

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM CIÊNCIAS TÉRMICAS

Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto

Antonio Tavares de França Junior

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Ilha Solteira - SP

05 / 09 / 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

F814a	França Junior, Antonio Tavares de. Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto / Antonio Tavares de França Junior. - Ilha Solteira : [s.n.], 2008. 148 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008 Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos Bibliografia: p. 113-119 1. Esgotos. 2. Lodo de esgoto. 3. Biogás. 4. Energia elétrica e calor - Cogeração.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NUMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

AUTOR: ANTONIO TAVARES DE FRANÇA JÚNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA
MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EDUARDO MIRKO VALENZUELA TURDERA

Faculdade de Ciencias Exatas e Tecnológicas / Universidade Federal da Grande Dourados

Data da realização: 05 de setembro de 2008.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Dedicatória

Dedico este trabalho a toda minha família em especial aos meus pais, Sr. Antonio e Sra. Valda; aos meus avós, José Nunes e Maria Olinda (em memória); a minha tia Inalda; aos meus irmãos, Olinda e José; aos meus queridos sobrinhos, Rafael e Lorena; e ao meu grande primo e amigo Fadel, que sempre me ajudou em momentos muito difíceis. Sou eternamente grato a todos pela extrema compreensão, paciência e motivação que todos deram a mim para que continuasse em frente com meus estudos, mesmo que tenha ficado ausente em momentos de dificuldade, meu coração sempre esteve com vocês.

Dedico também a minha querida Katiuscia, que sempre me deu forças pra continuar subindo degraus importantes, pelo extremo amor e carinho.

Agradecimentos

A Deus, meu senhor e pai, que me deu a graça da vida, inteligência e saúde.

A minha família, pelo apoio, carinho e amor, por todos esses anos de dedicação aos estudos.

Aos meus amigos de muitos anos que me deram força e incentivo. Aos amigos que fiz na pós-graduação, em especial aos Engenheiros, aos Físicos, aos Matemáticos, ao pessoal do NAC-DEM e do NUPLN e aos estagiários pela ajuda e momentos agradáveis durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador e aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pela ajuda e amizade.

Pensamento

“Ser inteligente não é só saber a resposta de qualquer problema mais sim achar inúmeras saídas para resolvê-lo”.

(autor desconhecido).

Resumo

No presente trabalho avalia-se uma opção para o aproveitamento energético do biogás gerado numa estação de tratamento de esgoto urbano, com capacidade de tratar os rejeitos provenientes de uma cidade de 1.000.000 de habitantes, através da instalação de um sistema de cogeração de energia, usando tecnologias baseadas em um conjunto turbina a gás e turbina a vapor (Caso 1) ou motor a gás e turbina a vapor (Caso 2), para produção de eletricidade para consumo próprio e de vapor para secagem do lodo. São realizadas análises termodinâmicas e termoeconômicas das duas plantas de cogeração propostas definindo-se índices de desempenho, como eficiências, custos unitários de produção eletricidade, calor e lodo seco, em função dos equipamentos utilizados e custos envolvidos com a implantação, operação e manutenção. Por fim, são realizadas análises econômicas das plantas propostas para verificação da viabilidade da implantação, levando-se em conta as receitas obtidas com a comercialização de créditos de carbono e de lodo como biofertilizante, bem como a diferença de custo entre a eletricidade gerada e a atualmente comprada. Dos indicadores estabelecidos e dos resultados obtidos, pode-se concluir que o primeiro caso parece significativamente mais atrativo do que o segundo.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto, lodo de esgoto, biogás de esgoto, cogeração de energia.

Abstract

In the present work an option for the deployment of biogas energy generated at a urban sewage treatment plant with capacity to process the effluents from a city of 1,000,000 inhabitants is studied, considering the installation of a cogeneration power system, using technologies based on a gas turbine and steam turbine set (Case 1) or a gas IC engine and steam turbine set (Case 2), for production of electricity for own consumption as well as steam for drying the sewage residual sludge. Thermoeconomic and thermodynamic analysis are performed for both cogeneration plants proposed, setting up performance indicators, such as efficiencies, unitary costs for production of electricity, heat and dry mud, depending on the equipment and costs involved with the deployment, operation and maintenance. Finally, an economic analysis of the plants proposed is developed for verifying the feasibility of implementation, taking into account the proceeds from the sales of carbon credits and mud as biofertilizer as well as the difference between the costs of electricity generated and currently purchased. From the settings established and results obtained, it can be concluded that the first case seems to be significantly more attractive than the second.

Keywords: Sewage treatment, sewage silt, sewage biogas, cogeneration.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Fluxograma de um sistema de aproveitamento de esgoto.....	21
Figura 1.2: Fotos de um filtro prensa de esteira.....	27
Figura 1.3: Esquema e foto de uma centrífuga.	28
Figura 1.4: Secador granulador rotativo.	29
Figura 1.5: Secador de leito fluidizado.	29
Figura 1.6: Foto e ilustração de um secador tipo esteira.....	30
Figura 1.7: Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.	33
Figura 1.8: Processo completo de um biodigestor.	36
Figura 1.9: Biodigestor da Marinha.	37
Figura 1.10: Biodigestor Chinês.	38
Figura 1.11: Biodigestor Indiano.....	39
Figura 1.12: Esquema de funcionamento de um RALF/UASB.....	40
Figura 1.13: Esquema de uma estação de tratamento de esgoto com biodigestores.....	41
Figura 1.14: Esquema de uma estação de tratamento de esgoto com UASB.	42
Figura 3.1: Detalhes construtivos de uma turbina a gás.	52
Figura 3.2: Ciclo de Brayton básico.....	53
Figura 3.3: Detalhes construtivos de uma micro-turbina a gás.....	55
Figura 3.4: Fotos de um motor a gás operando num sistema de cogeração.	58
Figura 4.1: Planta baixa de uma estação de tratamento de esgoto.	61
Figura 4.2: Planta para produção de biogás, geração de eletricidade e secagem do lodo, utilizando turbinas (Caso 1).	64

Figura 4.3: Planta para produção de biogás, geração de eletricidade e secagem do lodo, utilizando motor e turbina (Caso 2).....	64
Figura 4.4: Planta do Caso 1, confeccionada no IPSEpro®.....	66
Figura 4.5: Planta do Caso 2, confeccionada no IPSEpro®.....	66
Figura 5.1: Diagrama funcional termoeconômico para o Caso 1.....	74
Figura 5.2: Diagrama funcional termoeconômico para o Caso 2.....	75
Figura 5.3: Modelo estrutural baseado em custos para as plantas.	83
Figura 6.1: Simulação do Caso 1, confeccionado no IPSEpro®.	99
Figura 6.2: Simulação do Caso 2, confeccionado no IPSEpro®.	100
Figura 6.3: Custos do lodo produzido pelos Casos 1 e 2.	106
Figura 6.4: Custo da eletricidade gerada nos Casos 1 e 2.....	106
Figura 6.5: Custo de manufatura exergético dos Casos 1 e 2.....	107
Figura 6.6: Receita anual nos Casos 1 e 2 ao longo da vida útil das plantas. ...	109
Figura B.1: Representação esquemática da estrutura do IPSEpro®.	125
Figura B.2: Equipamentos da biblioteca APP.....	126
Figura B.3: Interface da biblioteca <i>Advanced Power Plant</i>	127
Figura B.4: Modelos de turbinas existentes na biblioteca <i>Gas Turbine</i>	128
Figura B.5: Interface da biblioteca <i>Gas Turbine</i>	128
Figura B.6: Interface do Módulo MDK.	130
Figura B.7: Interface do Módulo PSE.	131

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Composição típica do biogás produzido e purificado.	32
Tabela 1.2: Comparação entre processos aeróbios e anaeróbios ¹	33
Tabela 1.3: Poder calorífico inferior de vários tipos de gases.	34
Tabela 3.1: Comparação entre as tecnologias de conversão de energia.	59
Tabela 5.1: Valores do expoente α para vários equipamentos.	83
Tabela 5.2: Tarifas médias por classe de consumo e do país (R\$/MWh).	89
Tabela 6.1: Representação das características termodinâmicas do Caso 1.	94
Tabela 6.2: Potência gerada ou consumida nos equipamentos do Caso 1.	95
Tabela 6.3: Representação das características termodinâmicas do Caso 2.	95
Tabela 6.4: Potência gerada ou consumida nos equipamentos do Caso 2.	95
Tabela 6.5: Valores dos fluxos exergéticos associados ao Caso 1.	97
Tabela 6.6: Valores dos fluxos exergéticos associados ao Caso 2.	98
Tabela 6.7: Comparação termodinâmica entre os Casos 1 e 2.	101
Tabela 6.8: Custos dos equipamentos para geração de eletricidade no Caso 1.	103
Tabela 6.9: Custos dos equipamentos para geração de eletricidade no Caso 2.	103
Tabela 6.10: Comparação econômica entre os Casos 1 e 2.	104
Tabela 6.11: Comparação dos custos nas diversas condições de análise.	105
Tabela 6.12: Comparação das receitas anuais entre os Casos 1 e 2.	108

Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CTH	Centro de Tecnologia de Hidráulica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EGT	Energia total gerada
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FTI	Fator de intensidade de carbono equivalente
FUE	Fator de Utilização de Energia
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natural
GNBP	Gás Natural à Baixa Pressão
IGP	Índice de Geração de Potência
IPE	Índice de Poupança de Energia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mini-ETE	Mini-estação de tratamento
NELA	<i>National Electric Light Association</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
PDD	<i>Project Design Document</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
pH	Potencial de hidrogênio
ppm	Parte por milhão
PIR	Planejamento Integrado de Recursos Energéticos

PSE	<i>Process Simulation Environment</i>
PURPA	<i>Public Utilities Regulatory Policy Act</i>
RALF	Reatores Anaeróbios de Leito Fluidizado
RPC	Razão Potência/Calor
SCA	Sistemas de Controle Ambiental
TSS	Total de sólidos em suspensão
TSD	Total de sólidos dissolvidos
UASB	<i>Up Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors</i>

Simbologia

Símbolos Latinos

c_{bf}	Custo de produção do lodo (US\$/kWh)
c_{bg}	Custo da produção de biogás (US\$/kWh)
c_{el}	Custo da produção de eletricidade (US\$/kWh)
c_i	Custo exergético do produto i (US\$/kWh)
$c_{OM_{bi}}$	Custo de operação e manutenção dos biodigestores considerando a ênfase na produção do biogás (US\$/kWh)
CM_{ex}	Custo de manufatura exergético (US\$/h)
$c_{OM_{el}}$	Custo de operação e manutenção dos equipamentos para geração de eletricidade (US\$/kWh)
$c_{OM_{sec}}$	Custo de operação e manutenção dos equipamentos para secagem do lodo (US\$/kWh)
C_p	Calor específico (kJ/kgK)
$C_{p_{ar}}$	Calor específico do ar (kJ/kgK)
c_{pu}	Custo de equipamentos para purificação do biogás (US\$/kWh)
E_p	Energia elétrica produzida (kW)
$C_{p_{ge}}$	Calor específico dos gases de exaustão (kJ/kgK)
ex	Exergia específica (kJ/kg)
$\dot{E}_x$	Funções exergéticas em base incremental (kW)
$\dot{E}_{x_{i,j}}$	j -ésima saída à i -ésima unidade (kW)
$\dot{E}_{x_{i,k}}$	k -ésima saída à i -ésima unidade (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_{bf}	Fator de produção (ponderação) do lodo
fp_{bg}	Fator de produção (ponderação) do biogás
h	Entalpia específica (kJ/kg)
h_0	Entalpia específica de referência (kJ/kg)
I_{bi}	Investimento nos biodigestores (US\$)
I_{el}	Investimento em equipamentos para geração de eletricidade (US\$)
I_{sec}	Investimento em equipamentos para secagem do lodo (US\$)
j	Taxa percentual de juros anual (%)
N	Período de amortização de capital (anos)
$\dot{m}$	Fluxo de massa (kg/s)
$\dot{m}_{ar}$	Vazão mássica do ar (kg/s)
$\dot{m}_{bg}$	Vazão mássica do biogás (kg/s)
M_{bg}	Massa molecular do biogás (g/mol)
n	Período considerado (anos)
N	Período de amortização de capital (anos)
P	Pressão (kPa)
P_{bf}	Valor médio do lodo (US\$/t)
P_{co}	Valor de certificados de emissões evitadas de CO ₂ (US\$/t)
PE_{bg}	Potencial energético da queima do biogás (kW)
P_{el}	Valor médio da tarifação de energia elétrica (US\$/kWh)
PCI	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)
$\dot{Q}$	Taxa de calor (kW)

Q_{ae}	Vazão volumétrica do esgoto (m ³ /h)
Q_{co}	Quantidade de créditos de carbono (t/h)
Q_{bf}	Vazão volumétrica do lodo (t/h)
Q_{bg}	Produção média de biogás (m ³ /h)
R	Receita anual (US\$/ano)
s	Entropia específica (kJ/kg)
s_0	Entropia específica de referência (kJ/kg)
$\dot{S}_{ger}$	Fluxo de geração de entropia (kW/kg)
T	Temperatura (K)
T_{ar}	Temperatura do ar (K)
T_{ge}	Temperatura dos gases de exaustão (K)
T_0	Temperatura de referência (K)
t_{op}	Tempo anual de funcionamento da planta (h/ano)
tx_{bg}	Taxa média de geração de biogás (%)
TCO_2	Total de CO ₂ equivalente evitado (t)
TOT_{CEE}	Total de US\$ em certificados (US\$/ano)
TVU_{pl}	Valor total durante a vida útil da planta (US\$)
$\dot{W}$	Potência (kW)
$\dot{W}_{ele}$	Potência referente ao acionamento do gerador (kW)
$\dot{W}_{bomb}$	Potência de bombeamento (kW)
$\dot{W}_{comp}$	Potência de compressão (kW)

Símbolos Gregos

μ_i	Potencial químico do elemento
η	Eficiência ou rendimento baseado na primeira lei da termodinâmica
ψ	Eficiência termodinâmica real

Subscritos/Sobrescritos

<i>ar</i>	Ar
<i>bf</i>	Lodo
<i>bg</i>	Biogás
<i>bi</i>	Biodigestor
<i>CEE</i>	Certificados de Emissões Evitadas
<i>0</i>	Estado de referência
<i>E</i>	Entrada
<i>el</i>	Eletricidade
<i>ge</i>	Gases de Exaustão
<i>MCI</i>	Motor de Combustão Interna
<i>Q</i>	Referente a calor
<i>OM</i>	Operação e manutenção
<i>pl</i>	Planta
<i>S</i>	Saída
<i>T</i>	Total
<i>TG</i>	Turbina a Gás
<i>TV</i>	Turbina a Vapor
<i>W</i>	Referente a trabalho

Sumário

1. Introdução	20
1.1. Motivação e Relevância do Tema	20
1.2. Objetivos	22
1.3. Tratamento de Esgoto, Produção e Aproveitamento do Lodo e do Biogás	22
1.3.1. Tratamento de Esgoto e Características do Processo	22
1.3.2. Produção e Aproveitamento do Lodo	25
1.3.3. Produção e Aproveitamento do Biogás	31
2. Revisão da Literatura	43
3. Tecnologias para Aproveitamento Energético do Biogás	51
3.1. Turbinas a Gás	51
3.2. Micro-turbina a Gás	54
3.3. Motores de Combustão Interna	56
3.4. Dados Comparativos entre as Tecnologias Disponíveis	58
4. Modelos de Plantas para Análise	60
4.1. Planta e Dados Característicos	60
4.2. Modelos para Análise	63
4.3. Metodologia de Solução	65
5. Termoeconomia Aplicada	67
5.1. Introdução Termodinâmica	67
5.2. Conceitos Termoeconômicos	71
5.2.1. Determinação das Funções Exergéticas e dos Custos dos Produtos	75
5.2.1.1. Determinação das Funções Exergéticas	76
5.2.1.2. Determinação dos Custos dos Produtos	81

5.3. Análise Econômica	87
5.3.1. Receita Anual	87
5.3.2. Aspectos Econômicos da Produção de Biogás	89
5.3.3. Contabilização e Comercialização de Créditos de Carbono.....	91
6. Resultados e Discussões	94
7. Conclusões.....	110
Referências	113
Anexo A – Protocolo de Kyoto, MDL e Créditos de Carbono	120
A.1. Protocolo de Kyoto.....	120
A.2. Créditos de Carbono	122
Anexo B – Informações sobre o Programa IPSEpro [®]	125
B.1. Informações Gerais.....	125
B.2. Bibliotecas do IPSEpro [®]	126
B.2.1. Biblioteca APP	126
B.2.2. Biblioteca <i>Gas Turbine</i>	127
B.3. Módulos do IPSEpro [®]	129
B.3.1. Módulo MDK	129
B.3.2. Módulo PSE	130
B.3.3. Módulo PSExcel.....	131
Anexo C – Dados de Alguns Equipamentos Utilizados nas Plantas	132
C.1. Turbina a Gás	132
C.2. Motor a Biogás.....	134
C.3. Turbina a Vapor	137

C.4. Secador de Lodo	139
C.5. Bomba d'água.....	142
C.6. Trocadores de calor	144
C.7. Condensador	147

Preâmbulo

Este trabalho está inserido dentro das linhas de pesquisa do NUPLEN (Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia) do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Ilha Solteira e está estruturado em sete Capítulos, cujos conteúdos são descritos brevemente a seguir.

