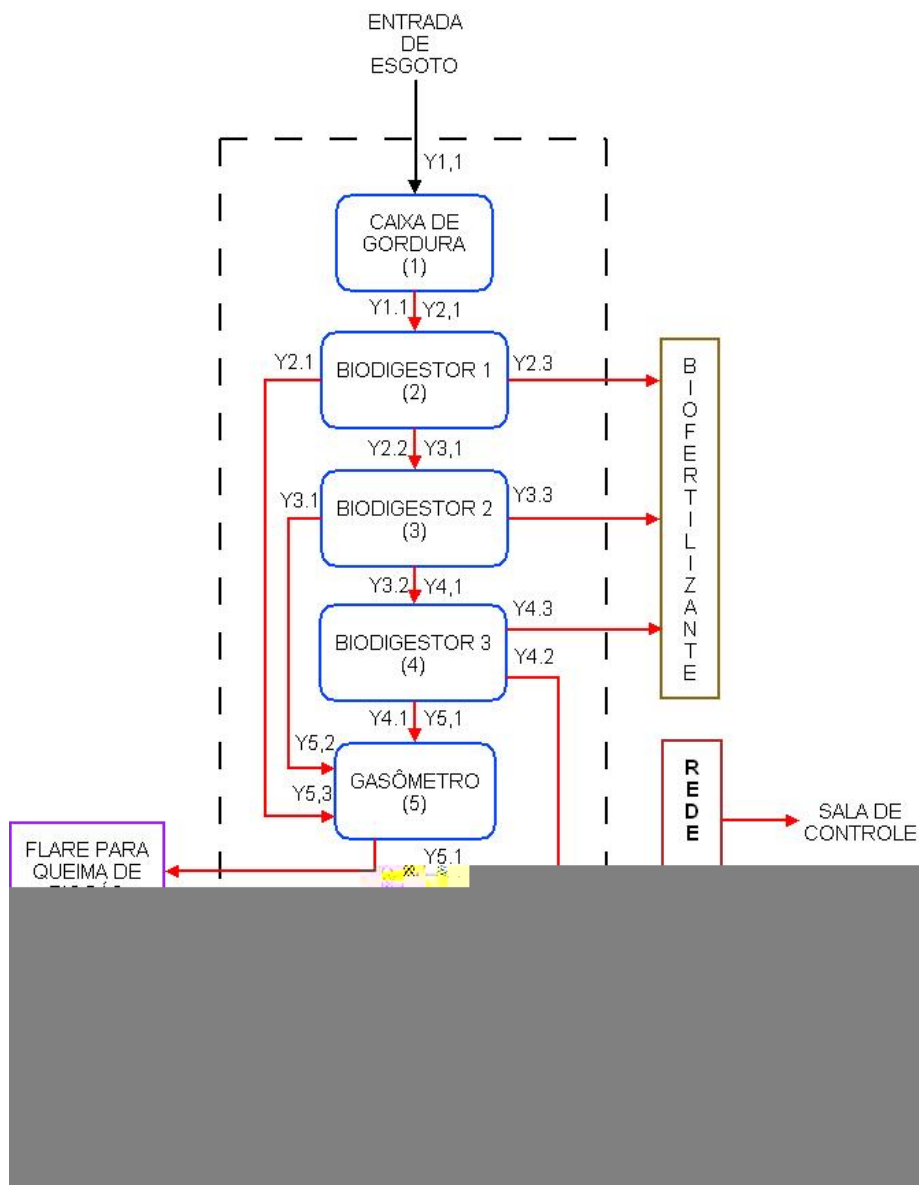


Figura 39 – Diagrama funcional termo-econômico para a mini-ETE sem auto-suficiência energética

### 5.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO

#### 5.3.1. Determinação das expressões para as funções exeréticas (restrições)

Para a determinação das funções exeréticas associadas ao diagrama funcional termoeconômico e de modo a simplificar os cálculos sem invalidar a análise, serão desprezadas as perdas nas tubulações.

A partir do diagrama de processo ilustrado na Figura 38 e dos valores das propriedades termodinâmicas indicadas na Tabela 6, pode-se determinar os valores dos fluxos exeréticos em base incremental, associados ao diagrama funcional termoeconômico ilustrado na Figura 39.

Vale destacar que as unidades “retiradas” para a análise com consumo de energia direto da rede elétrica não têm suas equações relacionadas, sendo as demais, as mesmas utilizadas no Capítulo 4 para representar as restrições do sistema.

A Tabela 7 relaciona os valores dos fluxos exeréticos associados às unidades relacionadas ao sistema sem auto-suficiência energética, assim como nos diagramas de processo e funcional, ilustrados respectivamente nas Figuras 38 e 39.

#### 5.3.2. Determinação das equações matemáticas do custo dos produtos associados

A determinação das equações matemáticas do custo dos produtos associados é obtida a partir da análise do modelo estrutural baseado em custos ilustrado na Figura 40.



Figura 40 – Modelo estrutural baseado em custos para a mini-ETE sem auto-suficiência energética

As equações matemáticas do custo dos produtos associados possibilitam alocar os custos dos produtos gerados pela mini-ETE, sejam: custo de eletricidade (neste caso, o valor praticado pela concessionária), custo do biofertilizante, custo da água em condições de re-uso e custo do biogás gerado.

As equações (61) a (69), desenvolvidas no Capítulo 4, para alocação dos custos das produções de biogás, de biofertilizante, de água pré-tratada e de água tratada são mantidas para essa análise.

Para esse novo sistema em análise, sem os sub-sistemas que manteriam a auto-suficiência da mini-ETE: MCI e roda d'água, tem-se em conta o custo da eletricidade contratada para suprir as necessidades da infra-estrutura da mini-ETE. Nesse novo cenário, é adotado o valor médio de tarifação praticado no país, que é de US\$ 70,00/MWh, segundo a ANEEL (2006).

### 5.3.3. Cálculo dos custos associados à mini-ETE

Para o desenvolvimento dos cálculos referentes aos custos associados aos produtos da mini-ETE sem auto-suficiência energética, são mantidos os valores e as considerações iniciais previamente relacionadas na Tabela 3.

Os valores relacionados na Tabela 3 são aplicados às equações (61) a (69), para obter os custos dos produtos da mini-ETE sem auto-suficiência energética para as condições de análise estabelecidas: taxas de juros de 4, 8, 12 e 16 %a.a. e períodos de amortização de 2, 4, 6, 8 e 10 anos.

Todas as condições de análise relacionadas no Capítulo 4 são consideradas nesse desenvolvimento, incluindo o fator de anuidade já calculado. É considerado que a



infra-estrutura para distribuição da energia elétrica já está previamente instalada, não sendo necessário novos investimentos.

Os valores dos custos dos produtos da mini-ETE sem auto-suficiência energética são os mesmos já calculados no Capítulo 4 (Tabela 8).

As curvas de desempenho dos valores obtidos para os custos dos produtos da mini-ETE, ilustrados nas Figuras 30 a 36, se mantêm, com exceção dos custos ligados à eletricidade, pois a mesma, agora, será contratada diretamente à concessionária local, porém os demais produtos não se alteram.

#### **5.3.4. Estudo da viabilidade econômica**

Analogamente ao estudo realizado no Capítulo 4, nesta seção será desenvolvido o estudo de viabilidade econômica da mini-ETE sem a auto-suficiência energética.

A equação (70) apresenta a relação entre o custo da eletricidade contratada, o custo do tratamento do esgoto e o período de trabalho da mini-ETE sem auto-suficiência energética. As equações (71) e (72) também serão recorrentes a esta análise.

A Tabela 10 apresenta os valores calculados para as condições especificadas para essa análise.