No Capítulo 1 são apresentadas a motivação para realização deste trabalho, a importância do tema e os objetivos do mesmo, bem como considerações a respeito de tratamento de esgoto, produção e aproveitamento do lodo e do biogás.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do assunto da dissertação.

No Capítulo 3 é feito um breve histórico das tecnologias disponíveis para conversão de energia com uso do biogás.

No Capítulo 4 são mostradas as plantas de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), sobre as quais serão feitos os estudos, sendo apresentados os dados operacionais, bem como as tecnologias de cogeração que podem ser aplicadas às plantas propostas.

No Capítulo 5 são abordados os conceitos termodinâmicos, termoeconômicos e econômicos utilizados neste trabalho.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos através das aplicações dos conceitos envolvidos nas configurações definidas para o aproveitamento energético do biogás na ETE.

No Capítulo 7 estão as conclusões a respeito dos resultados obtidos e as

sugestões para trabalhos futuros.

Por último, são listadas as bibliografias utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, bem como apresentados alguns tópicos em anexo, relacionados ao programa utilizado para simulação das plantas e dados de alguns equipamentos utilizados.

1. Introdução

1.1. Motivação e Relevância do Tema

Um problema que atinge várias cidades do país é a falta de tratamento ou tratamento inadequado dos efluentes líquidos, os quais às vezes ficam a céu aberto ou são despejados diretamente nos cursos de água, provocando um grande impacto ambiental.

As pesquisas e o desenvolvimento relacionados ao tratamento e disposição do esgoto têm aumentado nos últimos anos. Há também um aumento no conhecimento da taxa de produção, métodos de caracterização, técnicas de manejo e processamento, benefícios e riscos da utilização do lodo e também do comportamento do mesmo no meio ambiente.

Conforme Godoy Júnior *et al.* (2004), o CH_4 presente no biogás de esgoto é cerca de 21 vezes mais prejudicial para o meio ambiente do que o CO_2 , tornando-se, portanto, muito interessante o aproveitamento energético desse biogás, conciliando a geração de energia elétrica renovável com a questão do saneamento ambiental, através da redução dos gases de exaustão.

Os Sistemas de Controle Ambiental (SCA) apresentam tecnologia integrada aos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) no caso de distribuição e transformação da carga poluidora dos afluentes em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), tendo como destaques:

- A obtenção de energia renovável na forma de biogás e conseqüente geração de créditos de carbono, de acordo com o Protocolo de Kyoto (Anexo A);
- A possibilidade de reuso da água;
- A minimização dos passivos ambientais (geração mínima de lodos);

- A geração de lodos biológicos prontamente aplicáveis como adubo orgânico ou pós-processados para uso em ração animal.

Na Figura 1.1 é apresentado um fluxograma de um sistema de controle ambiental, que pode ser considerada uma alternativa positiva se comparada ao atual estágio de utilização de energia, motivando, assim a realização desta dissertação.

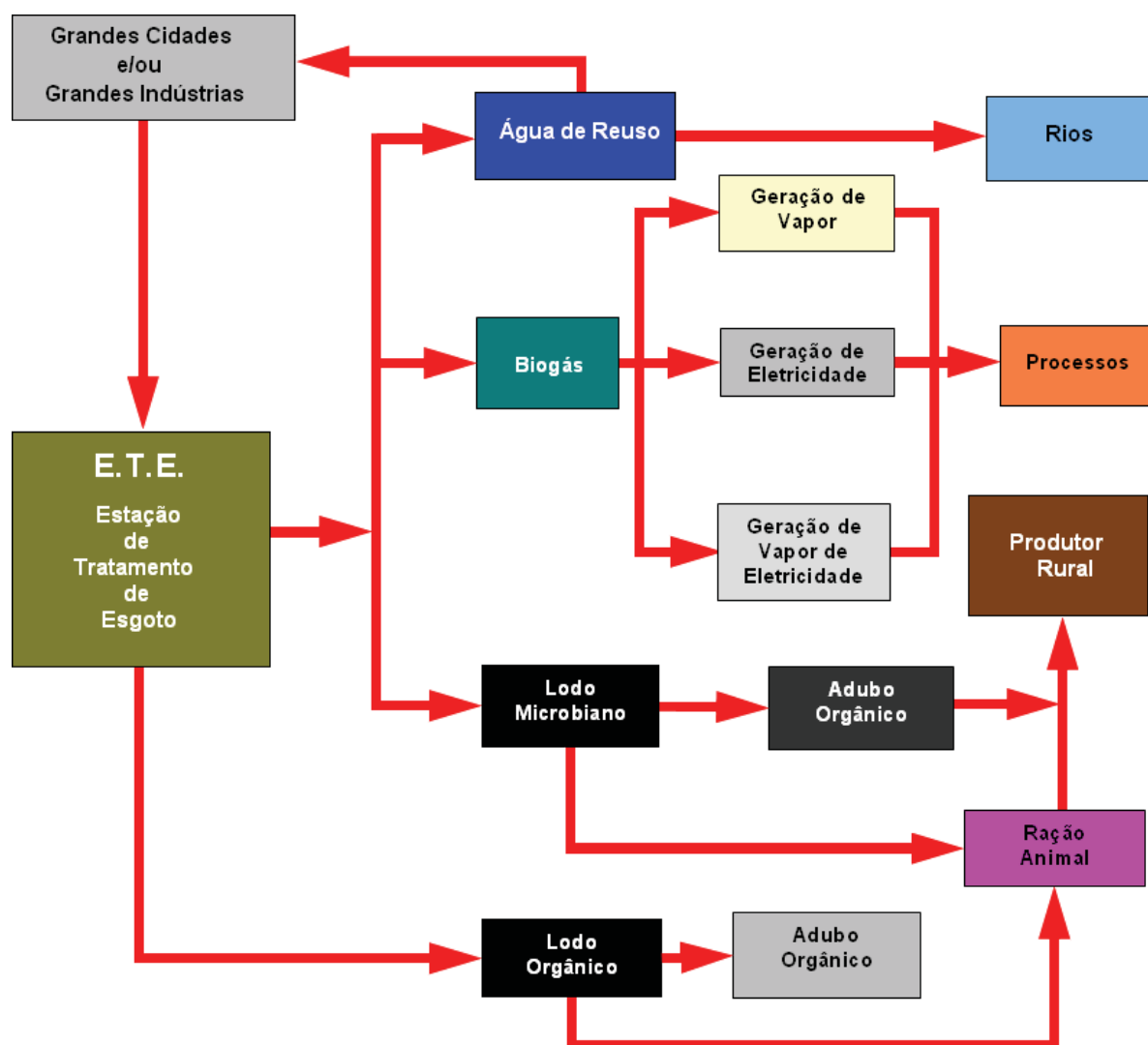


Figura 1.1: Fluxograma de um sistema de aproveitamento de esgoto.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é analisar o aproveitamento energético do biogás gerado em uma ETE com capacidade de tratar os rejeitos provenientes de uma cidade de 1.000.000 de habitantes, para produzir eletricidade para consumo próprio e vapor para secagem do lodo para ser utilizado como adubo, evitando o desperdício de energia com a queima tradicional em queimadores (*flares*).

Diante deste contexto, serão definidas as plantas propostas para a ETE, os principais equipamentos e acessórios utilizados no projeto, bem como algumas configurações típicas de ciclos de cogeração de energia que podem ser adaptadas ao sistema de tratamento de esgoto.

Para tanto, serão realizadas análises termodinâmica, termoeconômica e econômica dos sistemas propostos para verificar a viabilidade da implantação, utilizando-se o programa comercial IPSEpro[®].

1.3. Tratamento de Esgoto, Produção e Aproveitamento do Lodo e do Biogás

1.3.1. Tratamento de Esgoto e Características do Processo

A água é utilizada de diversas maneiras no dia-a-dia, para tomar banho, lavar louça e na descarga do vaso sanitário.

Depois de eliminada, ela passa a ser chamada de esgoto. A origem do esgoto pode ser, além de doméstica, pluvial (água das chuvas) e industrial (água utilizada nos processos industriais). Se não receber tratamento adequado, o esgoto pode causar enormes prejuízos à saúde pública por meio de transmissão de doenças, ou pelo contato direto ou através de ratos, baratas e moscas. Ele pode ainda poluir rios e fontes, afetando os recursos hídricos e a vida vegetal e animal. Para evitar esses problemas, as autoridades sanitárias instituíram padrões de qualidade de efluentes.

Segundo Lamas (2007) as principais características do esgoto e de seu processo de tratamento são descritas como:

- **Demanda química de oxigênio (DQO):** tem o objetivo de medir a quantidade necessária de oxigênio para oxidar quimicamente a matéria orgânica.
- **Demanda bioquímica de oxigênio (DBO):** tem o objetivo de medir a carga de poluentes de uma água residual, que contém inúmeros poluentes compostos de muitos e variados tipos de materiais orgânicos e inorgânicos que são difíceis de serem mensurados individualmente.
- **Tempo de retenção hidráulica:** é o período de tempo que os esgotos permanecem dentro do tanque, dado pela relação entre o volume do tanque e a vazão de afluente.
- **Aeração:** é o processo de inserção de ar em um líquido, essa operação visa fornecer o oxigênio necessário para os microorganismos se desenvolverem nos lodos ativados provocando a agitação e homogeneização suficiente para assegurar o contato entre os elementos poluentes e o oxigênio introduzido.
- **Oxigênio dissolvido (OD):** indica o grau de arejamento da água onde sua presença é importante para a sobrevivência dos seres aquáticos aeróbios e sua ausência propicia a vida dos microorganismos anaeróbios.
- **Potencial de hidrogênio (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 reuso pode ter seu valor de pH entre seis e nove e meio.

- **Turbidez:** indica a presença de pequenas partículas em suspensão, matérias orgânicas e inorgânicas finamente divididas, plâncton e outros microorganismos. A sua medida é realizada pela comparação da intensidade em uma amostra padrão. Quanto maior seja a intensidade da luz espalhada, maior será a turbidez.
- **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.

Os processos de tratamento têm o objetivo de diminuir o potencial poluidor do esgoto antes que ele retorne ao meio ambiente, geralmente, pela separação dos materiais sólidos por meio de processos físicos, químicos e biológicos existindo vários processos que se diferenciam. De um modo geral, consiste em separar as partes líquidas e sólidas do esgoto, para tratá-las separadamente, reduzindo ao máximo a carga poluidora, sem que o meio ambiente seja prejudicado.

Geralmente, em grandes cidades e/ou grandes indústrias, o tratamento dos esgotos tem que ser completo, evitando problemas com a queima da grande quantidade de metano formado pela decomposição do esgoto por microorganismos e com a disposição do grande volume de lodo produzido. O tratamento de esgotos divide-se em duas fases: líquida e sólida e como resultado dos dois processos de tratamento tem-se o efluente líquido e o lodo.

O esgoto é composto basicamente de 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos (70 % de materiais orgânicos, como: proteínas, carboidratos e gorduras e 30 % de materiais inorgânicos, como: metais, sais e areia).

O efluente é a água com redução significativa de materiais poluentes, parte

líquida sem 90 % das impurezas e pode ser lançada nos chamados corpos d'água.

O lodo, que contém material sólido resultante do processo de tratamento de esgoto, precisa ser tratado para destinação final em aterros sanitários ou na agricultura.

Assim, as estações de tratamento de esgoto reproduzem, num menor espaço e num menor tempo, a capacidade natural que os cursos d'água têm de decompor a matéria orgânica, pois os principais agentes de tratamento (bactérias aeróbias ou anaeróbias) encontram aí condições mais favoráveis e se reproduzem em grande escala fazendo a degradação da matéria orgânica contida nos esgotos.

1.3.2. Produção e Aproveitamento do Lodo

Em todos os processos de tratamento de esgoto existem subprodutos que devem ser tratados para que seja lançado no meio ambiente, o principal subproduto do tratamento de esgoto é o lodo.

O lodo é uma mistura complexa de sólidos de origem biológica e mineral que são removidos do esgoto. Os lodos resultantes do processo de tratamento de esgoto são constituídos basicamente de materiais orgânicos (sólidos voláteis) e minerais (sólidos fixos), além de água. Suas características como composição e propriedades podem variar bastante, dependendo da origem do esgoto e do processo de tratamento empregado.

O lodo pode ser submetido a diferentes tipos de tratamento, o que resulta em diferentes características físicas e químicas do lodo final, o qual pode ser aproveitado por meio dos processos de pirólise, compostagem e/ou secagem.

Dentre os processos que constituem a fase sólida do tratamento, os usualmente empregados nas ETEs são:

- a) Processos físicos para concentração do teor de sólidos, através do adensamento por gravidade e por flotação;
- b) Processos biológicos de estabilização, através de digestão aeróbia e anaeróbia, ou processos químicos, através da adição de cal;
- c) Processos químicos de condicionamento para a desidratação, através de adição de cal, cloreto férrico ou polímeros;
- d) Processos de desidratação natural, em leitos de secagem ou lagoas de lodo, ou desidratação mecanizada, com filtros prensa de placas, centrífugas, e filtros prensa de esteira;
- e) Processos de secagem ou condicionamento por meio térmico ou através de incineração.

A pirólise, apesar de ser uma técnica em fase experimental, deixou de ser analisada apenas do ponto de vista teórico e tem despertado grande interesse. Trata-se de um processo de decomposição térmica, sob uma atmosfera livre de O_2 , que transforma substâncias complexas em simples pela utilização de calor. Através da pirólise, a matéria orgânica pode ser convertida em diversos subprodutos e ocorre em temperaturas inferiores à da incineração, com produção de líquidos (compostos ácidos orgânicos de elevada densidade e baixo teor de enxofre) e gases (compostos por hidrogênio, metano e monóxido de carbono) de alto conteúdo energético. Logo, esses gases podem ser utilizados como combustível em processos convencionais de combustão destinados a geração de calor e trabalho e também podem ser estocados para uso posterior.

A compostagem, produção de composto ou “adubo” orgânico consiste na transformação de material orgânico através de atividades biológicas dos microorganismos (como bactérias aeróbicas e anaeróbicas) que produzem, por

processos metabólicos, um composto rico em nutrientes indispensáveis aos vegetais.

Existem estações de tratamento de esgoto nas quais é feita a secagem do lodo utilizando calor de processo (cogeração) ou através de procedimentos mecânicos, usando filtro prensa de esteira (Figura 1.2) ou de placas. Pode-se usar também um secador térmico alimentado pelo próprio biogás gerado na ETE.



Figura 1.2: Fotos de um filtro prensa de esteira.

Mais uma forma de secar o lodo é através de centrífugas que são utilizadas para separar duas ou mais fases de densidades diferentes, em particular, para separar sólidos em suspensão de um meio líquido.

Para que se obtenha uma água razoavelmente limpa no processo de centrifugação, é necessário conservar no lodo uma porcentagem relativamente elevada de água, obrigando uma posterior secagem por outro processo. A centrifugação envolve a aplicação de uma força centrífuga à mistura, é um processo

similar à decantação por gravidade, com a diferença de se usar, neste caso, uma força centrífuga muitas vezes superior à força da gravidade, que é promovida pela rotação em alta velocidade do conjunto rotativo da máquina. A Figura 1.3 mostra uma centrífuga para desaguamento de lodos.