Tabela 10 – Valores da receita para a mini-ETE sem auto-suficiência nos períodos observados

<b>r</b> (%aa)	<b>k</b> (anos)	<b>P<sub>el</sub>-c<sub>el</sub></b> (US\$/kWh)	<b>E<sub>P</sub></b> (kW)	<b>P<sub>ae</sub>-c<sub>ae</sub></b> (US\$/m <sup>3</sup> )	<b>Q<sub>ae</sub></b> (m <sup>3</sup> /h)	<b>H</b> (h/ano)	<b>R</b> (US\$/ano)
4	2	0,000	3,3	-0,702	0,056	3650	-143,35
4	4	0,000	3,3	-0,029	0,056	3650	-5,99
4	6	0,000	3,3	0,194	0,056	3650	39,70
4	8	0,000	3,3	0,306	0,056	3650	62,48
4	10	0,000	3,3	0,372	0,056	3650	76,09
8	2	0,000	3,3	-0,782	0,056	3650	-159,84
8	4	0,000	3,3	-0,099	0,056	3650	-20,24
8	6	0,000	3,3	0,127	0,056	3650	25,92
8	8	0,000	3,3	0,239	0,056	3650	48,73
8	10	0,000	3,3	0,305	0,056	3650	62,21
12	2	0,000	3,3	-0,864	0,056	3650	-176,52
12	4	0,000	3,3	-0,171	0,056	3650	-34,97
12	6	0,000	3,3	0,056	0,056	3650	11,41
12	8	0,000	3,3	0,167	0,056	3650	34,02
12	10	0,000	3,3	0,231	0,056	3650	47,13
16	2	0,000	3,3	-0,947	0,056	3650	-193,38
16	4	0,000	3,3	-0,246	0,056	3650	-50,15
16	6	0,000	3,3	-0,019	0,056	3650	-3,78
16	3,783		3				

A partir do gráfico da Figura 41 é possível observar que, para as diversas taxas de juros aplicadas, o retorno do investimento na implantação de uma mini-ETE sem auto-suficiência energética é de 4 a 6 anos, que ainda é um desempenho melhor que o do sistema comercialmente disponível.

Esse aumento do período para retorno do capital deve-se ao não aproveitamento do biogás na geração de eletricidade para suprir as necessidades da mini-ETE, sendo que, agora, a eletricidade demandada pelo sistema é comprada diretamente à concessionária local.

## **CAPÍTULO 6 – COMPARAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA MINI-ETE COM UM SISTEMA COMERCIALMENTE DISPONÍVEL**

Neste capítulo é descrita a aplicação da metodologia de alocação dos custos (em base exergética) do tratamento de esgoto desenvolvida a um sistema de tratamento de esgoto disponível no mercado, que apresenta características similares à mini-estação de tratamento de esgoto instalada no campus de Guaratinguetá da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista.

### **6.1. IDENTIFICAÇÃO DAS FUNÇÕES DO SISTEMA**

Com o intuito de caracterizar a validade da metodologia elaborada, foi escolhido um modelo comercial de sistemas de tratamento de esgoto com características similares à mini-ETE, para aplicar essa metodologia e analisar os resultados obtidos com a alocação dos custos dos produtos associados a esse sistema.

Esse modelo visa o tratamento de esgoto doméstico com capacidade variável de 10 a 300 m<sup>3</sup> de esgoto por dia, sendo constituído basicamente por reservatórios de fibra de vidro, por reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (tipo UASB) e reator aeróbio com zonas de decantação. Diferentemente da mini-ETE que trata o lodo para que se torne biofertilizante, esse sistema necessita que a cada seis meses seja feita a remoção do lodo.

A Figura 42 ilustra a estação de tratamento comercial utilizada para comparação de desempenho com a mini-ETE, neste caso, a ETE MIZUMO Plus, e a Tabela 11 apresenta suas características técnicas.



Figura 42 – Estação de tratamento de esgoto MIZUMO Linha Plus

Tabela 11 – Características técnicas do sistema MIZUMO Plus

(Fonte: <http://www.mizumo.com.br/plus.htm> – 27/02/2006)

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Tipo de esgoto	Doméstico
Vazão diária de esgoto	10,0 a 200,0 m <sup>3</sup> /dia
Demanda por O <sub>2</sub> para estabilização da carga orgânica bruta	4,0 a 80,0 kg O <sub>2</sub> /dia
Volume de contribuição diária média de lodo estabilizado	0,25 L/usuário.dia
Período efetivo de contribuição	24 horas/dia
Tempo de detenção no tratamento anaeróbio	24 a 36 horas
Sistema Adotado	Contínuo
Eficiência na remoção de DBO, SNF	Entre 90% e 96%
Sistema de aeração	ar difuso
Operação	Automatizada

A Figura 43 ilustra o diagrama de processo de um sistema de tratamento de esgoto doméstico disponível no mercado.

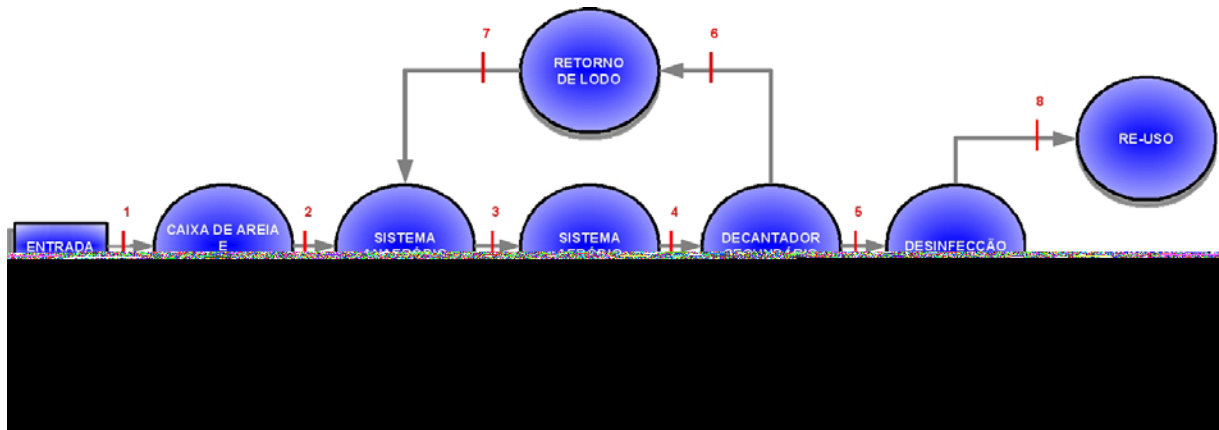


Figura 43 – Diagrama de processo de uma estação de tratamento de esgoto disponível no mercado

A partir do diagrama de processo é elaborada a Tabela 12 que relaciona todas as características termodinâmicas do sistema: tipo de fluido; vazão; pressão; temperatura; entalpia; entropia; e exergia específica (ou PCI, quando for o caso).

Tabela 12 – Características termodinâmicas da estação de tratamento de esgoto disponível no mercado

<i>Ponto</i>	<i>Fluido</i>	<i>Vazão</i> <i>kg/s</i>	<i>Pressão</i> <i>MPa</i>	<i>Temperatura</i> <i>K</i>	<i>Entalpia</i> <i>Específica</i> <i>kJ/kg</i>	<i>Entropia</i> <i>Específica</i> <i>kJ/(Vazão · K)</i>	<i>Exergia</i> <i>Específica</i> <i>kJ/kg</i>

(\*) As exergias específicas do biogás e do biofertilizante são seus próprios PCI.

## 6.2. CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA FUNCIONAL TERMoeCONÔMICO

De acordo com o método desenvolvido por Silveira (1998) e com base no diagrama de processo elaborado (Figura 43) é construído o diagrama funcional termoeconômico para o sistema comercialmente disponível, conforme ilustrado na Figura 44.