A separação entre os sólidos e líquidos é feita dentro de um tambor rotativo cilíndrico, em cujas paredes internas a fase sólida é concentrada e removida continuamente por um raspador na forma de rosca. A parte líquida é recolhida em uma caixa e depois é transferida para uma esteira transportadora que faz a recirculação no processo de tratamento.

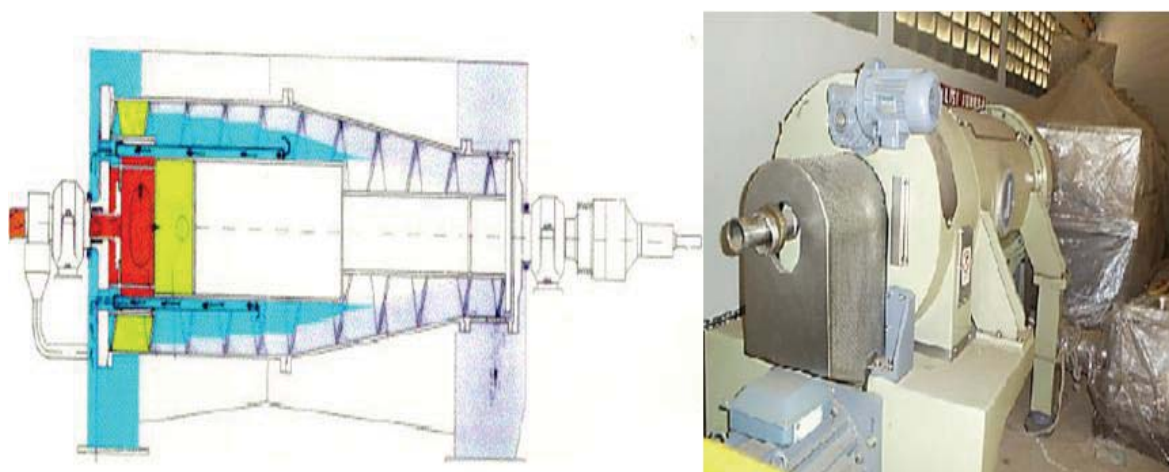


Figura 1.3: Esquema e foto de uma centrífuga.

Existem ainda alguns outros tipos de secadores que podem ser usados para secagem do lodo em ETEs, dentre as quais podem ser destacados os seguintes:

- **Secador granulador rotativo**, o qual é provido de moinhos para granulação dos substratos com características aglutinantes (Figura 1.4);
- **Secador de leito fluidizado**, o qual usa ar aquecido, indicado para materiais em pó ou granulados úmidos (Figura 1.5);

- **Secador de esteira**, o qual funciona por gravidade e através da passagem de um fluxo de ar quente, constituído de uma estrutura de tambores rotativos ou rolos e tela de desaguamento e acionado por um motor com redutor de velocidade (Figura 1.6).



Figura 1.4: Secador granulador rotativo.



Figura 1.5: Secador de leito fluidizado.

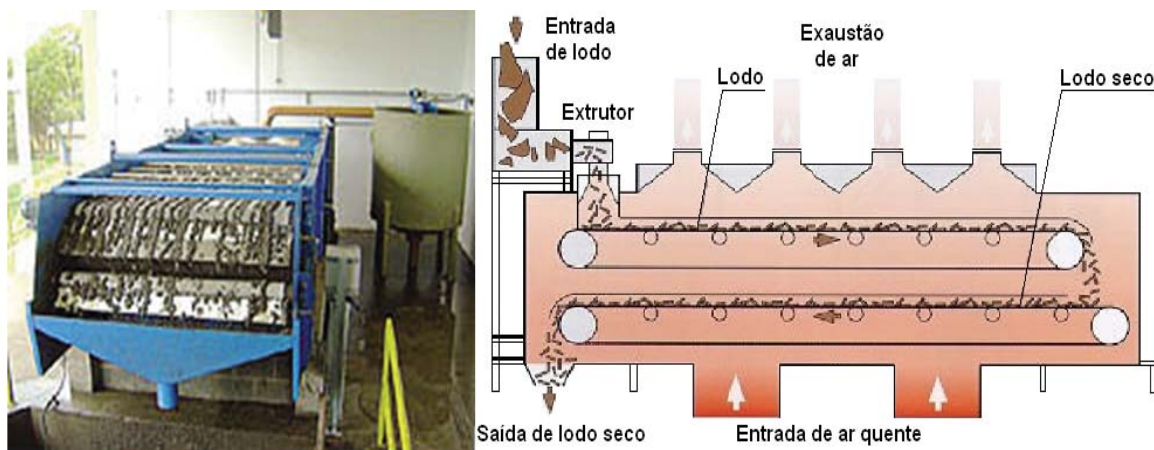


Figura 1.6: Foto e ilustração de um secador tipo esteira.

A operação de secagem térmica é uma alternativa para a diminuição do peso e volume de lodo, com conseqüente diminuição dos custos de transporte e disposição final. É considerado, também, um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica presente no lodo, aspectos de importância fundamental quando o lodo seco vai ser utilizado na agricultura.

O calor transferido para o lodo eleva sua temperatura e promove a evaporação da água localizada em sua superfície. Durante o processo, obtém-se um gradiente de temperatura da superfície para o interior do sólido, que causa a migração da umidade do interior da superfície por mecanismos de escoamento capilar, difusão e diferenças de pressão interna provocadas pelo encolhimento do material. De acordo com a (WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF, 1992), a transferência de calor para o lodo é afetada por condições externas como: temperatura, umidade, velocidade e direção do gás de secagem, área da superfície de exposição, forma física do lodo, agitação e tempo de detenção. O entendimento dessas condições externas e seus efeitos são importantes para a investigação das

características de secagem do lodo, para a escolha do secador apropriado e para a determinação das melhores condições de operação.

A destinação final do lodo é um problema que precisa ser abordado sob o ponto de vista técnico, econômico, sanitário, agrícola e energético, por se tratar de um resíduo urbano rico em matérias primas e nutrientes.

A gestão do lodo produzido por uma estação de tratamento de esgotos, em qualquer caso, é um dos maiores desafios para o sucesso técnico e operacional. É também um desafio econômico, já que alguns estudos mostram que o processamento da fase sólida pode representar até 60 % dos custos operacionais da estação.

1.3.3. Produção e Aproveitamento do Biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da digestão anaeróbia, ou seja, pela biodegradação de matéria orgânica através da ação de bactérias na ausência de oxigênio e que, no caso de sistemas de tratamento de esgoto, consiste no lodo. Trata-se de um processo que também pode ocorrer naturalmente em pântanos, mangues, lagos e rios, e é uma parte importante do ciclo bioquímico do carbono.

O biogás produzido deve passar por um processo de purificação, principalmente caso venha ser usado posteriormente em um sistema de conversão em energia elétrica. Geralmente esse sistema de purificação é composto por dois compartimentos instalados na linha de captação do gás. Antes do biogás ser alimentado neste sistema, passa por um recipiente onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. O primeiro compartimento é composto por dois tipos de peneira molecular, uma delas visa a retirada da umidade e a outra a retirada do ácido sulfídrico (H_2S), sílica gel azul, utilizada como indicador,

pois quando saturada, forma uma coloração diferente. O segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de H_2S , que possivelmente não tenha reagido com o primeiro elemento.

A eficiência de um sistema de purificação se comprova pelo decréscimo significativo das concentrações do sulfeto de hidrogênio e água, como pode ser visto na Tabela 1.1, onde são mostradas as composições típicas do biogás gerado e após a purificação (PECORA, 2006).

Tabela 1.1: Composição típica do biogás produzido e purificado.

Compostos Químicos	% de volume do biogás gerado	% de volume do biogás purificado
Metano (CH_4)	50 a 80 %	80,80 %
Dióxido de Carbono (CO_2)	20 a 40 %	4,07 %
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	1 a 2 %	0,06 %
Água (H_2O)	1 a 2 %	0,98 %
Hidrogênio (H_2)	1 a 2 %	0,00 %
Nitrogênio (N_2)	0,5 a 2,5 %	13,20 %
Oxigênio (O_2)	0,1 a 1 %	0,89 %
Total	100 %	100 %

A produção de biogás também pode ser realizada através do processo aeróbio, porém, observando a Tabela 1.2 (LIMA, 2005), verifica-se que tal processo não é viável, pois a produção de biogás do processo aeróbio é inferior ao anaeróbio, além do consumo de energia ser maior no primeiro processo, e a produção do lodo ser superior no segundo.

Tabela 1.2: Comparação entre processos aeróbios e anaeróbios¹.

	Processo aeróbio	Processo anaeróbio
Aeração	0,5 a 0,75 kg O ₂ /dia	Não necessita
Potência	Consome 20 a 30 W (p/aeração) ²	Não consome (produz 30 a 35 W) ²
Biogás	146 a 216 l/dia (65 % metano) ³	260 a 370 l/dia (100 % metano)
Lodo	315 gSSV/d ⁴	150 gSSV/d ⁵

Obs.: ¹ Ambos realizando o metabolismo de 1kg DQO/dia, ² Segundo Van Haandel & Lettinga (1994), ³ A partir da biodigestão de lodos do processo aeróbio, ⁴ Lodo digerido, ⁵ (Anabolismo Acidogênico + Metanogênico).

De acordo com Lima (2005), o poder calorífico do biogás depende da concentração de metano de acordo com a Figura 1.7.

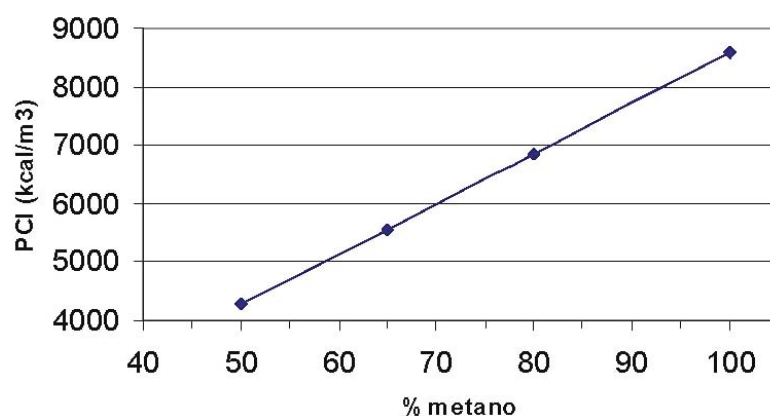


Figura 1.7: Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.

Segundo David (2002), a concentração de metano no biogás resultante da digestão anaeróbia de lodo fica entre 60 e 70 % resultando um poder calorífico inferior (PCI) por volta de 5.500 kcal/m³, demonstrando potencialidade de uso controlado. Apenas para título de comparação, a Tabela 1.3 apresenta o PCI para vários tipos de gases (DAVID, 2002).

Tabela 1.3: Poder calorífico inferior de vários tipos de gases.

Gases	PCI em kcal/m ³
Metano (CH ₄)	8.500
Propano (C ₃ H ₈)	22.000
Butano (C ₄ H ₁₀)	28.000
Gás Natural	7.600
Biogás	5.500

Dentre os fatores que mais influenciam a produção de biogás podem ser destacados os seguintes:

- **Natureza do substrato:** Os substratos nutritivos devem servir como fonte de alimento aos microorganismos que realizaram a decomposição da matéria orgânica e produção de biogás. Alguns minerais são conhecidos como oligo-elementos, que em doses fracas são indispensáveis às reações enzimáticas. Estes elementos são principalmente cálcio, magnésio, potássio, sódio, ferro, zinco, cobalto, molibdênio, cobre e manganês. Outros elementos, como carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre, têm uma importância muito grande no rendimento dos gases de fermentação.
- **Composição dos resíduos:** A geração de biogás será maior quanto maior for a quantidade de material orgânico no resíduo. Os principais nutrientes dos microorganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. O nitrogênio é encontrado principalmente nos dejetos humanos e de outros animais, enquanto que os polímeros presentes nos restos de culturas representam a principal fonte de carbono.
- **Teor de água:** O teor de água deve estar entre 60 % a 90 % do peso do conteúdo total.

- **Temperatura:** A temperatura tem uma influência muito grande no processo enzimático das bactérias formadoras de metano visto que a 10 °C a atividade das bactérias é muito baixa e acima de 65 °C as enzimas são destruídas pelo calor. A faixa ideal para a produção de biogás está entre 32 e 37 °C para bactérias mesofílicas e de 50 a 60 °C para bactérias termofílicas.
- **Impermeabilidade ao ar:** as bactérias anaeróbicas têm influencia no processo e na presença de oxigênio elas produzem apenas gás carbônico.

Um dos sistemas de obtenção do biogás mais conhecidos e utilizados em estações de tratamento de esgoto urbano é o que utiliza biodigestores.

O biodigestor é um sistema utilizado para a produção de biogás, que se constitui de uma mistura de gases combustíveis, cujo principal gás é o Metano (CH_4), produzido por bactérias que digerem matéria orgânica em condições anaeróbicas (isto é, em ausência de oxigênio) na degradação de polímeros orgânicos derivados de matéria biodegradável, como; resíduos alimentícios, lodo de esgoto, lixo doméstico, substrato da cana-de-açúcar, vinhaça, esterco orgânico, plantas aquáticas, efluentes industriais e demais resíduos agrícolas. Nesse caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, o qual, além de não produzir gases tóxicos durante a queima e de ser uma ótima alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo que é um excelente biofertilizante (COLLARES PEREIRA, 1998).

Um biodigestor nada mais é que um reator no qual as reações químicas têm origem biológica. O biogás produzido depois de purificado é queimado em *flares* ou usado em grupos cogeradores produzindo, assim, energia elétrica e energia térmica. A energia elétrica é utilizada para consumo próprio e o calor é aproveitado para o

aquecimento do biodigestor. Na Figura 1.8 é mostrado como se faz o carregamento desse tipo de biodigestor.

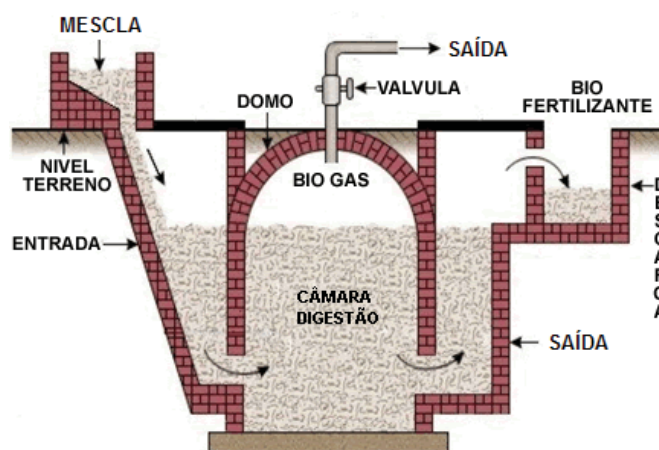


Figura 1.8: Processo completo de um biodigestor.

O sistema consiste de um biodigestor feito em alvenaria e localizado a alguns metros abaixo da superfície; de uma campânula por onde sai o gás; de uma entrada de material e de uma saída de emergentes, que na verdade é adubo químico de ótima qualidade. O gás produzido pode ter várias aplicações, tais como em iluminação, fogões, geladeiras e motores de Ciclo Otto, entre outros.

Além de infindável número de biodigestores naturais, como o solo, as águas estagnadas e os cursos de água, existem os biodigestores desenvolvidos e implantados pelo homem com finalidades distintas, as quais geralmente visam acelerar o processo de biodigestão.

Cada biodigestor tem uma característica, existindo os de produção descontínua e os de produção contínua. No primeiro caso, a biomassa é colocada dentro do biodigestor que é totalmente fechado e só será aberto após a produção de biogás, o que leva mais ou menos noventa dias. Após a fermentação da biomassa, o biodigestor é aberto, limpo e novamente carregado para um novo ciclo de produção

de biogás. No segundo caso, a produção pode acontecer por um longo período, sem que haja a necessidade de abertura do equipamento. A biomassa é colocada no biodigestor ao mesmo tempo em que o biofertilizante é retirado (TIAGO FILHO; FERREIRA, 2004).

Os tipos de biodigestores mais usados são os da Marinha, Indiano, Chinês e RALF/UASB, os quais serão descritos a seguir:

- **Biodigestor da Marinha:** É um modelo tipo horizontal, tem a largura maior que a profundidade, sua área de exposição ao sol é maior, com isso é maior a produção de biogás. Sua cúpula é de plástico maleável, tipo PVC, que infla com a produção de gás, como um balão. Pode ser construído enterrado ou não. A caixa de carga é feita em alvenaria, por isso pode ser mais larga evitando o entupimento. A cúpula pode ser retirada, o que ajuda na limpeza. A desvantagem nesse modelo é o custo da cúpula. A Figura 1.9 mostra o biodigestor da Marinha.

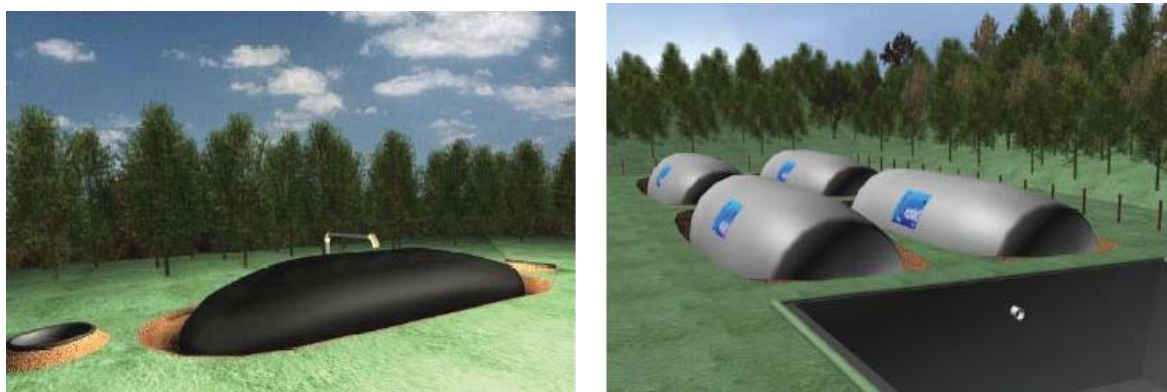


Figura 1.9: Biodigestor da Marinha.

- **Biodigestor Chinês:** Construído em alvenaria, modelo de peça única. Desenvolvido na China, onde as propriedades eram pequenas e, por isso, esse modelo é enterrado, para ocupar menos espaços. Este modelo tem

custo mais barato em relação aos outros, pois a cúpula é feita em alvenaria. Também sofrem pouca variação de temperatura. A Figura 1.10 mostra esquema do biodigestor Chinês.

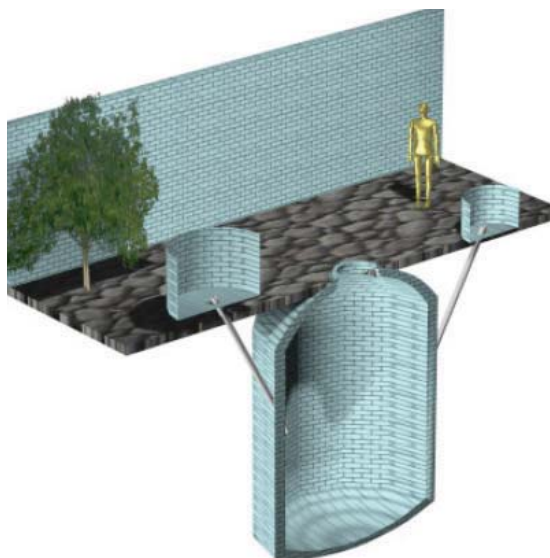


Figura 1.10: Biodigestor Chinês.

- Biodigestor Indiano:** Sua cúpula geralmente é feita de ferro ou fibra e se movimenta para cima e para baixo de acordo com a produção de biogás. Nesse tipo de biodigestor o processo de fermentação acontece mais rápido, pois aproveita a temperatura do solo que é pouco variável, favorecendo a ação das bactérias. Ocupa pouco espaço e a construção pode ser subterrânea, além disso, dispensa o uso de reforços, tais como cintas de concreto. Caso a cúpula seja de metal, deve-se fazer uso de uma boa pintura com um anti-oxidante. Por ser um biodigestor que fica no subsolo é preciso ter cuidado para evitar infiltração no lençol freático. Existem biodigestores feitos em concreto, ou metal, coberto com lona vedada, a qual deve ter duas saídas, com duas válvulas, nas quais restos orgânicos são despejados. A Figura 1.11 mostra um esquema de um biodigestor Indiano, o qual só não é

mais utilizado devido ao seu alto custo, porém técnicas trazidas da China que permitem que o mesmo seja construído a partir de materiais locais poderão tornar mais viável seu uso.



Figura 1.11: Biodigestor Indiano.

- **Biodigestores modelo RALF/UASB:** sistemas de tratamento de esgoto que operam com os Reatores Anaeróbios de Leito Fluidizado (RALF), também conhecidos como *Up Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors* (UASB), são muito utilizados para tratamento de efluentes, tratando-os de maneira biológica baseado no processo de estabilização de matéria orgânica. A Figura 1.12 mostra uma representação esquemática de um reator desse tipo (BUSATO, 2004).

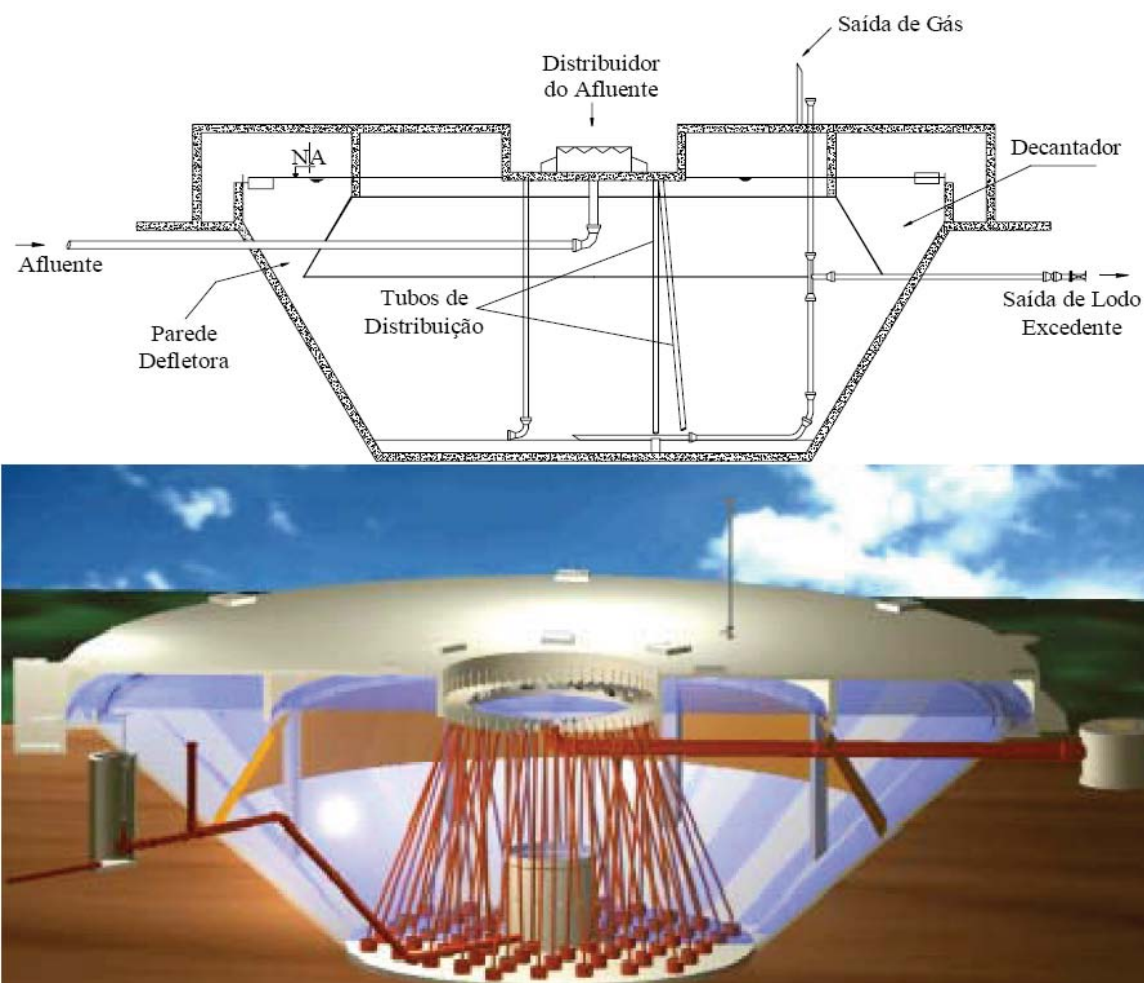


Figura 1.12: Esquema de funcionamento de um RALF/UASB.

O RALF é uma unidade compacta constituída basicamente de um tanque de fluxo vertical com câmaras de sedimentação e digestão anaeróbia sobrepostas e que não necessita de nenhum tipo de energia complementar.

O esgoto a ser tratado é distribuído uniformemente no fundo do reator e passa através de uma camada de lodo biológico, a qual transforma a matéria orgânica em biogás, que pode ser utilizado para fins energéticos. É evitada a entrada do gás produzido no sedimentador através da colocação de defletores, e este é encaminhado somente para determinadas áreas do reator. A porção de lodo que atinge o sedimentador é separada (fisicamente) e retorna ao fundo do reator. O efluente é retirado uniformemente da superfície do sedimentador.

Segundo Aisse (2000), algumas das principais condições que devem ser encontradas em reatores anaeróbios de leito fluidizado são:

- Uma efetiva separação do biogás, do esgoto e do lodo;
- O lodo anaeróbio deve apresentar uma boa capacidade de sedimentação e, principalmente, deve ter elevada atividade, na forma de flocos ou de grânulos (1 a 5 mm de diâmetro).

As Figuras 1.13 e 1.14 mostram, respectivamente, esquemas típicos de ETEs funcionando com biodigestores e com reatores anaeróbicos, respectivamente.

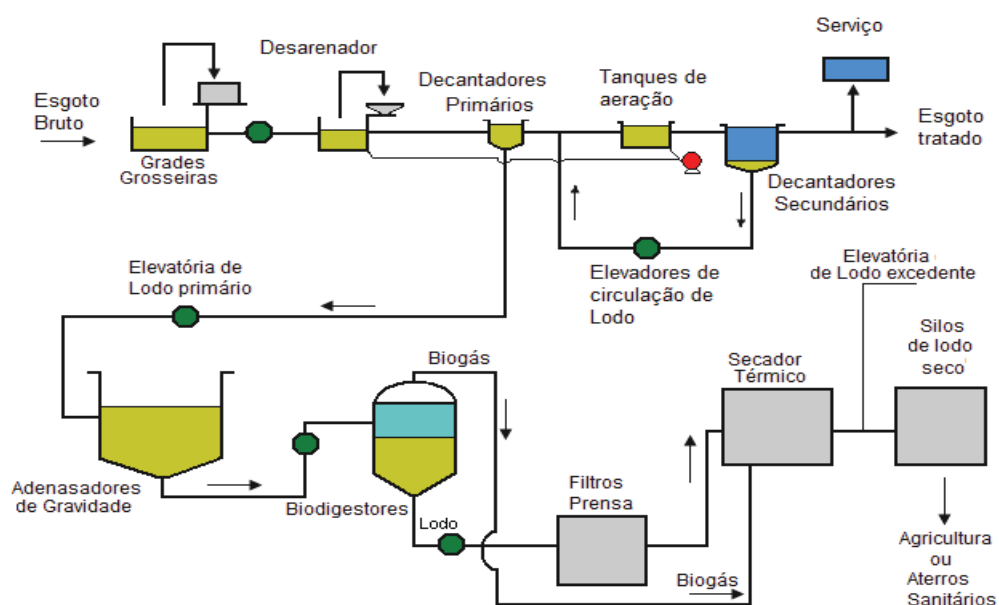


Figura 1.13: Esquema de uma estação de tratamento de esgoto com biodigestores.

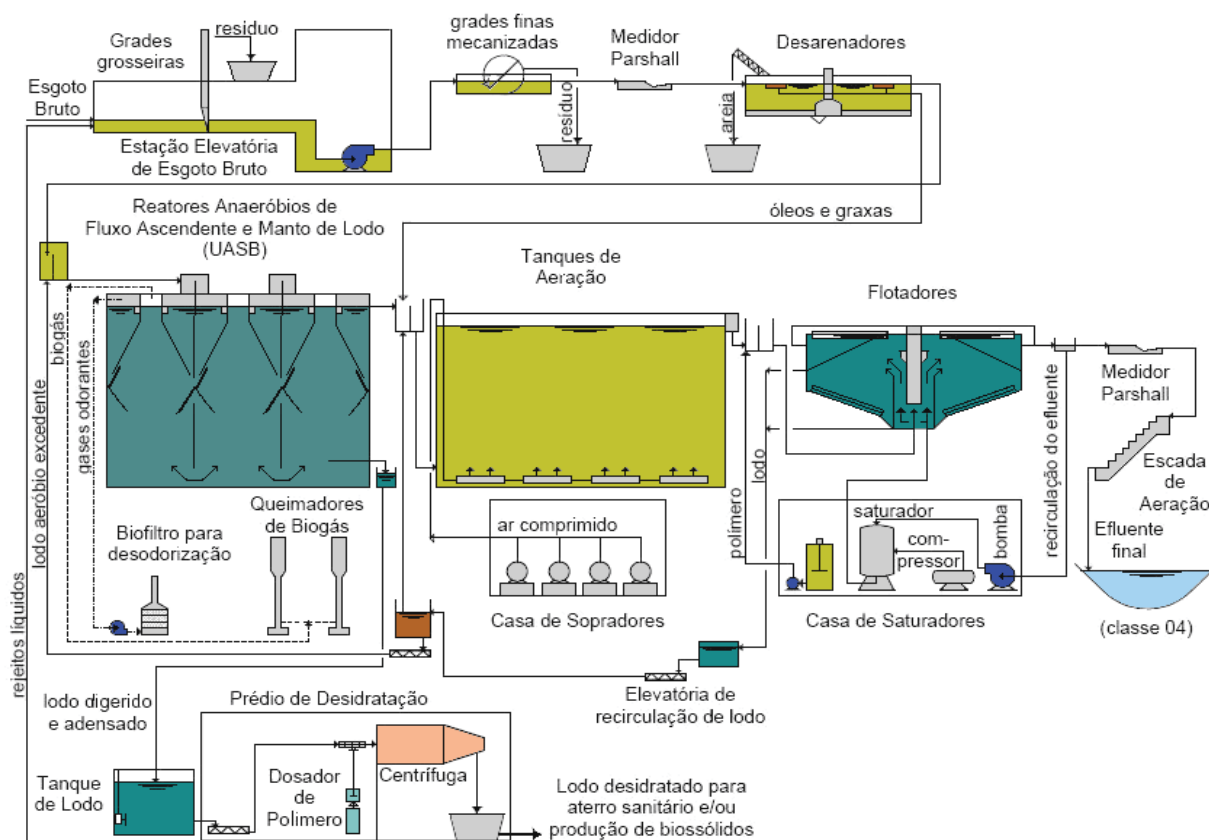


Figura 1.14: Esquema de uma estação de tratamento de esgoto com UASB.

2. Revisão da Literatura

A seguir serão destacados alguns trabalhos sobre aproveitamento energético de resíduos urbanos líquidos que foram utilizados como base para esta dissertação.

Von Sperling (1997) trata do projeto e operação de sistemas de lodos ativados, através da apresentação de conceitos, dados e informações relativas à teoria e à prática. Estes sistemas são amplamente utilizados para o tratamento de despejos domésticos e industriais. Neste trabalho são descritos detalhadamente o dimensionamento do sistema de lodos ativados e indicados os requisitos energéticos para aeração e a cinética de produção do lodo.