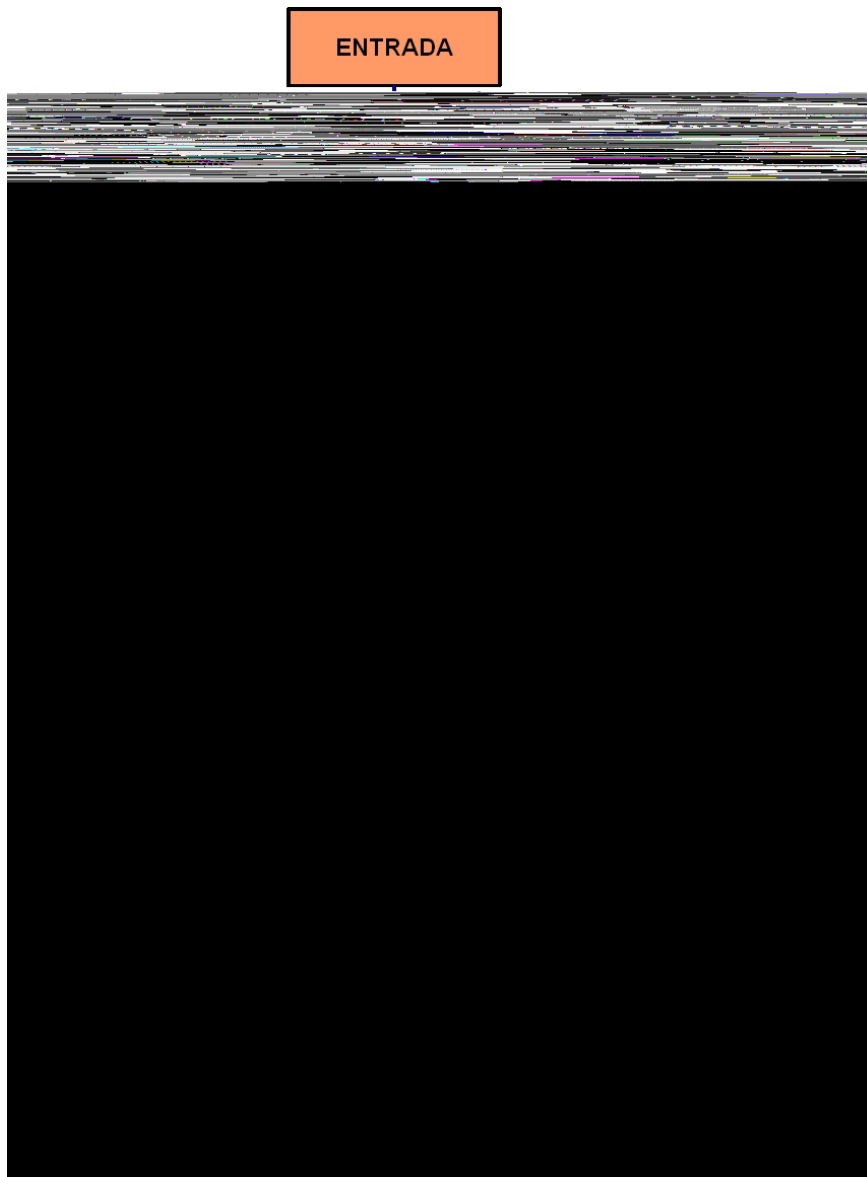


Figura 44 – Diagrama funcional correspondente à estação de tratamento de esgoto disponível no mercado

### 6.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS CUSTOS DO TRATAMENTO DE ESGOTO

#### 6.3.1. Determinação das expressões para as funções exeréticas (restrições)

Para a determinação das funções exeréticas associadas ao diagrama funcional termoeconômico e de modo a simplificar os cálculos sem invalidar a análise, serão desprezadas as perdas nas tubulações.

A partir do diagrama de processo ilustrado na Figura 43 e dos valores das propriedades termodinâmicas indicadas na Tabela 12, pode-se determinar os valores dos fluxos exeréticos em base incremental, associados ao diagrama funcional termoeconômico ilustrado na Figura 44.

#### Unidade 1: Caixa de areia e gradeamento

$$Y_{1,1M} = \dot{m}_1 \cdot [(h_1 - h_0) - T_1 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (73)$$

$$Y_{1,1M} = \dot{m}_2 \cdot [(h_2 - h_3) - T_2 \cdot (s_2 - s_3)] \quad (74)$$

#### Unidade 2: Sistema anaeróbio

$$Y_{2,1M} = Y_{1,1M} \quad (75)$$

$$Y_{2,2M} = (0,6 \cdot \dot{m}_7 \cdot PCI_{bf}) + \{0,4 \cdot \dot{m}_7 \cdot [(h_7 - h_3) - T_7 \cdot (s_7 - s_3)]\} \quad (76)$$

$$Y_{2,1M} = \dot{m}_3 \cdot [(h_3 - h_4) - T_3 \cdot (s_3 - s_4)] \quad (77)$$

$$Y_{2,2M} = (0,6 \cdot \dot{m}_{10} \cdot PCI_{bf}) + \{0,4 \cdot \dot{m}_{10} \cdot [(h_{10} - h_7) - T_{10} \cdot (s_{10} - s_7)]\} \quad (78)$$

#### Unidade 3: Sistema aeróbio

$$Y_{3,1M} = Y_{2,1M} \quad (79)$$

$$Y_{3,1M} = \dot{m}_4 \cdot [(h_4 - h_5) - T_4 \cdot (s_4 - s_5)] \quad (80)$$



#### Unidade 4: Decantador secundário

$$Y_{4,1M} = Y_{3,1M} \quad (81)$$

$$Y_{4,1M} = \dot{m}_5 \cdot [(h_5 - h_4) - T_5 \cdot (s_5 - s_4)] \quad (82)$$

$$Y_{4,2M} = (0,6 \cdot \dot{m}_6 \cdot PCI_{bf}) + \{0,4 \cdot \dot{m}_6 \cdot [(h_6 - h_7) - T_6 \cdot (s_6 - s_7)]\} \quad (83)$$

#### Unidade 5: Desinfecção

$$Y_{5,1M} = Y_{4,1M} \quad (84)$$

$$Y_{5,1M} = \dot{m}_8 \cdot [(h_8 - h_0) - T_8 \cdot (s_8 - s_0)] \quad (85)$$

$$Y_{5,2M} = \dot{m}_9 \cdot PCI_{bg} \quad (86)$$

A Tabela 13 relaciona os valores dos fluxos exergéticos associados às unidades relacionadas e descritas na Tabela 12, assim como nos diagramas de processo e funcional, ilustrados respectivamente nas Figuras 43 e 44.

Tabela 13 – Valores dos fluxos exergéticos associados ao sistema disponível no mercado

Unidade 1: Caixa de Areia e Gradeamento			Unidade 4: Decantador Secundário		
	Valor			Valor	
$Y_{1,1M}$	0	kW	$Y_{4,1M}$	0,001853032	kW
$Y_{1,1M}$	0	kW	$Y_{4,1M}$	0,000286668	kW
<b>Unidade 2: Sistema Anaeróbio</b>			$Y_{4,2M}$	0,008983583	kW
	Valor		<b>Unidade 5: Desinfecção</b>		
$Y_{2,1M}$	0	kW		Valor	
$Y_{2,2M}$	0,008983654	kW	$Y_{5,1M}$	0,000286668	kW
$Y_{2,1M}$	0,000282215	kW	$Y_{5,1M}$	0,004837830	kW
$Y_{2,2M}$	0,000282215	kW	$Y_{5,2M}$	16,49589082	kW
<b>Unidade 3: Sistema Aeróbio</b>					
	Valor				
$Y_{3,1M}$	0,000282215	kW			
$Y_{3,1M}$	0,001853032	kW			

### 6.3.2. Determinação das equações matemáticas do custo dos produtos associados

A determinação das equações matemáticas de custo dos produtos associados são baseadas na análise do modelo estrutural baseado em custos ilustrado na Figura 45.



Figura 45 – Modelo estrutural baseado em custos para o sistema disponível no mercado

As equações matemáticas do custo dos produtos associados possibilitam alocar os custos dos produtos gerados pela estação de tratamento de esgoto disponível no mercado, quais sejam: custo do biofertilizante ( $c_{bfM}$ ), custo da água tratada ( $c_{atM}$ ) e custo do biogás descartado ( $c_{bgM}$ ).

Assim, o custo de manufatura exergético ( $CM_{exM}$ ) pode ser definido por

$$CM_{exM} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{h}} \right] = c_{bfM} \cdot Q_6 + c_{atM} \cdot Q_8 + c_{bgM} \cdot Q_9 \quad (86)$$

As equações (87) e (88) representam o custo do biofertilizante gerado, considerando os investimentos nos sistemas aeróbio, anaeróbio e no decantador secundário, além do custo de operação e manutenção dos mesmos.

$$fp_{bfM} = \frac{Q_6}{Q_5 + Q_6} \quad (87)$$

$$c_{bfM} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = \left( \frac{I_{AM} \cdot f}{H \cdot Q_3} + c_{OM_{AM}} + \frac{I_{AAM} \cdot f}{H \cdot Q_4} + c_{OM_{AAM}} + \frac{I_{DS} \cdot f}{H \cdot Q_6} + c_{OM_{DS}} \right) \cdot fp_{bfM} \quad (88)$$

As equações (89) e (90) representam o custo da água pré-tratada, considerando os investimentos nos sistemas aeróbio, anaeróbio e no decantador secundário, além do custo de operação e manutenção dos mesmos.

$$fp_{apM} = \frac{Q_5}{Q_5 + Q_6} \quad (89)$$

$$c_{apM} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = \left( \frac{I_{AM} \cdot f}{H \cdot Q_3} + c_{OM_{AM}} + \frac{I_{AAM} \cdot f}{H \cdot Q_4} + c_{OM_{AAM}} + \frac{I_{DS} \cdot f}{H \cdot Q_5} + c_{OM_{DS}} \right) \cdot fp_{apM} \quad (90)$$

Como o decantador secundário tem dois fluxos associados a ele, água pré-tratada e biofertilizante, então se faz necessária a inclusão de um fator de ponderação para identificar a parcela de influência desses produtos na formação dos seus custos.