Chernicharo (1997) enfocou o sistema de tratamento de esgotos por reatores anaeróbios e a produção de biogás, apresentando os fundamentos da digestão anaeróbia, descrevendo os principais sistemas anaeróbios e abordando os critérios de dimensionamento para o tratamento de esgotos domésticos: tanques sépticos, filtros anaeróbios e reatores de manta de lodo (UASB). O autor tratou de questões termodinâmicas do processo anaeróbio e de reações químicas e conversão de matéria orgânica em ambientes anaeróbios, descrevendo ainda os principais aspectos construtivos, bem como dadas diretrizes básicas para a partida e a operação dos sistemas.

Silveira (1998) desenvolveu um método de otimização termoeconômica para o tratamento de sistemas energéticos. Esse método aborda aspectos econômicos associados ao conceito de exergia, consolidando-se como um eficiente método para auxiliar na seleção de equipamentos, escolha do modo de operação, permitindo, desta forma, a otimização do projeto de plantas térmicas.

Santos (2000) propôs uma solução para um melhor aproveitamento das

linhas de lamas das Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) municipais dotadas de sistema de digestão de lamas. Foi verificado que a tecnologia de digestão anaeróbia constitui um importante mecanismo para uma gestão adequada das lamas geradas em ETARs, pois além de proporcionar uma estabilização eficaz (reduzindo o conteúdo em matéria orgânica e o volume de lama), permite a obtenção de um subproduto gasoso (biogás) com características combustíveis, possível de ser utilizado para fins energéticos. O autor sugere ainda que a opção mais interessante para a utilização do biogás seria para produção combinada de calor e eletricidade (cogeração) em grupos geradores, que, além de fornecer o calor necessário ao desenvolvimento do processo anaeróbio, permite também gerar eletricidade para consumo local e/ou exportação para a rede.

Aisse *et al.* (2001) estudou os reatores anaeróbios UASB que são utilizados de maneira extensiva no tratamento de esgotos em populações de 200.000 a 600.000 habitantes. De acordo com as amostras colhidas, o efluente apresentou valores de DQO (Demanda Química de Oxigênio), DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e TSS (Total de Sólidos em Suspensão) que são normalmente exigidos nesse tipo de instalações. O autor também apresentou os resultados do monitoramento de uma instalação piloto, operando com efluente anaeróbio, construída junto à ETE.

Programa em Saneamento Básico - PROSAB.(2001) fez comparação de eficiência na remoção de DQO entre os processos aeróbios e anaeróbios, utilizando reatores do tipo UASB. O trabalho descreve os diferentes valores de potência instalada por habitante (0,2 a 3 W/hab.dia) e de consumo energético anual por habitante (14 a 20 kWh/hab.ano) e trata também dos índices de solubilidade dos gases formadores do biogás.

Kato *et al.* (2001) estudaram os reatores EGSB (*Expanded Granular Sludge Bed*) em escala piloto operando dois reatores (um aeróbico e outro anaeróbico), como solução para alguns problemas encontrados nos reatores UASB, tais como a ocorrência de zonas mortas, fluxos preferenciais e curtos circuitos. O trabalho mostrou que o reator EGSB tem sido aplicado em situações onde a produção volumétrica de gás é baixa e a velocidade líquida de subida da mistura em reatores UASB é insuficiente, como no caso de tratamentos de esgoto de baixa concentração.

Malta (2001) pesquisou sobre a aplicação dos lodos de ETEs na agricultura, desenvolvendo metodologias para disposição final adequada de lodos para pequenas cidades, priorizando a aplicação destes na agricultura como insumo, pois, além de ser uma solução para o resíduo da estação de tratamento de efluentes, também é um condicionador de solo de boa qualidade e acessível aos agricultores mais carentes. Essas considerações levaram o autor à conclusão de que a educação e a consciência da população, assim como a política de desenvolvimento social, são os fatores mais importantes a serem levados em conta, ao se estabelecer um sistema de tratamento.

David (2002) estudou a operação de secagem térmica de lodos gerados em estações de tratamento de esgotos e os equipamentos disponíveis no mercado que podem ser utilizados para esse fim. A secagem é uma alternativa para a diminuição do peso, volume, diminuição dos custos de transporte e de energia comprada. Quando o lodo seco vai ser utilizado na agricultura, a secagem melhora sua qualidade. Nos ensaios de laboratório, foram medidos os teores de umidade de equilíbrio do lodo produzido na ETE de Barueri, sob diferentes condições de umidade relativa do ar ambiente e com estes valores obteve-se a curva de umidade

de equilíbrio do material. Como resultado dessa experiência concluiu-se que para cada umidade relativa do ar ambiente há um teor de umidade de equilíbrio do lodo.

França (2002) avaliou o aumento da biodegradabilidade e da biodisponibilidade do lodo de esgoto anaeróbico estabilizado através do aumento da temperatura da massa de lodo, usando biogás gerado em uma ETE com RALF. Também foram estudadas a higienização e as características de drenabilidade e desaguamento do lodo após o tratamento térmico.

Brizi (2002) descreveu as características técnicas e possíveis aplicações de um sistema de cogeração de energia a biogás e a gás natural, dimensionamento de um sistema de cogeração e suas características termodinâmicas de cogeração associados à uma mini-estação de tratamento de esgoto.

Tonetti *et al.* (2003) apresentaram resultados encontrados para o estudo de um sistema alternativo de tratamento de esgotos constituído por reator anaeróbico com recheio de bambu associado a um filtro biológico de areia que, devido à ação dos microrganismos anaeróbios e aeróbios, que aderem à superfície do bambu e da areia permitindo uma excelente remoção de matéria orgânica do esgoto. Pelo fato do tratamento ser exposto a um processo anaeróbico, a produção de gás metano é de grande aproveitamento no que se diz respeito à fonte alternativa de geração de energia.

Godoy Júnior *et al.* (2004) analisaram uma mini-estação ecoeficiente de tratamento de esgoto e reuso de água por processo integrado anaeróbico (sem ar), aeróbico (com ar) e anóxico (sem ar, porém na presença de nitrato). A mini-ETE, dimensionada em PVC foi analisada técnico-economicamente e associada a sistemas de cogeração a biogás produzido no tratamento anaeróbico e pela pesquisa dos valores de custos de investimento, manutenção e operação além de médias

tarifárias de tratamento de esgoto adotadas no país.

Jordão e Além Sobrinho (2004) observaram as condições atuais do tratamento de esgoto no país propondo uma comparação entre os tipos de pós-tratamento para reatores anaeróbios, a partir dos resultados obtidos concluíram quais os melhores tipos de pós-tratamento para situações específicas, suas eficiências mediante o tipo de substrato analisado e a temperatura elevada das condições ocorrentes no Brasil.

Oliveira e Foresti (2004) descreveram experimentos para se obter o balanço de massa em reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo a partir dos valores médios das determinações da produção de metano e de DQO possibilitando a obtenção das características químicas desse tipo de reator.

Lima (2005) fez estudo energético no tratamento de esgoto baseando-se em dois processos biológicos: aeróbio e anaeróbio. A comparação energética foi favorável ao processo anaeróbio, confirmando assim a expectativa da melhor eficiência dos processos. Estes casos também mostraram que outros usos finais podem contribuir significativamente para incrementar o consumo elétrico total da ETE. O objetivo do autor foi analisar as políticas de saneamento e tentar identificar ações direcionadas ao uso de tecnologias mais eficientes energeticamente para o tratamento de esgotos, no caso, o biogás. Entretanto, verificou-se que estas energias renováveis representam interesses bastantes distintos no mercado. Se por um lado o setor público pretende melhorar as condições de vida da população mais carente e diminuir os impactos ambientais, o mercado, por sua vez, visa apenas obter o maior lucro possível.

Bougrier (2006) investigou e comparou o efeito da combinação de pré-tratamento térmico e digestão anaeróbica para redução da quantidade de lodo de

esgoto e aumento da quantidade de biogás, tendo como base a matéria prima de duas ETEs, obtendo uma grande melhoria do processo usando níveis de temperatura em torno de 170 °C e verificando-se que o aumento do custo de instalação do sistema pode ser perfeitamente coberto pela produção de biogás.

Coelho *et al.* (2006) mostraram a geração de energia elétrica em motores a partir do biogás do tratamento de esgoto, o qual é gerado por meio do processo de digestão anaeróbia, cujos principais produtos eram o biogás e lodo, além do efluente com carga reduzida de DBO. Os autores chegaram à conclusão que a variação de produção de biogás deve-se ao fato da alimentação do biodigestor ser inconstante, pois há paradas para manutenção corretiva destas máquinas, o sistema possibilitou demonstrar a geração de energia elétrica a partir do biogás de esgoto, incentivando a geração de energia por meio de fontes renováveis de forma descentralizada.

Costa (2006) analisou a possibilidade de recuperação e o uso do biogás gerado pelo tratamento anaeróbio na ETE da SABESP de Barueri (SP) para geração de energia elétrica, integrando o uso sustentável dos recursos naturais renováveis com o uso racional e eficiente de energia. Foram analisados os aspectos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos no projeto chamado “Energ-Biog”, através do qual foram feitos estudos comparativos de desempenhos entre as duas tecnologias (micro-turbina e motor) para a geração de 30 kW de energia elétrica a partir de biogás produzido na ETE. Os resultados tiveram consequências benéficas, pois colaboraram com a viabilidade econômica do saneamento básico e também serviram como incentivo ao bom gerenciamento sanitário. A utilização do biogás produzido no processo de digestão anaeróbia para geração de energia permitiu somente uma redução do consumo de eletricidade da ordem de 20 % em média, devido à grande demanda de energia elétrica exigida pelos equipamentos

usualmente empregados no processo de tratamento de esgoto das estações. O que não deixa de ser apontado como um ganho significativo em termos de eficiência energética nas estações.

Guardabassi e Pires (2006) estudaram a viabilidade técnico-econômica de um condomínio residencial paulistano para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido através do aproveitamento do esgoto, associado ao gás natural fornecido pelo distribuidor, com objetivo de suprir parcialmente a demanda energética.

Godoy Junior (2006) estudou o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para viabilizar a utilização de gás natural à baixa pressão (GNBP) como combustível complementar em sistemas compactos de cogeração a biogás propondo, para tanto, a adequação do gás natural às condições do biogás produzido em uma estação de tratamento de esgoto.

Martins *et al.* (2006) fizeram estudos de casos sobre o aproveitamento do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto da SABESP na Grande São Paulo, visando a geração de energia elétrica. Os autores observaram o aproveitamento do biogás antes que ele fosse queimado em *flares*, onde ele iria gerar eletricidade para ser utilizada no suprimento de parte da demanda da planta energética.

Lamas (2007) analisou a viabilidade técnica-econômica da construção e implantação de uma mini-ETE, na qual todos os produtos gerados são utilizados, a saber: energia elétrica para alimentação do aerador e da bomba que auxilia na distribuição da água em condições de reuso; lodo para uso como biofertilizante; biogás para uso como combustível em um motor de combustão interna acoplado a um gerador de energia elétrica; e, por fim, água tratada em condições de reuso para

ferti-irrigação das áreas verdes próximas ao local de instalação. Para tanto, foi realizada a identificação das funções que constituem o sistema, a construção de seu diagrama funcional termoeconômico e a formulação do problema de alocação de custos do tratamento de esgoto. Dessa maneira foi possível avaliar os custos de seus subprodutos (biogás, biofertilizante, água em condições de reuso e energia elétrica) e avaliar a viabilidade econômica em função do retorno de capital investido. Por outro lado, a mesma metodologia foi aplicada a um sistema de tratamento de esgoto comercialmente disponível, com características muito próximas às da mini-ETE, mas sem auto-suficiência energética. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar que a mini-ETE 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 em um tempo muito menor (cerca de um terço do tempo).

Diante do apresentado, nota-se que existem alguns estudos relacionados à ETE's, a maior parte deles envolve a produção de biogás e geração de energia, porém existe uma pequena quantidade de trabalhos relacionados à secagem de lodo. Assim sendo, o propósito do presente trabalho é conjugar o aproveitamento energético do biogás gerado numa ETE tanto para a geração de eletricidade para consumo próprio como para a secagem do lodo, para uso como fertilizante. Espera-se com isso, dar uma contribuição para o processo decisório de uma ETE que tem interesse nessas aplicações, através da demonstração das tecnologias disponíveis e dos custos envolvidos na implantação e manutenção do sistema de cogeração de energia, bem como os resultados ambientais e financeiros decorrentes desse processo.

3. Tecnologias para Aproveitamento Energético do Biogás

As tecnologias de geração e cogeração de energia, que é a geração combinada de eletricidade e calor a partir de uma mesma fonte primária de energia segundo Balestieri (2002), estão bem desenvolvidas e suficientemente comprovadas com diversos sistemas disponíveis, cobrindo os diferentes combustíveis e uma vasta gama de potências.

Alguns dos principais equipamentos utilizados em plantas para o aproveitamento energético do biogás são as turbinas, as micro-turbinas e os motores (ciclo Diesel ou Otto), os quais serão destacados a seguir.

3.1. Turbinas a Gás

As turbinas a gás são equipamentos térmicos que realizam a conversão de energia de um combustível em potência. A característica principal deste equipamento é a produção de gases de exaustão em grandes volumes e a temperaturas elevadas, o que o torna muito adequado aos aproveitamentos energéticos complementares de interesse, melhorando-se desta forma o rendimento térmico do conjunto.

Geralmente as turbinas a gás são a denominação do seu conjunto completo formado por três componentes principais: o compressor de ar, uma câmara de combustão e a turbina propriamente dita.

Para compreender o funcionamento de uma turbina a gás, considere a Figura 3.1 e o texto que se segue.

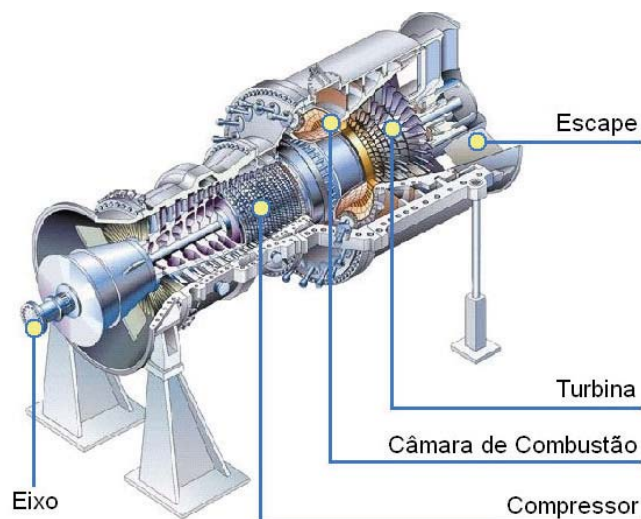


Figura 3.1: Detalhes construtivos de uma turbina a gás.

O compressor é acionado pela própria turbina. Inicialmente o ar é comprimido pelo compressor elevando a pressão, em seguida é misturado ao combustível na câmara de combustão. Essa mistura é então queimada sob uma condição de pressão constante, em regime contínuo, aumentando a temperatura dos gases e introduzindo, desta forma, a energia primária no sistema. Os gases de combustão resultante da queima são expandidos na turbina transformando sua energia térmica em energia mecânica, parte dessa energia é utilizada para acionar o compressor.

As turbinas a gás são acionadas pelos próprios gases quentes produzidos na combustão, o que dispensa a utilização de um fluido de trabalho intermediário, como o vapor ou outro fluido. Isto leva à unidades mais compactas, para os mesmos níveis de produção de potência, as quais têm ainda a vantagem de funcionar com vários tipos de combustíveis, tais como gás natural, querosene e gases oriundos de processo de gaseificação do carvão e da biomassa.

As principais características que os combustíveis gasosos devem ter são:

- Não formar cinzas na combustão, que se depositam nas palhetas das turbinas e interferem na operação;

- Não conter materiais erosivos;
- Não conter compostos que provocam corrosão das palhetas das turbinas.

Trata-se de um equipamento com alta disponibilidade, ou seja, necessita de pouco tempo de parada. Sistemas de cogeração baseados em turbinas a gás de vários tipos e porte estudados por Lautman (1993) apresentaram um fator de disponibilidade na faixa entre 90 a 96 %;

As plantas baseadas em turbinas a gás se caracterizam pela rapidez de entrada em funcionamento. O tempo necessário para a turbina atingir novamente o regime em plena carga é de 6 a 8 minutos em regime de emergência e de 15 minutos em condições normais de operação conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (1998).