Assim, na equação (88) há o fator ponderando sobre o percentual relativo à influência do fluxo do biofertilizante no investimento realizado no decantador secundário. Para a equação (90), o fator pondera a influência do fluxo da água pré-tratada.

As equações (91) e (92) representam o custo da água tratada, considerando os investimentos nos sistemas aeróbio, anaeróbio, no decantador secundário e na unidade de desinfecção, além do custo de operação e manutenção dos mesmos.

$$fp_{atM} = \frac{Q_8}{Q_8 + Q_9} \quad (91)$$

$$c_{atM} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = \left( c_{apM} + c_{bfM} + \frac{I_{DI} \cdot f}{H \cdot Q_8} + c_{OM_{DI}} \right) \cdot fp_{atM} \quad (92)$$

As equações (93) e (94) representam o custo do biogás descartado, considerando os investimentos nos sistemas aeróbio, anaeróbio, no decantador secundário e na unidade de desinfecção, além do custo de operação e manutenção dos mesmos.

$$fp_{bgM} = \frac{Q_9}{Q_8 + Q_9} \quad (93)$$

$$c_{bgM} \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3} \right] = \left( c_{apM} + c_{bfM} + \frac{I_{DI} \cdot f}{H \cdot Q_9} + c_{OM_{DI}} \right) \cdot fp_{bgM} \quad (94)$$

O investimento realizado na unidade de desinfecção deve ser ponderado segundo os custos do biogás e da água tratada, que são seus sub-produtos, destacando sua parcela de contribuição para cada caso (equações (92) e (94)).

### 6.3.3. Cálculo dos custos associados ao sistema comercialmente disponível

Sendo consideradas as mesmas condições, iniciais e de observação, adotadas para a mini-ETE (Tabela 3), são relacionados na Tabela 14 os custos calculados dos custos dos produtos gerados pelo sistema comercialmente disponível para as diversas condições de análise.

Na Tabela 14 observa-se que o custo do biofertilizante teve um significativo aumento, haja vista que o sistema comercialmente disponível descarta o lodo, tendo que ser contratada uma empresa especializada para realizá-lo, ao contrário da mini-ETE que reaproveita esse produto.

As Figuras 46 a 49 ilustram as curvas de desempenho dos valores obtidos para os custos dos produtos do sistema disponível no mercado. A Figura 50 ilustra o custo de manufatura exergético ( $CM_{exM}$ ) do sistema comercialmente disponível, considerando os custos dos produtos e suas vazões.

Tabela 14 – Valores dos custos para um sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise

r (%aa)	k (anos)	q	f	$c_{bgM}$ (US\$/m <sup>3</sup> )	$c_{bfM}$ (US\$/m <sup>3</sup> )	$c_{apM}$ (US\$/m <sup>3</sup> )	$c_{atM}$ (US\$/m <sup>3</sup> )	$CM_{exM}$ (US\$/h)
4	2	1,04	0,53	1,53	1,15	1,53	1,82	16,38
4	4	1,04	0,28	0,80	0,60	0,80	0,95	8,53
4	6	1,04	0,19	0,55	0,42	0,55	0,66	5,92
4	8	1,04	0,15	0,43	0,32	0,43	0,51	4,61
4	10	1,04	0,12	0,36	0,27	0,36	0,43	3,84
8	2	1,08	0,56	1,62	1,21	1,62	1,92	17,33
8	4	1,08	0,30	0,87	0,66	0,87	1,04	9,34
8	6	1,08	0,22	0,63	0,47	0,63	0,74	6,71
8	8	1,08	0,17	0,50	0,38	0,50	0,60	5,40
8	10	1,08	0,15	0,43	0,32	0,43	0,51	4,63
12	2	1,12	0,59	1,71	1,28	1,71	2,03	18,28
12	4	1,12	0,33	0,95	0,71	0,95	1,13	10,19
12	6	1,12	0,24	0,70	0,53	0,70	0,84	7,53
12	8	1,12	0,20	0,58	0,44	0,58	0,69	6,24
12	10	1,12	0,18	0,51	0,39	0,51	0,61	5,49
16	2	1,16	0,62	1,80				

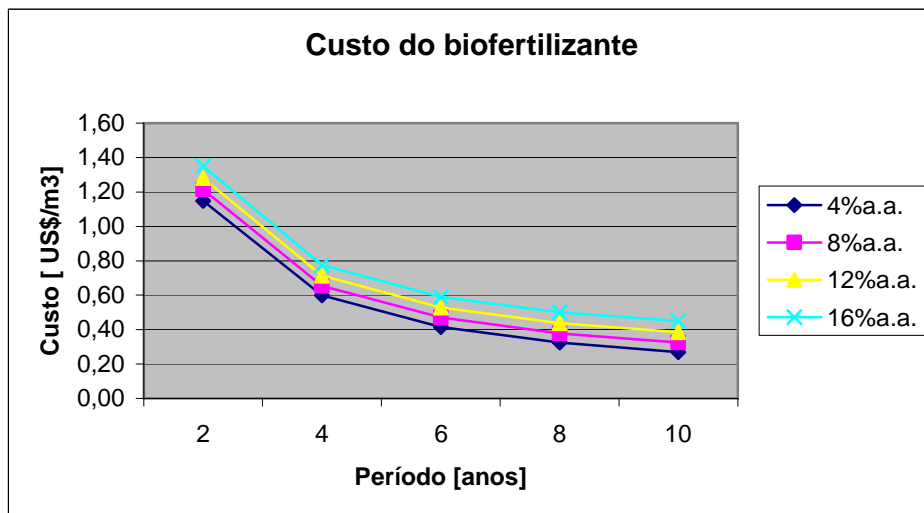


Figura 47 – Custo do biofertilizante para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise

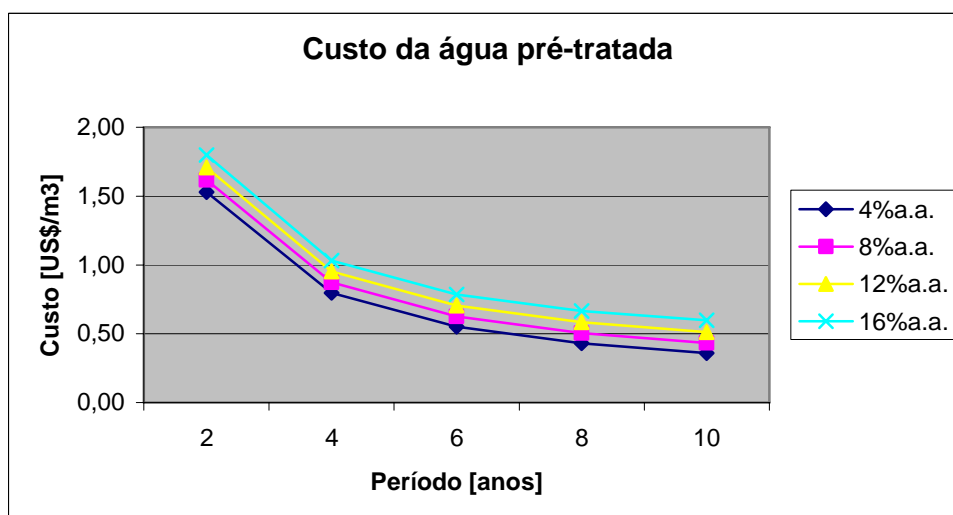


Figura 48 – Custo da água pré-tratada para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise

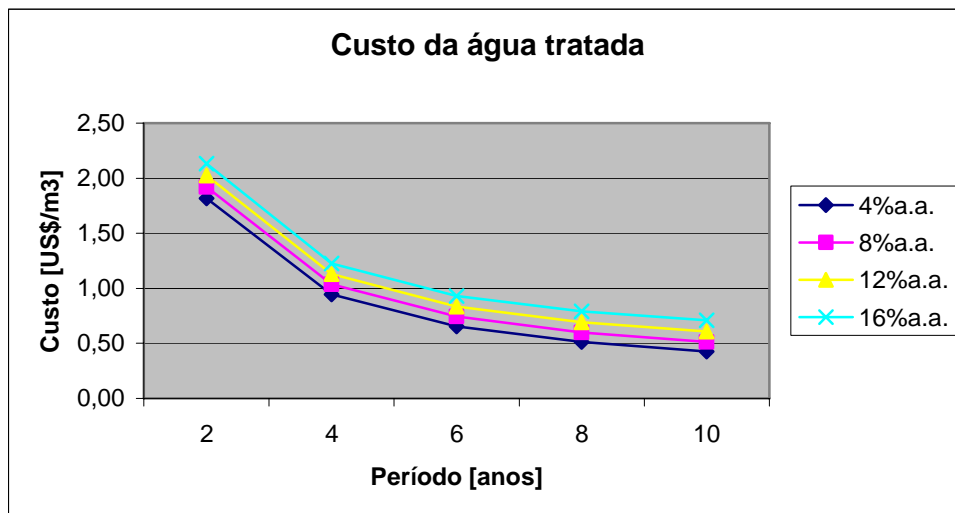


Figura 49 – Custo água tratada para o sistema disponível no mercado nas diversas condições de análise

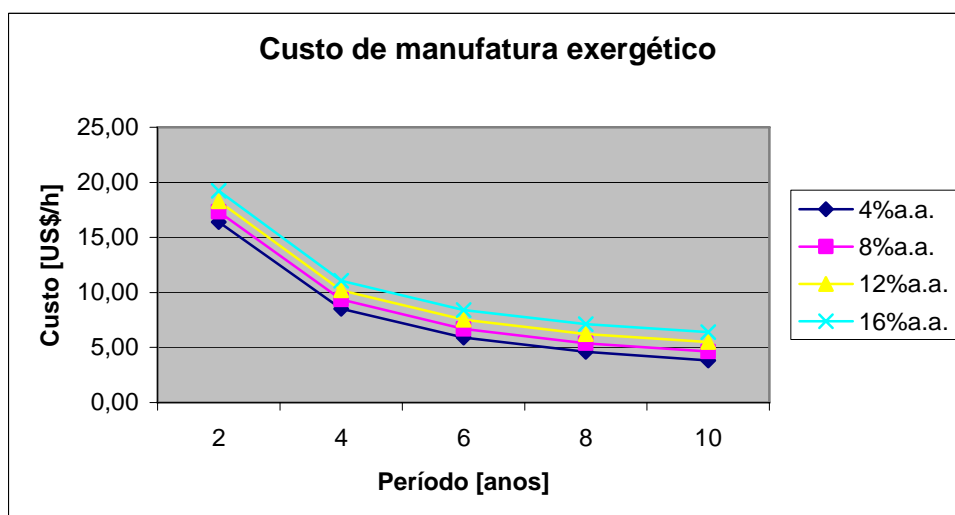


Figura 50 – Custo de manufatura exergético do sistema comercialmente disponível

De modo análogo à mini-ETE, os custos tendem a decair com a proximidade do período de retorno do investimento na planta. Contudo, o maior investimento e o não aproveitamento da maior parte dos produtos gerados no tratamento do esgoto são responsáveis por custos maiores no sistema comercial do que os alocados para a mini-ETE.

### 6.3.4. Estudo da viabilidade econômica

Tendo como referência os valores praticados pelas concessionárias do serviço de tratamento de água e esgoto no território nacional, além das taxas de juros e períodos de amortização adotados, é realizado o levantamento das receitas de capital ( $R_M$ ) para as condições mencionadas.

A equação (95) apresenta a relação entre os custos de água tratada pelo sistema comercialmente disponível e pela média nacional das concessionárias do serviço de tratamento de esgoto e a vazão de esgoto da mini-ETE. A seguir, a Tabela 15 relaciona os valores calculados, considerando o custo de US\$ 0,70/m<sup>3</sup> de esgoto tratado (GODOY JÚNIOR; SILVEIRA; GIACAGLIA, 2004).

$$R_M \left[ \frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right] = \left\{ \left[ (P_{el} - c_{elM}) \cdot E_P \right] + \left[ (P_{at} - c_{atM}) \cdot Q_{at} \right] \right\} \cdot H \quad (95)$$

Tabela 15 – Valores da receita para um sistema disponível no mercado nos períodos observados

r (%aa)	k (anos)	$P_{el}-c_{elM}$ (US\$/kWh)	$E_P$ (kW)	$P_{at}-c_{atM}$ (US\$/m <sup>3</sup> )	$Q_{at}$ (m <sup>3</sup> /h)	H (h/ano)	$R_M$ (US\$/ano)
4	2	0,070	3,3	-1,114	7,000	3650	-27610,20
4	4	0,070	3,3	-0,243	7,000	3650	-5373,82
4	6	0,070	3,3	0,046	7,000	3650	2023,13
4	8	0,070	3,3	0,190	7,000	3650	5710,25
4	10	0,070	3,3	0,277	7,000	3650	7913,49
8	2	0,070	3,3	-1,218	7,000	3650	-30279,30
8	4	0,070	3,3	-0,334	7,000	3650	-7681,28
8	6	0,070	3,3	-0,041	7,000	3650	-207,74
8	8	0,070	3,3	0,103	7,000	3650	3485,19
8	10	0,070	3,3	0,189	7,000	3650	5666,46
12	2	0,070	3,3	-1,324	7,000	3650	-32979,45
12	4	0,070	3,3	-0,427	7,000	3650	-10065,82
12	6	0,070	3,3	-0,133	7,000	3650	-2557,07
12	8	0,070	3,3	0,010	7,000	3650	1102,88
12	10	0,070	3,3	0,093	7,000	3650	3225,96
16	2	0,070	3,3	-1,431	7,000	3650	-35708,94
16	4	0,070	3,3	-0,523	7,000	3650	-12522,55
16	6	0,070	3,3	-0,229	7,000	3650	-5015,86
16	8	0,070	3,3	-0,089	7,000	3650	-1422,02
16	10	0,070	3,3	-0,009	7,000	3650	614,15



A Figura 51 ilustra o desempenho econômico do sistema disponível no mercado para as várias condições observadas.

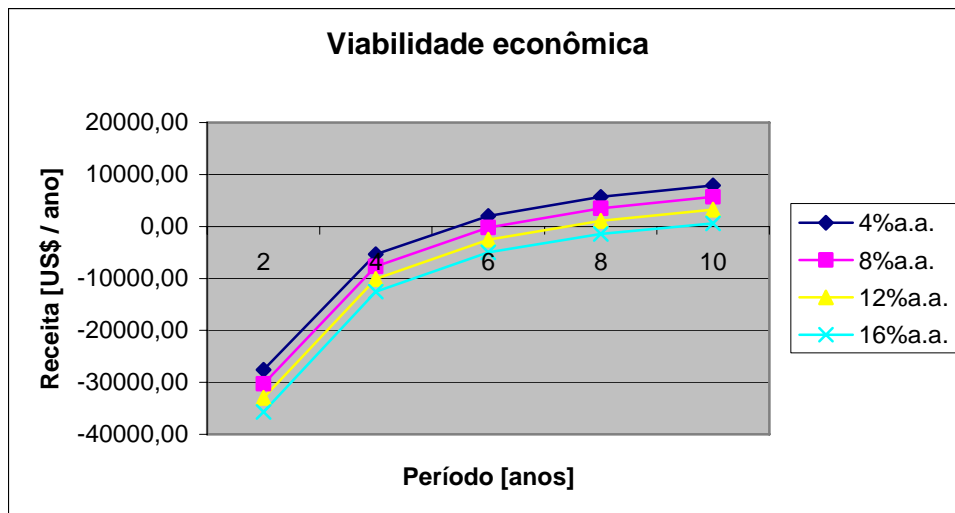


Figura 51 – Receita anual para o sistema disponível no mercado nos períodos observados

A partir do gráfico da Figura 51 é possível observar que o desempenho da receita do sistema disponível no mercado indica que o mesmo se paga entre 5 e 10 anos para as taxas de juros consideradas. Esses períodos de retorno do capital investido são bem superiores ao período de um ano a um ano e meio estimado para o retorno de capital pela mini-ETE.

Com a influência do maior investimento e o não aproveitamento dos recursos gerados, os custos desses produtos tornam-se maiores, assim a receita tem que cobrir esses gastos e por conseguinte, há a necessidade de um período maior para que os investimentos realizados sejam “cobertos” pela receita.