As turbinas a gás possuem fácil manutenção e controle, permitindo, inclusive, controle automático e podem ser classificadas de várias formas, dentre as formas que se apresentam, podem ser citadas as turbinas para geração estacionária que foram desenvolvidas a partir das turbinas usadas em aviação.

A Figura 3.2 mostra um ciclo da turbina a gás, também conhecido como Ciclo de Brayton básico.

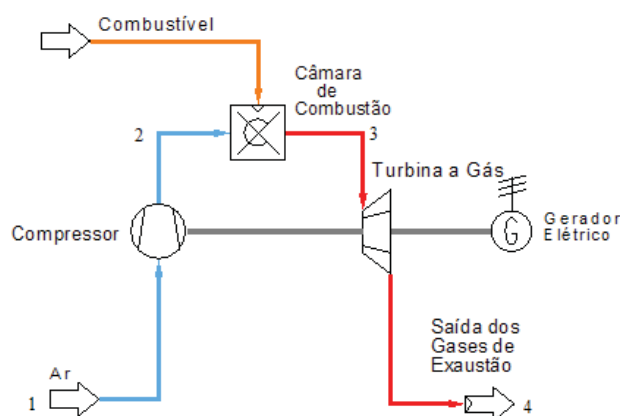


Figura 3.2: Ciclo de Brayton básico.

Neste ciclo, o ar é aspirado pelo compressor e enviado à câmara de combustão, onde é misturado com o combustível. Como produtos do processo de combustão surgem gases a altas temperaturas, que são encaminhados à turbina, onde são expandidos, gerando trabalho mecânico. O eixo da turbina é conectado ao compressor e ao gerador elétrico, de maneira que trabalho mecânico gerado pela expansão dos gases de combustão aciona tanto a compressão do ciclo quanto à geração de trabalho (VAN WYLEN *et al.*, 1995).

O rendimento do ciclo Brayton é de aproximadamente 35 %, mas, atualmente existem turbinas, como a LM6000 de 46.000 kW da G.E. (*General Electric*), por exemplo, que possuem um rendimento de 41,9 % segundo Pecora (2006).

3.2. Micro-turbina a Gás

O termo “micro-turbina” refere-se a um sistema de dimensões reduzidas, composto por: compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico de potência inferior a 250 KW. Para potências situadas entre 250 e 1.000 KW, a denominação usual é de mini-turbina.

A maioria das micro-turbinas existentes no mercado tem como função principal produzir eletricidade, podendo funcionar em cogeração utilizando equipamento adicional. As modernas micro-turbinas a gás representam uma tecnologia de ponta extremamente apropriada à micro-cogeração, operando com ciclo Brayton, ou seja, utilizando o mesmo princípio de funcionamento das turbinas a gás de maior porte. Este tipo de cogeração permite reduzir consideravelmente o consumo de energia primária, em comparação à geração típica de calor e eletricidade. A Figura 3.3 mostra a vista em corte de uma micro-turbina a gás.

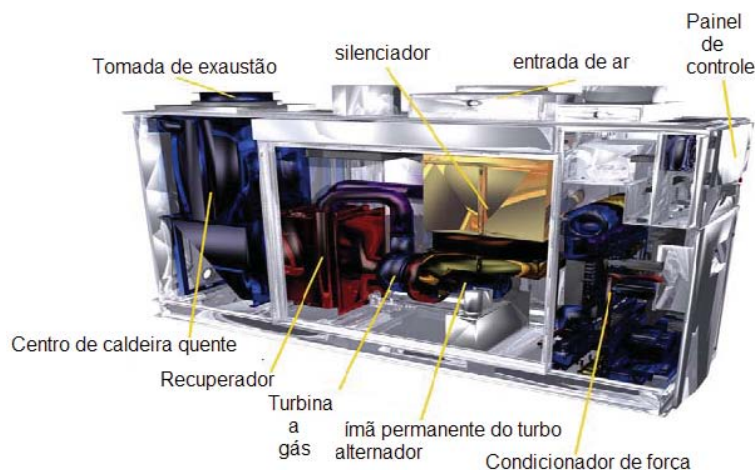


Figura 3.3: Detalhes construtivos de uma micro-turbina a gás.

O ar atmosférico entra no compressor, onde sua pressão é elevada e em seguida é comprimido e vai para câmara de combustão, onde o combustível é injetado e se mistura com o ar. Por meio de queimadores ocorre a inflamação dessa mistura (ar-combustível). Os gases aquecidos em alta pressão são então expandidos através das pás da micro-turbina em questão, fazendo com que esta gire em alta velocidade. No mesmo eixo do compressor é montada a turbina de expansão e o gerador elétrico. A turbina de expansão é responsável por fornecer a energia necessária para girar o compressor e o gerador elétrico (ciclo completo). Referindo-se a sistemas estacionários, os gases, depois da expansão na turbina, ainda contém uma grande quantidade de energia térmica, podendo esta ser utilizada em trocadores de calor para, dependendo do sistema, produzir frio ou vapor de processo, caracterizando um ciclo de cogeração.

A maioria das micro-turbinas funciona a gás natural, mas pode-se utilizar, também, gasolina, óleo combustível, álcool, querosene e propano.

O biogás, gerado em estações de tratamento de esgoto urbano, geralmente está a uma pressão muito baixa, com isto é necessária a adição de um compressor ao conjunto, quando a pressão de alimentação do combustível não for suficiente.

Dentre as vantagens de um sistema de micro-cogeração de energia podem ser destacadas as seguintes:

- Fácil manutenção, implicando menores tempos de parada;
- Arranque relativamente rápido;
- Grande confiabilidade;
- Sistema compacto e relativamente isento de vibrações, exigindo menos despesas em termos de estruturas, fundações e isolamentos acústicos;
- Não necessita de vigilância constante; disponibilidade de energia térmica a temperaturas elevadas;
- Redução significativa da emissão de poluentes e particularmente do CO₂.

Dentre as desvantagens de um sistema de micro-cogeração de energia podem ser destacadas as seguintes:

- Uso menos atrativo em processos com poucas necessidades térmicas;
- Tempo de vida útil relativamente curto.

3.3. Motores de Combustão Interna

Em alguns sistemas de cogeração no setor terciário e em pequenas indústrias/empresas podem ser usados motores alternativos, também denominados como motores de combustão interna, para cumprir os objetivos propostos. Por outro lado, esses motores têm também aplicações em sistemas de produção de energia de emergência e em locais isolados. De forma geral, o seu uso é mais recomendado em situações nas quais as necessidades térmicas sejam pouco significativas, ou quando os consumos de energia sofrem variações ao longo do tempo.

Os motores de combustão interna são máquinas que transformam a energia térmica de um combustível líquido ou gasoso em energia mecânica através do

acionamento de pistões confinados em cilindros. O aproveitamento do calor ocorre com a utilização da energia contida nos gases de exaustão e/ou nos fluidos de refrigeração e lubrificação. A quantidade de calor recuperada depende do tipo e porte do motor e de seu regime operacional. O calor que precisa ser rejeitado dos óleos lubrificantes e do fluido de refrigeração é limitado à produção de água quente. Já os gases de escape podem ser aproveitados diretamente ou serem conduzidos à caldeira de recuperação para gerar vapor. Esses motores são divididos em dois tipos de ciclos: Otto e Diesel.

Os motores de combustão interna podem utilizar combustíveis gasosos (gás natural, propano, butano, biogás, gás de síntese, nafta química, entre outros), líquidos (álcool, gasolina, Diesel, Biodiesel, entre outros) e ainda misturas de combustíveis gasosos com líquidos em proporções que permitam a auto-ignição.

Para a utilização de gases como combustível, o ciclo Otto é o mais recomendável. Nestes casos, misturando o gás com o ar em determinadas proporções e a uma pressão e temperatura pré-estabelecidas. No entanto, pode-se utilizar o gás em equipamentos de ciclo Diesel desde que o combustível inserido na câmara de combustão seja uma mistura de gás com 3 a 5 % de diesel. Estes equipamentos são conhecidos como *bi-fuel* ou *dual-fuel*, em função do modo em que são executadas as misturas de combustíveis. Nestes sistemas, é necessário recorrer ao uso de compressores de elevada potência, de modo a criar as elevadas pressões de gás necessárias à injeção deste nas câmaras/cilindros de combustão.

Na Figura 3.4 são mostradas fotos de um motor a gás integrado a um gerador de eletricidade e um sistema de coleta de gases de escape para geração de vapor.



Figura 3.4: Fotos de um motor a gás operando num sistema de cogeração.

As principais vantagens da cogeração de energia por meio de motores a gás são as seguintes:

- Arranque rápido;
- Fácil adaptação a variações das necessidades térmicas;
- Elevada eficiência mecânica;
- Não necessita de vigilância constante.

As principais desvantagens da cogeração de energia por meio de motores a gás são as seguintes:

- Tempo de vida útil curto;
- Baixo rendimento térmico;
- Custos de manutenção elevados devido à necessidade de paradas freqüentes.

3.4. Dados Comparativos entre as Tecnologias Disponíveis

Na Tabela 3.1 são mostrados dados comparativos entre as tecnologias de conversão disponíveis comercialmente e os rendimentos e emissões de NO_x em

partes por milhão (ppm), segundo dados do Centro Nacional de Referência em Biomassa -CENBIO (2004).

Tabela 3.1: Comparação entre as tecnologias de conversão de energia.

Tecnologia de Conversão	Potência Instalada (kW)	Rendimento Elétrico (%)	Emissões de NO_x (ppm)
Motores a Gás (Ciclo Otto)	30 – 20.000	30 – 40	250 – 3.000
Motores a Diesel (Biogás + Diesel)	30 – 20.000	30 – 35	27
Turbinas a Gás (Médio Porte)	500 – 150.000	20 – 30	35 – 50
Micro-turbinas a Gás (Pequeno Porte)	30 – 100	24 – 28	< 9

4. Modelos de Plantas para Análise

4.1. Planta e Dados Característicos

Para promover o aproveitamento energético do biogás, para produzir eletricidade para consumo próprio e vapor para secagem do lodo, será considerado um projeto em desenvolvimento de uma ETE capaz de atender uma demanda de até 1.000.000 de habitantes.

Vale destacar que, de acordo com os dados da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), cada habitante consome em média 200 litros ou 0,2 m³ de água por dia e que cerca de 80 % da água consumida vira esgoto, resultando, assim, 0,16 m³ de esgoto por dia por habitante. Com base nestes dados, é que foi estimada a vazão volumétrica de esgoto que a ETE projetada poderá tratar, resultando 160.000 m³/dia (aproximadamente 1,8 m³/s).

A Figura 4.1 mostra a planta projetada para a ETE, a qual é composta por 6 decantadores, 20 reatores RALF/UASB e 8 filtros biológicos para dejetos pesados, para atender a demanda prevista.

Considerando a taxa média de geração de biogás observada em estações de tratamento de esgoto, que é 0,17 m³ de biogás por m³ de esgoto tratado, segundo Mello (2007), ou seja, $tx_{bg} = 0,17$, e sabendo a vazão volumétrica de esgoto tratado (Q_{ae} , em m³/s), é possível se estimar a produção média de biogás (Q_{bg} , em m³/s) para a ETE em questão, através da equação:

$$Q_{bg} = Q_{ae} tx_{bg} \quad (4.1)$$

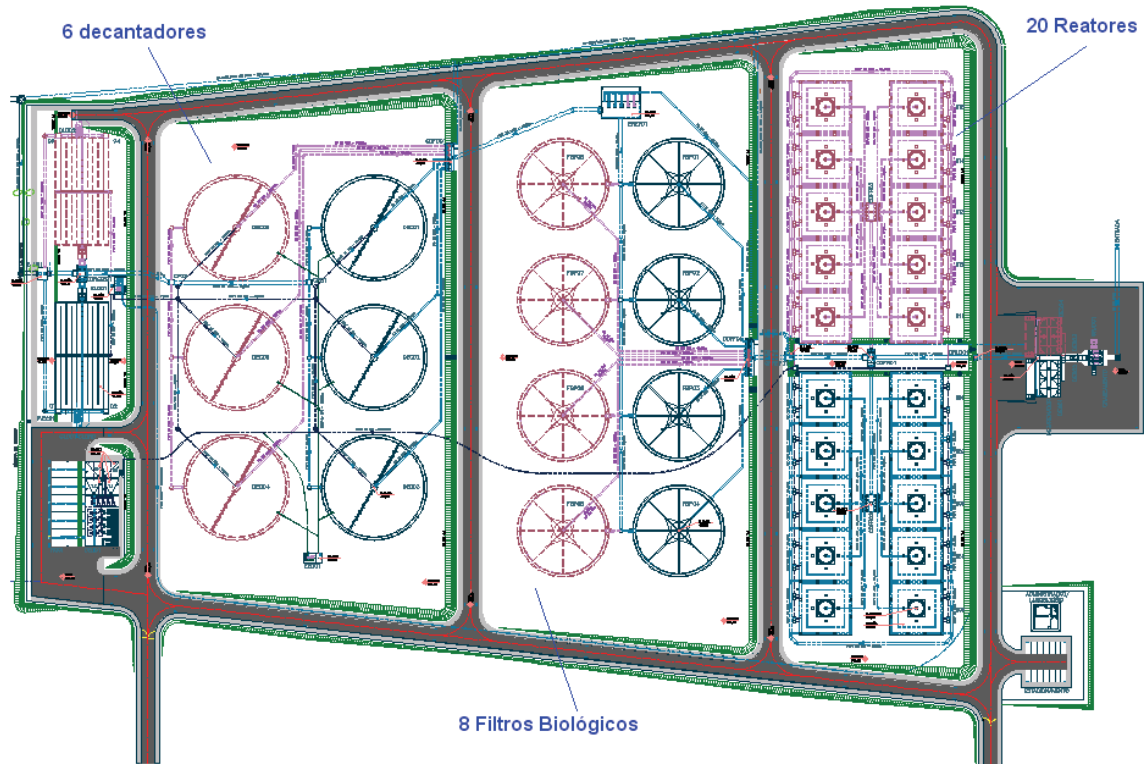


Figura 4.1: Planta baixa de uma estação de tratamento de esgoto.

Uma vez que o valor da quantidade total de biogás gerada tenha sido estimada através da Equação (4.1), resultando para o caso em questão $0,308 \text{ m}^3/\text{s}$, é possível calcular o potencial energético da queima do biogás (PE_{bg} , em kW), levando-se em conta seu Poder Calorífico Inferior (PCI_{bg} , em kJ/m^3), através da seguinte equação:

$$PE_{bg} = Q_{bg} \text{ PCI}_{bg} \quad (4.2)$$

Adotando-se o valor do PCI_{bg} apresentado na Tabela 1.2 ($5.500 \text{ kcal}/\text{m}^3$) e sabendo que o fator de conversão de kcal para kJ é 4,1868, resulta, através da Equação (4.2), um potencial energético do biogás da ordem de 7.084 kW, onde aproximadamente 30 % dessa energia pode ser convertida em eletricidade levando-

se em conta a eficiência das tecnologias de conversão (motor ou turbina a gás), segundo Mello (2007).

A produção diária de lodo é determinada com base no número de habitantes atendidos pela ETE; tomando como base a fração de lodo seco e tendo em vista a umidade relativa do lodo tem-se uma estimativa de 50 g de lodo “in natura” produzido por dia para cada habitante (DAVID, 2002). Assim, para o caso, é estimada uma produção de 50 toneladas de lodo “in natura” por dia na ETE considerada.

Diante deste contexto, serão definidas as plantas propostas para a ETE, os principais equipamentos e acessórios utilizados no projeto, bem como algumas configurações típicas de plantas termelétricas, dando mais ênfase para operações em ciclos de geração e cogeração de energia que podem ser adaptadas ao sistema de tratamento de esgoto.

Os custos para a construção de reatores anaeróbios tipo UASB tem tido valores médios variando de 20 a 30 dólares por pessoa. Já os custos de operação e manutenção têm valores médios entre 1,0 e 1,5 dólares por pessoa por ano (CHERNICHARO, 1997).