A Figura 52 ilustra um comparativo entre as receitas apresentadas pelos três casos estudados. A Figura 53 ilustra o desempenho dos custos da água tratada em função do período de retorno do capital investido.

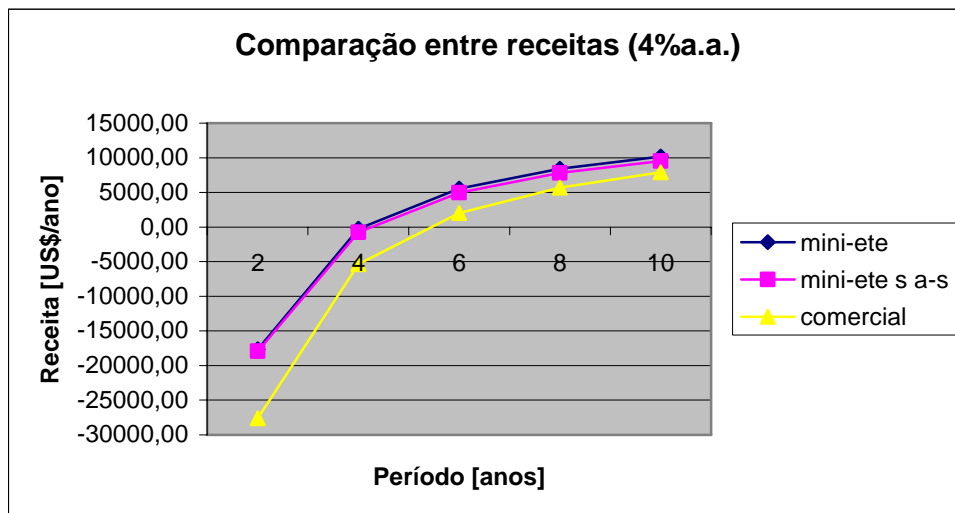


Figura 52 – Comparação entre as receitas dos três casos estudados com juros de 4% a.a.

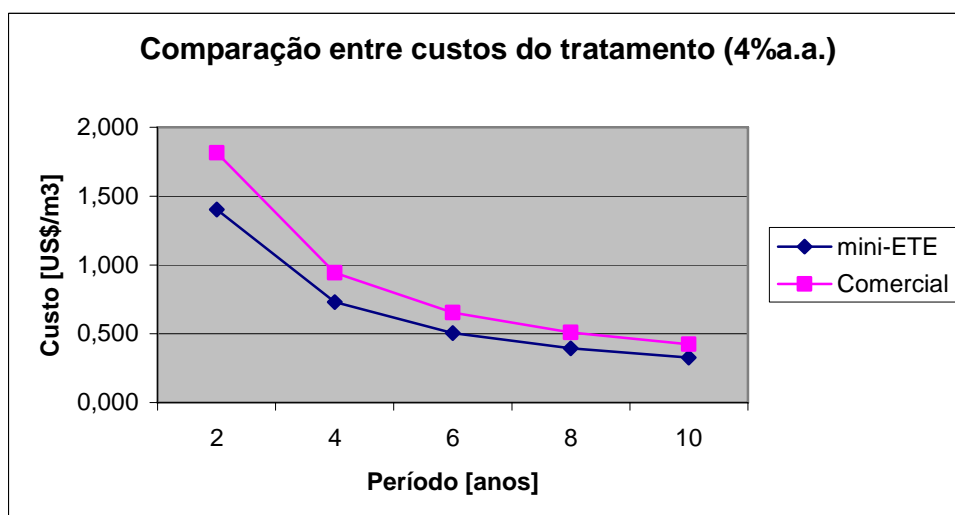


Figura 53 – Comparação entre os custos da água tratada pela mini-ETE e pelo sistema comercialmente disponível

Pelo gráfico da Figura 52 é possível observar a diferença entre os períodos de retorno de capital (*payback*) dos três casos estudados mini-ETE com e sem auto-suficiência energética e o sistema comercialmente disponível, havendo uma diferença de cerca de cinco anos entre a mini-ETE e o sistema comercialmente disponível para o retorno do investimento.

O desempenho favorável à mini-ETE se deve a fatores como menor investimento em sua construção e o aproveitamento dos produtos gerados pelo processo de tratamento do esgoto. Também o desempenho dos custos (Figura 53) é influenciado por esses fatores, tendo, da forma análoga, valores mais atraentes para a mini-ETE.

## **CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo são relacionadas às análises e as considerações finais a respeito da pesquisa realizada, sendo tais resultados consolidados nas conclusões. Também estão relacionadas neste capítulo sugestões de trabalhos futuros, os quais seriam complementares a essa Tese de Doutorado.

### **7.1. CONCLUSÕES**

Pela comparação dos investimentos necessários para a implantação da mini-ETE e do sistema disponível no mercado, intuitivamente, se caracteriza a mini-ETE como sendo economicamente mais atraente que o sistema disponível no mercado.

Ao serem aplicados métodos de análise técnica e econômica aos sistemas de tratamento de esgoto mencionados, é possível observar que, em ambos os casos, o desempenho da mini-ETE é superior ao do sistema disponível no mercado.

Esses resultados são devidos ao menor investimento necessário à implantação da mini-ETE e ao fato de que todos os produtos por ela gerados são utilizados: energia elétrica para alimentação do aerador e da bomba que auxilia na distribuição da água em condições de re-uso; o lodo que se torna biofertilizante; o biogás que é utilizado como combustível para o motor de combustão interna, que foi adaptado para o uso desse gás, utilizado como gerador de energia elétrica; e a água tratada, em condições de re-uso, utilizada na ferti-irrigação das áreas verdes próximas ao local de instalação da mini-ETE.

Quanto ao retorno de capital, por essas mesmas características, ou seja, menor investimento e economia com os gastos que supririam a demanda de energia elétrica, a retirada do lodo e o descarte do gás, por exemplo, fazem com que a implantação de uma mini-ETE seja significativamente mais atraente do que a do sistema disponível no mercado, haja vista a diferença no tempo de retorno do capital investido: menos de dois anos para a mini-ETE; entre três e cinco anos para a mini-ETE sem auto-suficiência energética; e entre cinco e dez anos para o sistema disponível no mercado.

Observou-se, também, que o custo da água tratada na mini-ETE não muda pela presença ou ausência de auto-suficiência energética, pois o processo de tratamento da água independe da origem da energia elétrica demandada.

Assim, conclui-se que este trabalho colabora em termos científicos com a elaboração de uma metodologia confiável para a análise termo-econômica de estações de tratamento de esgoto de pequeno porte, em termos sociais por corroborar as afirmações acerca da viabilidade econômica da mini-ETE e em termos ambientais demonstra a viabilidade econômica do re-aproveitamento dos resíduos descartados.

## 7.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante as etapas inerentes à elaboração e ao desenvolvimento desta pesquisa pode-se observar alguns aspectos que mereceriam ser destacados e salientados como temas para trabalhos a serem desenvolvidos no futuro, sendo complementares a esta Tese de Doutorado, mais especificamente o desenvolvimento de um algoritmo para reconhecimento de padrões de funcionamento de mini-ETE e a elaboração de uma metodologia para medição indireta de DBO e DQO baseada em uso de instrumentação analítica.

### **7.2.1. Desenvolvimento de algoritmo para reconhecimento de padrões com base nos modelos termodinâmico e fluidodinâmico**

Após os modelos matemáticos com características de lógica difusa (*fuzzy*) baseados em análises termodinâmica e fluidodinâmica terem sido aplicados à simulação do sistema e serem considerados como plenamente representativos do mesmo, serão utilizados para o reconhecimento de padrões de funcionamento e de falhas na mini-ETE.

Será estabelecido um comportamento padrão de funcionamento e em seguida

situações possíveis.

### **7.2.2. Instrumentação analítica aplicada à medição indireta de DBO e de DQO em uma mini-ETE**

Essa proposta tem por objetivo estabelecer uma metodologia que possibilite a leitura indireta (estimativa) da DBO e da DQO de uma mini-ETE por meio do uso de instrumentação analítica (medidas de DO, ORP, pH, TDS e temperatura) e modelagem matemática.

Associar-se-á a essa metodologia a aplicação de tecnologias existentes para garantir a eficiência da mini-ETE, diminuindo, assim, a níveis aceitáveis, a presença de contaminantes nos insumos produzidos (água e biofertilizante) e garantindo a qualidade de vida das populações alcançadas.