Admitindo-se os valores médios indicados por Chernicharo (1997), os custos médios para construção de reatores anaeróbios e custo anual de operação e manutenção na ETE são, respectivamente, US\$ 25.000.000,00 e US\$ 1.250.000,00/ano. No entanto, esses custos não estarão envolvidos na contabilidade dos gastos decorrentes da implantação do sistema de cogeração, pois se tratam de custos que já foram contabilizados no tratamento do esgoto.

4.2. Modelos para Análise

Dentre as tecnologias apresentadas para a geração de energia com o aproveitamento do biogás, duas delas serão experimentadas neste trabalho visando à produção de eletricidade para consumo próprio e vapor para secagem do lodo.

No primeiro caso a ser analisado será utilizada uma turbina a gás e no segundo um motor a gás, em ambos os casos serão aproveitados os gases de exaustão desses equipamentos para a secagem térmica do lodo, devendo antes os mesmos terem sua temperatura reduzida por meio de um sistema de resfriamento. Depois disso, os gases de exaustão passam por um trocador de calor, onde transferem calor para a água, produzindo vapor para secagem do lodo, e, logo depois, são liberados para a atmosfera.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram representações esquemáticas simplificadas das plantas a serem estudadas que, em função das especificações dos equipamentos disponíveis no mercado para atender as necessidades, podem sofrer pequenas alterações na sua constituição.

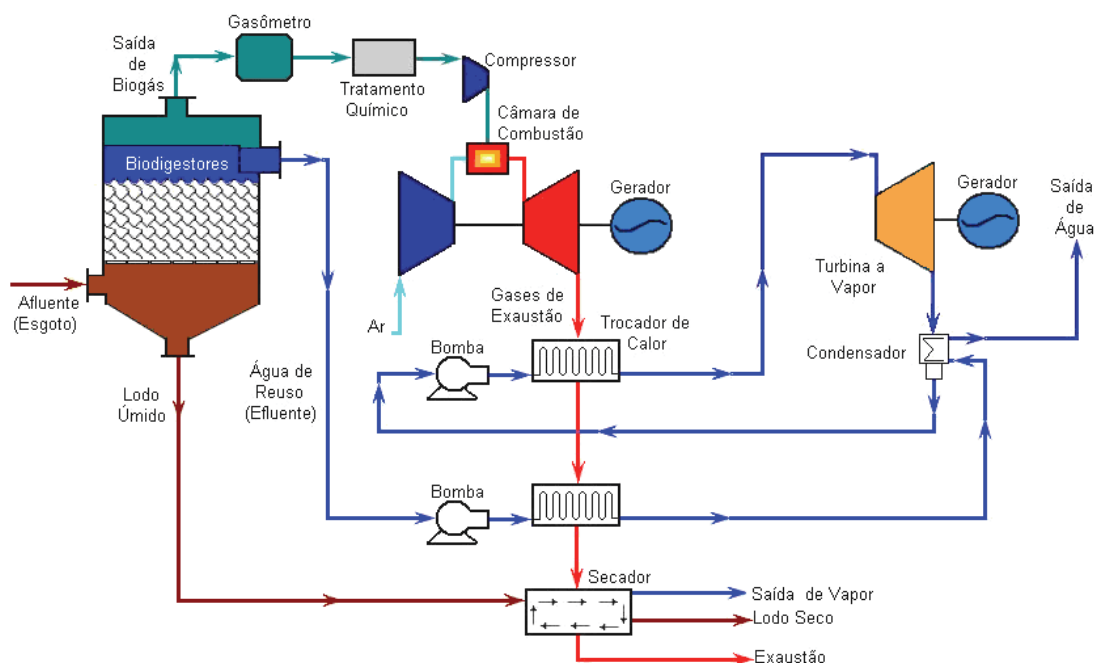


Figura 4.2: Planta para produção de biogás, geração de eletricidade e secagem do lodo, utilizando turbinas (Caso 1).

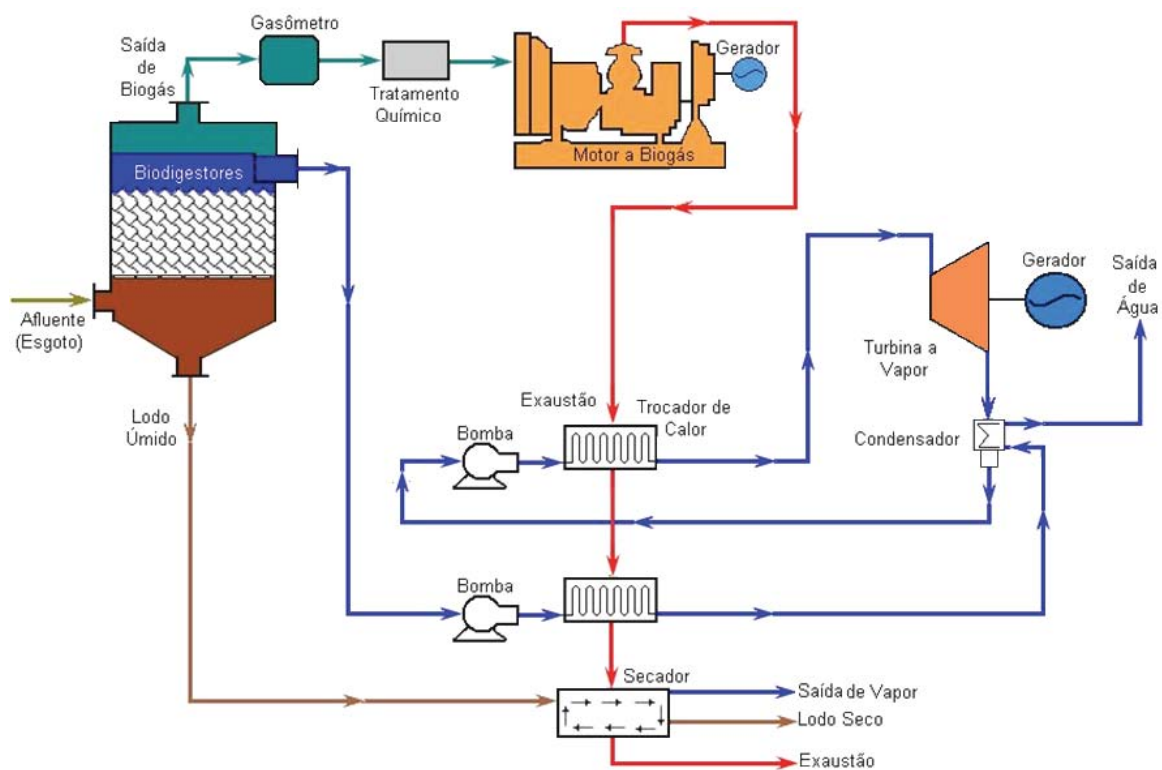


Figura 4.3: Planta para produção de biogás, geração de eletricidade e secagem do lodo, utilizando motor e turbina (Caso 2).

No entanto, vale destacar que toda a análise termodinâmica será feita a partir do biogás tratado, mas os custos do gasômetro e do tratamento químico serão considerados na análise econômica da implantação do projeto de aproveitamento energético do biogás.

4.3. Metodologia de Solução

O sistema de equações resultante após o modelamento de cada configuração será resolvido pelo programa IPSEpro[®] que é uma ferramenta didática que possibilita um ambiente altamente flexível e detalhado para modelar e analisar processos nas diversas áreas de engenharia de energia.

O ambiente de simulação e processo do IPSEpro[®] permite a determinação das propriedades termodinâmicas do sistema, como entalpia e entropia, possibilitando a realização de cálculos de uma maneira simples e eficiente, sem a necessidade de se recorrer a tabelas termodinâmicas. Com o IPSEpro[®], cria-se modelos de esquemas e processo arbitrários usando componentes de uma biblioteca padrão ou utilizando modelos de componentes propriamente criados.

Maiores informações sobre o IPSEpro[®] podem ser obtidas no Anexo B ou pelo site (www.simtechnology.com).

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram, respectivamente, a implementação das plantas das Figuras 4.2 e 4.3 no programa IPSEpro[®].

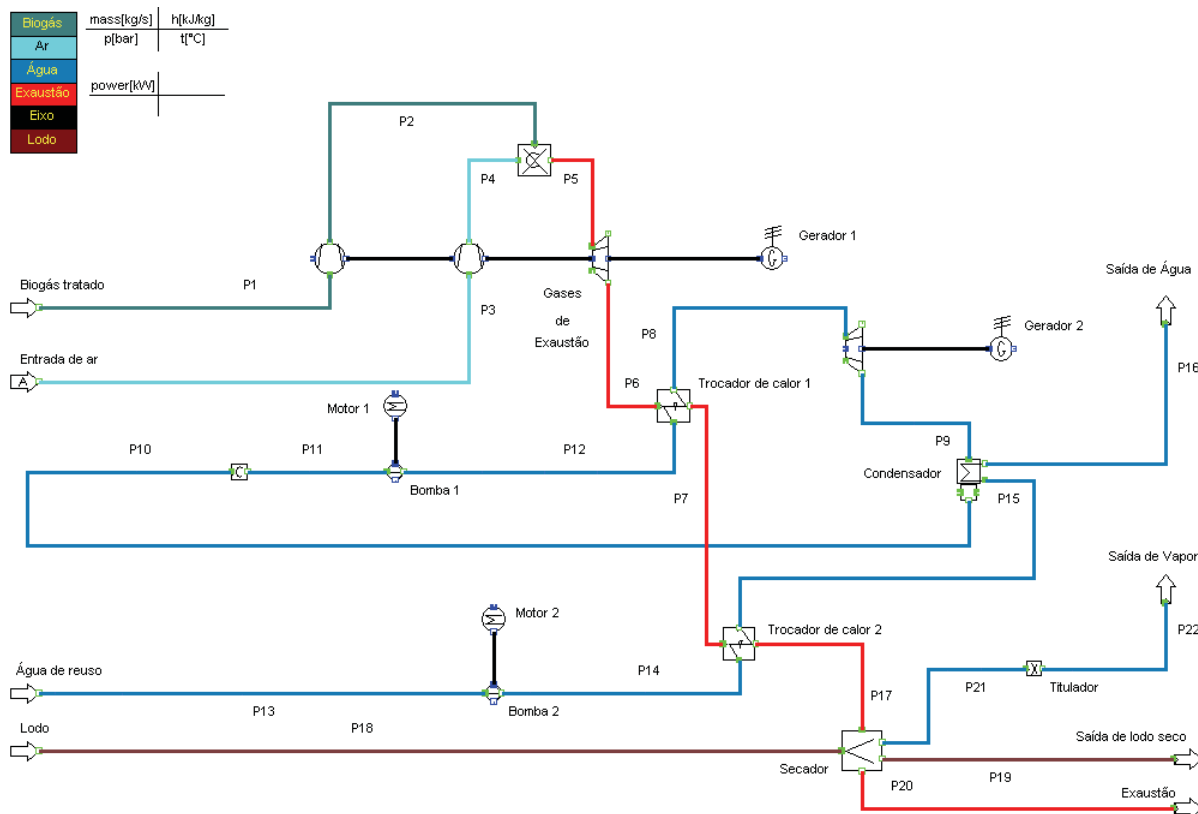


Figura 4.4: Planta do Caso 1, confeccionada no IPSEpro®.

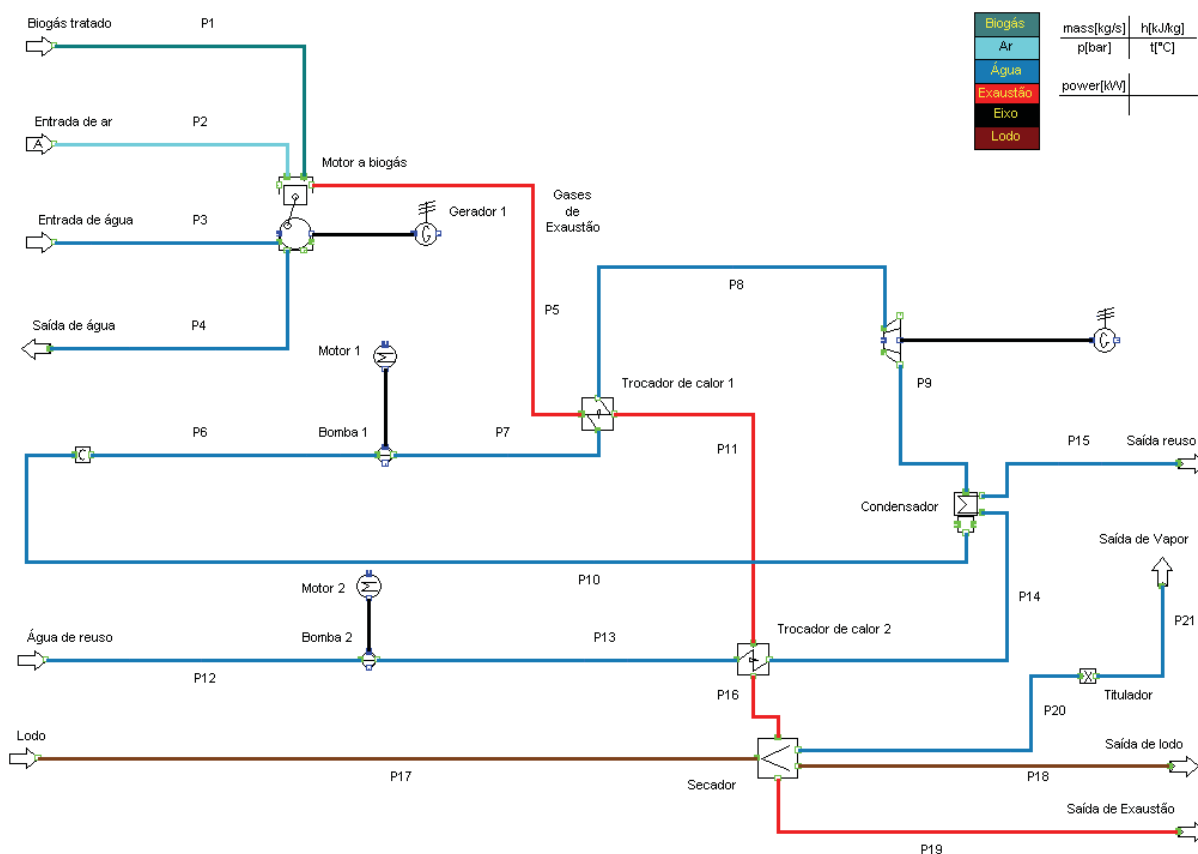


Figura 4.5: Planta do Caso 2, confeccionada no IPSEpro®.

5. Termoeconomia Aplicada

5.1. Introdução Termodinâmica

Um dos métodos mais comuns usado para determinar o desempenho térmico de uma planta é a análise energética baseada na conservação da massa e da energia, expressas pelas seguintes equações:

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (5.1)$$

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (5.2)$$

onde:

$\dot{m}_e$ - Fluxo de massa que entra no volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_s$ - Fluxo de massa que sai do volume de controle (kg/s);

h_e - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

h_s - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

$\dot{Q}_{vc}$ - Taxa de transferência de calor para o volume de controle (kW);

$\dot{W}_{vc}$ - Potência referente ao volume de controle (kW).

Os aspectos gerais da análise de sistemas e de processos pela segunda lei da termodinâmica baseiam-se na propriedade chamada entropia. As irreversibilidades são quantitativas e para processos em um volume de controle, o balanço de entropia em regime permanente é definido por:

$$\dot{S}_{ger, v.c.} + \sum \left(\frac{\dot{Q}_i}{T_i} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad (5.3)$$

onde:

S_e - Entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg K);

S_s - Entropia específica na saída do volume de controle (kJ/kg K);

$\dot{Q}_i/T_i$ - Taxa de entropia gerada pelos fluxos de calor no V.C. (kW/K);

T_i - Temperatura superficial do volume de controle (K);

$\dot{S}_{ger, v.c.}$ - Taxa de geração de entropia no volume de controle (kW).

Pode-se dizer que a segunda lei da termodinâmica governa os limites de conversão entre diferentes formas de energia. A produção de entropia no processo (Equação 5.3) mostra se a geração de energia é possível ou não. A entropia pode ser usada para prever se um processo qualquer que envolve interações de energia pode ocorrer devido à irreversibilidade do sistema.