Para garantir o monitoramento adequado das condições de funcionamento da mini-ETE e a qualidade dos insumos gerados a partir do tratamento do esgoto sanitário do Campus, serão colocados instrumentos para medição de grandezas associadas, em locais pré-determinados como sendo os geradores de melhor informação.

Dentre estes dispositivos destacam-se medidores de vazão, de pH, de temperatura, de potência elétrica, de oxigênio dissolvido, de potencial de oxi-redução, entre outros, sendo monitorados por um sistema supervisor, que é constituído do programa de controle com as diretrizes adequadas ao bom funcionamento da mini-estação.

A mini-ETE produz, além do biogás, biofertilizante e águas residuárias. Com vistas a garantir que tais produtos mantenham bons níveis de qualidade, sem causar prejuízo à saúde das populações assistidas pela mini-ETE, se faz necessário monitorar características químicas e bioquímicas que possibilitam estabelecer a carga poluidora existente nesses produtos e, por conseguinte, o índice de contaminação dos recursos hídricos. Dentre essas características, destacam-se a demanda química de oxigênio (DQO) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), as quais pretende-se monitorar neste processo.

A metodologia a ser adotada para essa proposta de pesquisa contempla os seguintes passos: estabelecimento de uma amostra padrão de água não contaminada; monitoramento da temperatura em todas as medições estabelecidas; medição do pH dessa amostra; medição do oxigênio dissolvido (OD) nessa amostra; medição do potencial de oxi-redução (POR) dessa amostra; medição do total de sólidos dissolvidos (TSD) nessa amostra; testar cada uma das aquisições de dados oriundas das medições com programas aplicativos especializados (MATLAB, SCILAB, Elipse SCADA, NI LabVIEW); relacionar os resultados e estabelecer os melhores padrões de medida; estabelecer uma relação entre as medições realizadas e os valores de DBO e de DQO equivalentes; obter uma amostra padrão de água contaminada (esgoto), estabelecendo condições similares às da mini-ETE: sem oxigenação (anaeróbio) e com oxigenação (aeróbio); repetir as medições de pH, OD, POR e TSD; a partir do modelo matemático estabelecido, realizar as medições indiretas da DBO e da DQO.

### **7.2.3. Automatização e controle de uma mini-ETE**

O principal objetivo dessa proposta é automatizar o sistema de cogeração associado à mini-estação de tratamento de esgoto já implantada na UNESP – Campus de Guaratinguetá, proporcionando a racionalização do uso dos recursos ali produzidos (biogás, água tratada e biofertilizante líquido para ferti-irrigação). Como consequência natural dessa automatização, outros sub-sistemas da mini-ETE também serão monitorados e, quando for necessário, terão seus parâmetros ajustados.

Normalmente, esse nível de automatização utiliza, além de sensores e atuadores distribuídos pela planta, CLP (Controlador Lógico Programável) para supervisão e controle do sistema, muitas vezes orientado por um sistema SCADA (*Supervisory, Control, And Data Acquisition*).

Outra consequência desse trabalho, relacionada diretamente com a racionalização dos recursos produzidos, é estudar o uso da energia do biogás oriundo do tratamento anaeróbio do esgoto na mini-ETE, diminuindo assim o impacto ambiental provocado pela emissão do biogás e dos gases de exaustão do motor.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Site disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Visitado em 6-fevereiro-2006.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Site disponível em <http://www.anp.gov.br>. Visitado em 9-dezembro-2004.

BAKKEN, B. H.; BELSNES, M. M.; ROYNSTRAND, J. **Energy distribution systems with multiple energy carriers**. SITEF Energy Research (internal report), Trodnheim, 2000.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2002.

BANCO CENTRAL DO BRASIL – BACEN. Site disponível em <http://www.bacen.gov.br>. Visitado em 6-fevereiro-2006.

BEDUSCHI, L. C.; LOPES, L. R.; BENINCASA, M.; ORTOLANI, A. F.; LUCAS JÚNIOR, J. Viabilidade econômica do uso de biodigestores. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 6, n. 2, p. 31-36, 1983.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E.; WYLEN, G. J. VAN. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003.

BRIZI, F. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: comparison between natural gas and biogas**. Università degli Studi di Perugia and São Paulo State University, São Paulo, 2002, 74 p.

CARBON NETWORKS PROJETOS AMBIENTAIS – CARBON. Site disponível em <http://www.carbonnetworks.com.br/>. Visitado em 17-Março-2007.

CEOLATO, L. Estação de tratamento de esgoto da Motorola. In: **Curso de reciclagem de resíduos urbanos e industriais no solo agrícola**, Instituto Agrônômico de Campinas – IAC, Campinas, 2003, 43 p.



CHEN, C. L.; CHUNG, F. Y. Design and analysis of neural/fuzzy variable structural PID control systems. **IEEE Process Control Theory and Applications**, v.143, n. 2, 1996.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. Site disponível em <http://www.sabesp.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO – CORSAN. Site disponível em <http://www.corsan.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

CZIESLA, F.; TSATSARONIS, G. Iterative exergoeconomic evaluation and improvement of thermal power plants using fuzzy inference systems. **Energy Conversion & Management**, v. 43, 2002.

DHILLON, J. S.; KOTHARI, D. P. The surrogate worth trade-off approach for multiobjective thermal power dispatch problem. **Electric Power Systems Research**, v. 56, 2000.

DIAS, P. H. **Análise Energética, Exergética e Econômica da Ampliação do Sistema de Cogeração Aplicado à Votorantim Celulose e Papel S.A.** Guaratinguetá, 2005. 90 p. Dissertação de Mestrado. UNESP – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”.

GENOVESI, A.; HARMAND, J.; STEYER, J. P. A fuzzy logic based diagnosis system for the on-line supervision of an anaerobic digester pilot-plant. **Biochemical Engineering Journal**, v. 3, 1999.

GODOY JÚNIOR, E.; SILVEIRA, J. L.; GIACAGLIA, G. E. O. Miniestações de Tratamento de Esgoto e Reuso de Águas Associada a Sistema de Cogeração Energética no Aproveitamento do Biogás Produzido. In: **XI SILUBESA – Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Natal, 2004.

GUARDABASSI, P.; PIRES, R. G. Autogeração de energia elétrica em condomínios residenciais utilizando biogás de esgoto/gás natural. In: Ferrer, J. T. V. (Ed.). **Biogás: projetos e pesquisas no Brasil**. São Paulo: SMA, 2006, pp. 131-137.

HU, S. D. **Cogeneration**. Reston: Reston Publishing Company, 1986.

INIYAN, S.; SUMATHY, K. The application of a Delphi technique in the linear programming optimization of future renewable energy options for India. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, 2003.

JORDÃO, E. P.; ALÉM SOBRINHO, P. Pesquisa e Experiência com Pós-tratamento para Reatores UASB no Brasil. In: **PROSAB / FINEP**, São Carlos, 2000, 8 p.

JORDÃO, E. P. ALÉM SOBRINHO, P. Pesquisa e Experiência com Pós-tratamento para Reatores UASB no Brasil. In: **Relatório PROSAB / FINEP**, São Carlos, 2004, 13 p.

KAMBHAMPATI, C.; THAM, M. T.; MONTAGUE, G. A.; MORRIS, A. J. Optimising control of fermentation processes. **IEEE Proceedings-D**, v. 139, n. 1, 1992.

KISHIMOTO, M.; BELUSO, M.; OMARA, T.; KATAKURA, Y.; FUKUDA, H.; SUGA, K. I. Construction of fuzzy control system for a bioreactor using biomass support particles. **Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic**, v. 17, 2002.

LE GOFF, P.; HORNUT, J. M. **Exergy analysis and exergo-economic optimization of industrial processes**. Institute Français du Pétrole, Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, Nancy, France, 1998, 4 p.

MARTINS, O. S.; GUARDABASSI, P.; COSTA D. F. da. Produção de energia elétrica a partir do biogás resultante do tratamento de esgoto: projeto-piloto na ETE de Barueri na Grande São Paulo. In: Ferrer, J. T. V. (Ed.). **Biogás: projetos e pesquisas no Brasil**. São Paulo: SMA, 2006, pp. 139-147.

NIKULSHIN, V.; WU, C.; NIKULSHINA, V. Optimization of Energy Intensive Systems with Renewable Energy Sources. In: **Proceedings of Fifth Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission**, São Pedro, 2003, 8 p.

OLIVEIRA, R. A. de; FORESTI, E. Balanço de massa de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) tratando águas residuárias de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 807-820, set./dez. 2004.

OLIVEIRA, S. de. **Resíduos sólidos urbanos – RSU: apostila do curso de**

**Agromonia.** Botucatu: UNESP-FCA (Departamento de Recursos Naturais), p. 19, abr. 2001.

PETROBRAS GÁS S.A. – GASPETRO. Site disponível em <http://www.gaspetro.com.br>. Visitado em 25-dezembro-2004.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS. Site disponível em <http://www.petrobras.com.br>. Visitado em 9-dezembro-2004.

RUSSELL, J. B. **Química geral.** 2.ed. São Paulo: Makron Books, 1994. vol. 1.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUAS, ESGOTOS E RESÍDUOS DE GUARATINGUETÁ – SAAEG. Site disponível em <http://www.saaeg.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

SILVEIRA, J. L. **Estudo de sistema de cogeração aplicado a fabricação de papel e celulose.** Itajubá, 1990. 141 p. Dissertação de Mestrado. EFEI – Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

SILVEIRA, J. L. **Uma contribuição para a modelagem termoeconômica: otimização da operação e do projeto de sistemas energéticos.** 1998. 60 f. Tese (Livre Docência em Termodinâmica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1998.

SNATURAL. **A Aeração no Tratamento de Efluentes com Aeradores (Tratamento Aeróbio) por Ar Difuso.** 8 p. 2006. Site disponível em <http://www.snatural.com.br/Efluentes.htm>. Visitado em 10-Junho-2007.

TORRES, E. A. **Análise Exergética: Notas de Aula.** Salvador: Escola Politécnica da UFBA, 2001, 32 p.

TUNA, C. E. **Um método de análise exergoeconômica para otimização de sistemas energéticos.** 1999. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

UCHE, J.; SERRA, L.; VALERO, A. Thermo-economic optimization of a dual-purpose power and desalination plant. **Desalination**, v. 136, n. 1, 2001.

VARGAS, A.; SIFUENTES, W. Despacho Economico Hidrotermico Multibalse Multinodal de Corto Plazo. Estado del Arte de los Metodos de Optimizacion. In: **Proceedings of Fifth Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission**, São Pedro, 2003.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil**. São Paulo, USP, Dissertação de Mestrado, 2000, 205 p.

YILMAZ, T. Optimization of cogeneration systems under alternative performance criteria. **Energy Conversion and Management**, 2004, v. 45.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGÊNCIA MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS (JOINVILLE) – AMAE. Site disponível em <http://www.amae.sc.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

ÅSTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptive control**. 2.ed. Reading: Addison-Wesley, 1995.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

BELSTERLING, C. A. **Fluidic systems design**. New York: Wisley-Interscience, 1971.

BOEHM, R. F. **Design and analysis of thermal systems**. New York: john Wiley & Sons, 1987.

BUNKE, H.; KANDEL, A. **Series in Machine Perception and Artificial Intelligence**, Volume 41: Neuro-fuzzy Pattern Recognition. World Scientific Publishing, Singapore, 2000.

CASTRO, J. L. DE F. **Curso Básico de Operação de Estação de Tratamento de Água**. Serviço Autônomo de Águas e Esgotos de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2004. Disponível em <http://www.saaeg.com.br/aula.htm>. Site visitado em 20-março-2005.

CHAABENE, M.; ANNABI, M. A. **Dynamic Model for Predicting Solar Plant Performance and Optimum Control**. *Energy*, 1997, 22:567-78.

CHO, Y. W.; PARK, C. W.; KIM, J. H.; PARK, M. Indirect model reference adaptive fuzzy control of dynamic fuzzy-state space model. **IEEE Process Control Theory and Applications**, v. 148, n. 4, 2001.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO – CASAN. Site disponível em <http://www.casan.com.br>. Visitado em 14-Março-2007.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO AMAPÁ – CAESA. Site disponível em <http://www.caesa.ap.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2006.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ – CAGECE. Site disponível em <http://www.cagece.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO – COMGÁS. Site disponível em: <http://www.comgas.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL – CAESB. Site disponível em <http://www.caesb.df.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS – COPASA. Site disponível em <http://www.copasa.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE SERGIPE – DESO. Site disponível em <http://www.deso-se.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – SANEPAR. Site disponível em <http://www.sanepar.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS – CEDAE. Site disponível em <http://www.cedae.rj.gov.br/>. Visitado em 17-Março-2007.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE MARÍLIA – DAEM. Site disponível em <http://www.daem.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS (PORTO ALEGRE) – DMAE. Site disponível em <http://www.dmae.rs.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

EMPRESA BAIANA DE ÁGUAS E SANEAMENTO – EMBASA. Site disponível em <http://www.embasa.ba.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

ENASA ENGENHARIA. Site disponível em <http://www.ensaeng.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introduction to Fluid Mechanics**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1985.

GODOY JÚNIOR, E. **Sistema otimizado de reator anaeróbio de fluxo ascendente para tratamento de efluente de suinocultura**. Dissertação de Mestrado em Ciências Ambientais – concentração em Saneamento Ambiental, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2001, 52 p.

GODOY JÚNIOR, E.; CARROCCI, L. R.; SILVEIRA, J. L.; GIACAGLIA, G. E. O. Miniestação de tratamento anaeróbio-aeróbio de esgotos, associadas a sistema de cogeração de energia para aproveitamento *in situ* do biogás produzido. **In: CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, João Pessoa, 2002. 10 p.

GODOY JÚNIOR, E. SILVEIRA, J. L. GIACAGLIA, G. E. O. **Miniestações ecoeficientes de tratamento de esgoto e reuso de águas associadas a cogeneradores a biogás como técnica de conservação de água, energia e ambiente**. 20 p.

GOHOKAR, V. N. KHEDKAR, M. K. DHOLE, G. M. Formulations of distribution reconfiguration problem using network topology: a generalized approach. **Electric Power Systems Research**, v. 69, n. 2-3, 2004.

IENO, G.; NEGRO, L. **Termodinâmica**. São Paulo: Prentice Hall Brasil, 2003.

JANTZEN, J. **Tutorial on Fuzzy Logic**. Technical University of Denmark, Lyngby, 1998, 20 p.

JANTZEN, J. **Design of Fuzzy Controllers**. Technical University of Denmark, Lyngby, 1998, 27 p.

JANTZEN, J. A Tutorial on Adaptive Fuzzy Control. Technical University of Denmark, **In: Eunite 2002**, Lyngby, 2002.

LIZARRAGA, José M<sup>a</sup> S. **Cogeneración: aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos**. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, Segunda Edición, p. 565, Bilbao, 1994.

MACÊDO, J. A. B. **Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas**. 2. ed. CRQ-MG, Belo Horizonte, 2003, 450 p.

MILENIA AGROCIÊNCIAS S.A. Site disponível em <http://www.milenia.com.br/>. Visitado em 17-Março-2007.

MIZUMO. Site disponível em <http://www.mizumo.com.br/>. Visitado em 7-Fevereiro-2006.

NEVES, E. T. **Curso de hidráulica**. Porto Alegre: Editora Globo, 1960.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

RUSSELL, J. B. **Química geral**. 2. ed. v. 2. São Paulo: Makron Books, 1994.

SAGE, A. P. **Optimum systems control**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1968.

SALAMON, P.; NULTON, J. D.; SIRAGUSA, G.; ANDERSEN, T. R.; LIMON, A. Principles of control thermodynamics. **Energy**, v. 26, 2001.

SANEAMENTO DE GOIÁS S/A – SANEAGO. Site disponível em <http://www.saneago.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE BELÉM – SAAEB. Site disponível em <http://www.saaeb.com.br>. Visitado em 2-Julho-2006.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE CASIMIRO DE ABREU – SAAE. Site disponível em <http://www.saaedecasimiro.rj.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ARACRUZ – SAAE. Site disponível em <http://www.saaeara.com.br>. Visitado em 17-Março-2007.



SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE CAPIVARI – SAAE. Site disponível em <http://www.saaecapivari.com.br>. Visitado em 17-Março-2007.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE GUARULHOS – SAAE. Site disponível em <http://www.saaeguarulhos.sp.gov.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE JACAREÍ – SAAE. Site disponível em <http://www.saejacarei.com.br>. Visitado em 2-Julho-2005.

TAKAHASHI, Y.; RABINS, M. J.; AUSLANDER, D. M. **Control and dynamic systems**. Reading: Addison-Wesley, 1970.

TRIGÁS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Site disponível em <http://www.trigas.com.br>. Visitado em 3-julho-2005.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)