A energia é considerada em qualquer equipamento ou processo, equivalente a contabilizada em produtos e subprodutos, ao passo que exergia geralmente não é conservada, mas em parte destruída.

Por outro lado, a análise exergética consiste no emprego simultâneo da primeira e segunda leis da termodinâmica na avaliação de desempenho de processos de conversão de energia, uma vez que a análise energética não contabiliza a qualidade da energia que está se perdendo e nem onde ocorrem as irreversibilidades dos processos. Assim, uma aplicação conjunta das análises energética e exergética permite uma efetiva avaliação termodinâmica dos processos, quantificando o valor termodinâmico de um fluxo, em termos do trabalho mecânico que poderia ser extraído dele, assim como também as irreversibilidades

que ocorrem durante o desenvolvimento destes processos.

A análise exergética, segundo Tsatsaronis (1993), permite:

- Uma melhor medida para a avaliação da magnitude da energia perdida em relação à energia total suprida sob a forma de insumo energético;
- Uma medida da qualidade (ou do desperdício) da energia do ponto de vista termodinâmico;
- Uma variável para definir a eficiência racional para o sistema energético.

O conceito de exergia, segundo Szargut *et al.* (1988), é definido como o parâmetro termodinâmico que corresponde à quantidade de trabalho máxima obtida, quando alguma matéria é trazida de seu estado inicial para um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns da natureza circunvizinha por meio de processos reversíveis de troca de calor e matéria, exclusivamente com o ambiente.

Assim, para sistemas energéticos cujos fluxos operam com parâmetros fora das condições do ambiente de referência, a exergia pode ser entendida como a parte da energia que pode ser transformada em trabalho mecânico de forma reversível e útil, onde a destruição de exergia é o resultado direto das irreversibilidades de um sistema.

Szargut *et al.* (1988), entre outros autores, propõem a seguinte relação para o cálculo da exergia total específica (ex_t):

$$ex_t = ex_{fis} + ex_{qui} \quad (5.4)$$

onde:

ex_{fis} - Exergia física específica (kJ/kg);

ex_{qui} - Exergia química específica (kJ/kg).

A exergia física de um fluxo é calculada com base num estado de referência restrito (P_0 , T_0) onde há equilíbrio térmico e mecânico com o meio, através da seguinte equação:

$$ex_{fis} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.5)$$

Para haver equilíbrio completo com o meio, o sistema deve estar também em equilíbrio químico com ele. O trabalho que pode ser obtido através de um processo reversível que leva o sistema do estado de referência restrito até o estado de referência onde há equilíbrio completo (“estado morto”), é a exergia química, definida por:

$$ex_{qui} = \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (5.6)$$

onde:

$\mu_{0,i}$ - Potencial químico de referência do elemento (T_0 , P_0);

μ_i - Potencial químico do elemento na mistura (T_i , P_i);

x_i - Fração do componente na mistura.

Logo, a exergia total específica pode ser representada por:

$$ex_t = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (5.7)$$

As exergias específicas dos gases de exaustão e do ar, assumidos como gases ideais, podem ser calculados, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$ex_{ge} = cp_{ge} \left[(T_{ge} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{ge}}{T_0} \right) \right] \quad (5.8)$$

$$ex_{ar} = cp_{ar} \left[(T_{ar} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{ar}}{T_0} \right) \right] \quad (5.9)$$

As exergias específicas do biogás e do lodo são seus próprios PCI's. Para uma avaliação geral da planta, deve-se considerar toda a potência elétrica gerada ($\dot{W}_{ele}$), toda energia elétrica consumida no bombeamento ($\dot{W}_{bomb}$) e compressão ($\dot{W}_{comp}$) e toda energia térmica utilizada no processo de secagem ($\dot{Q}_{sec}$), bem como a energia da fonte quente da planta que é proveniente do biogás ($\dot{m}_{bg} PCI_{bg}$), definindo-se a eficiência global (η_{global}), conforme segue:

$$\eta_{global} = \frac{(\dot{W}_{ele} + \dot{Q}_{sec} - \dot{W}_{bomb} - \dot{W}_{comp})}{(\dot{m}_{bg} PCI_{bg})} \quad (5.10)$$

Para o Caso 2, tem-se a eficiência global sem o consumo na compressão, pois se trata de um moto-gerador e não de uma turbina a gás.

5.2. Conceitos Termoeconômicos

De acordo com Kotas (1985), a termoeconomia é uma aplicação do conceito de exergia, que tem como objetivo otimizar os parâmetros geométricos dos equipamentos de um sistema para atingir a máxima eficiência e também avalia custos economicamente justificáveis destes componentes por meio da otimização termoeconômica.

A otimização termoeconômica tem o objetivo de encontrar valores do sistema térmico, tais como: temperatura, pressão, composição química dos gases de geração, dimensão dos equipamentos, eficiência dos mesmos entre outros aspectos para que se minimizem os custos de instalação do projeto. Normalmente, são considerados os custos de capital, operação e manutenção (incluindo o combustível) do sistema como um todo.

Existem várias metodologias termoeconômicas entre as principais está a (Análise Funcional Termoeconômica, Teoria do Custo Exergético, Exergoeconomia e Metodologia Estrutural) são mostradas por Cerqueira (1999).

No presente trabalho será utilizada a metodologia proposta por Silveira (1998), que é baseada na identificação das funções do sistema como um todo e de cada equipamento individualmente, na formulação do problema de custo do tratamento de esgoto e na solução do sistema de equações de custos dos produtos associados à estação de tratamento.

O método desenvolvido por Silveira (1998), que se trata de um diagrama funcional termoeconômico, é o instrumento fundamental para realizar a análise que se pretende fazer. O diagrama é composto por figuras geométricas que representam as unidades constituintes do projeto analisado e os processos que interagem com esse projeto e de uma rede de linhas que representam as funções unitárias em termos exergéticos, são adotadas as seguintes notações:

- $\dot{E}x$ - funções exergéticas (em base incremental);
- $\dot{E}x_{i,j}$ - j-ésima entrada à i-ésima unidade;
- $\dot{E}x_{i,k}$ - k-ésima saída da i-ésima unidade.

Assim, cada unidade recebe um número de identificação que é transposto do diagrama de processo para o diagrama funcional termoeconômico do sistema, onde

os fluxos considerados se referem aos incrementos exergéticos e não ao valor absoluto dessa propriedade termodinâmica.

A linha funcional de fronteira tem a função de separar os insumos e os produtos do sistema e o meio exterior, apesar disso, o diagrama funcional considera os processos externos ao sistema.

Assim, com base nos sistemas de cogeração propostos para a ETE (Figuras 4.4 e 4.5), são elaborados os diagramas funcionais termoeconômicos ilustrados nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente.

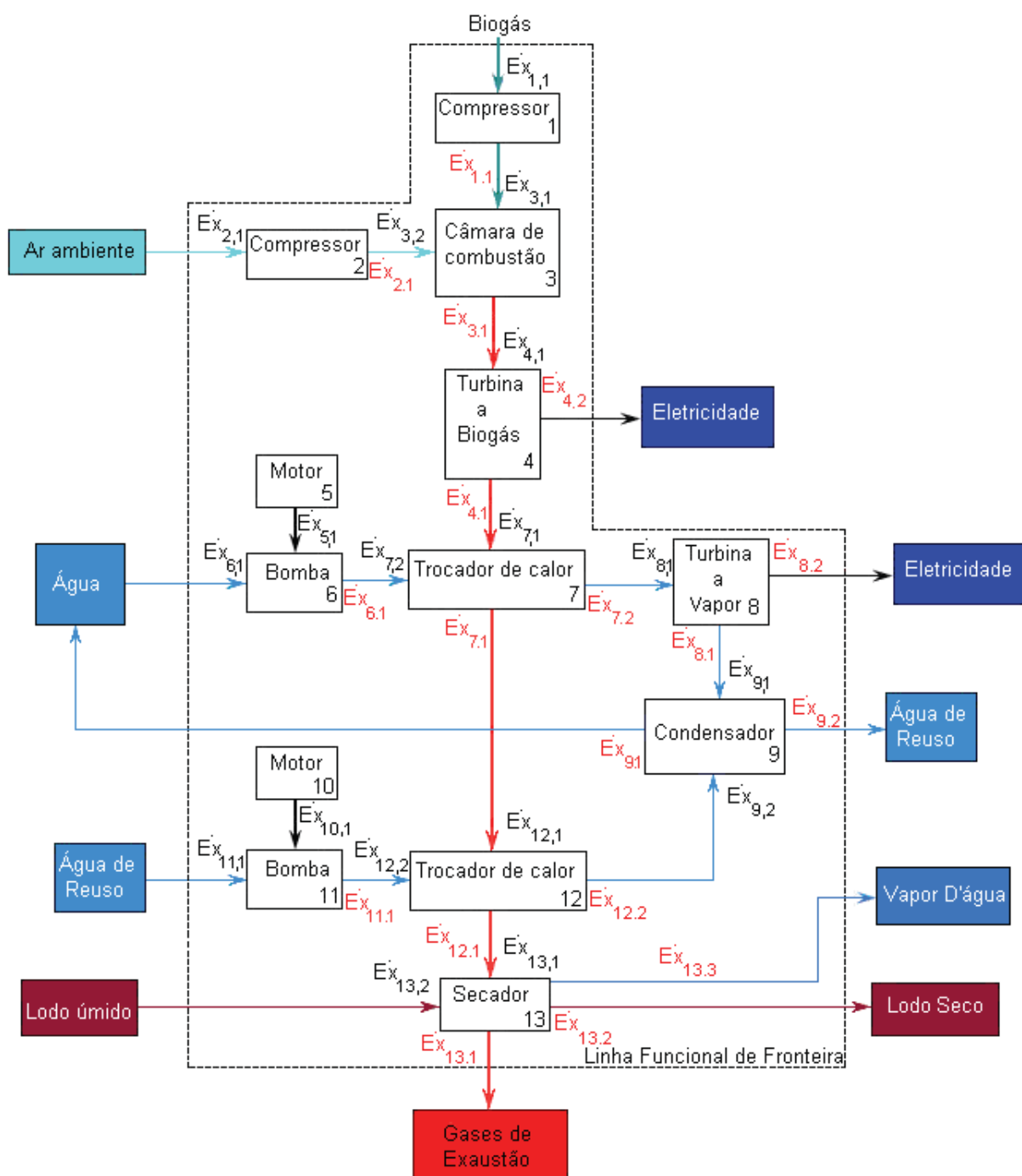


Figura 5.1: Diagrama funcional termoeconômico para o Caso 1.

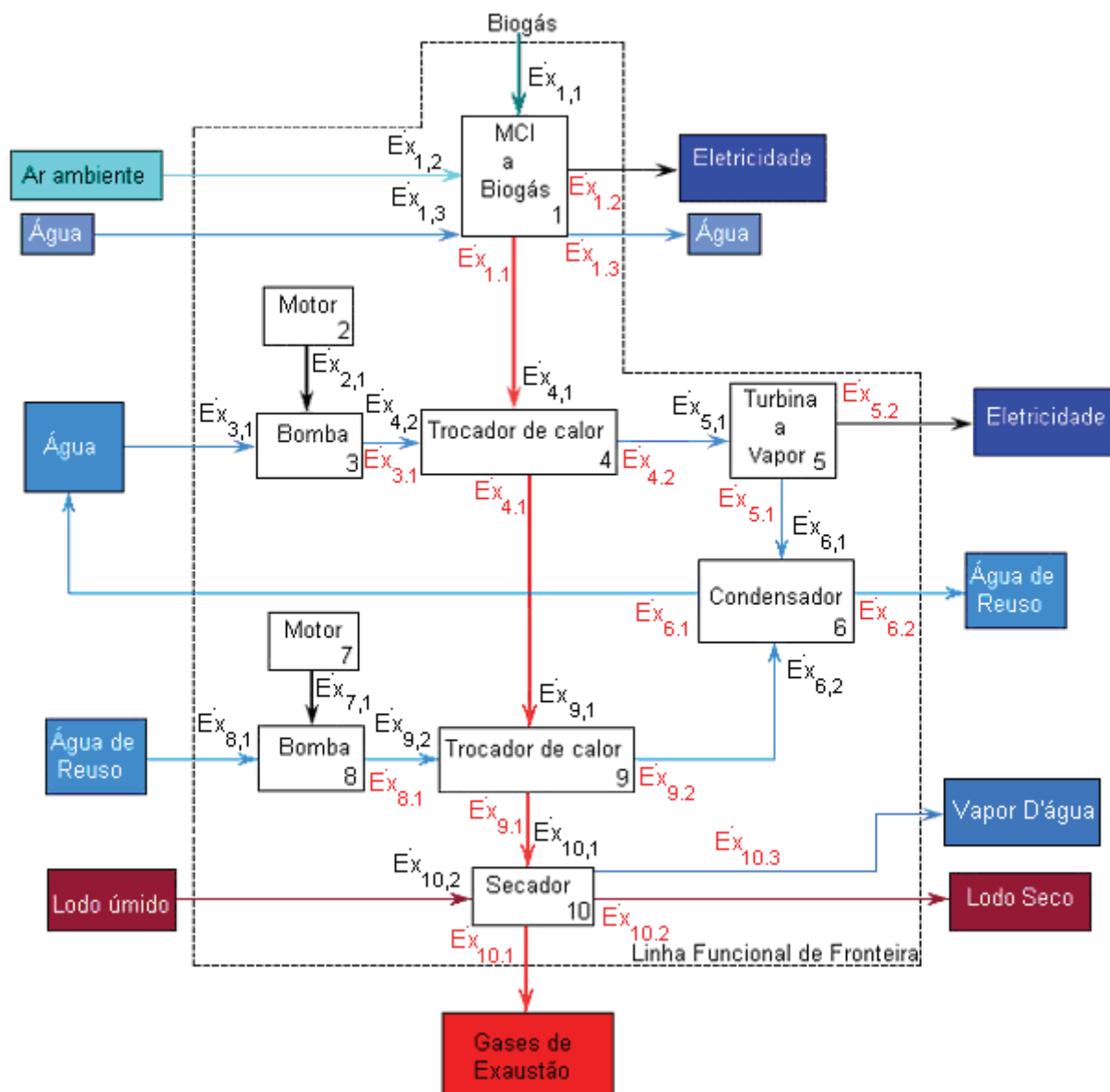


Figura 5.2: Diagrama funcional termoeconômico para o Caso 2.

5.2.1. Determinação das Funções Exergéticas e dos Custos dos Produtos

É necessária uma formulação matemática para alocação dos custos do tratamento na qual seja feita a associação dos parâmetros termodinâmicos (em base exérgica) com os custos envolvidos. Essa formulação será a ferramenta auxiliar nas decisões de operação e de escolha de equipamentos, e, desse modo, no projeto de plantas térmicas.

Assim, a equação a seguir tem o propósito de otimização do problema

termoeconômico do sistema, em que a finalidade é obter o custo de manufatura exergética (CM_{ex}) a partir dos custos dos produtos da estação de tratamento:

$$CM_{ex} = \sum_i c_i \dot{E}x_{i,k} \quad (5.11)$$

Vale destacar que os índices i e k representam os produtos ligados ao sistema, como a água de reuso, o lodo, a eletricidade, entre outros. O índice i representa a unidade a que pertence o insumo e o índice k é sua k -ésima saída.

Particularmente nesse caso, c_i representa o custo exergético do produto do sistema em US\$/kWh e $\dot{E}x_{i,k}$ taxa de exergia em kW associada ao referido produto.

A partir das plantas apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5, e com os valores das propriedades termodinâmicas, pode-se determinar os valores dos fluxos exergéticos em base incremental, associados aos diagramas funcionais termoeconômicos mostrados nas Figuras 5.1 e 5.2. Vale à pena salientar que cada unidade presta a sua própria contribuição exergética ao sistema referido.

A seguir são relacionadas às equações referentes aos insumos e produtos destacados nos diagramas funcionais, com o intuito de determinar as restrições dos sistemas (para a turbina e para o motor).

Na composição do lodo 78 % corresponde a parte líquida e os 22 % restantes à parte sólida, valores estes necessários para definição da função exergética.

5.2.1.1. Determinação das Funções Exergéticas

Diante do contexto apresentado, as funções exergéticas para cada uma das unidades do Caso 1 (Figura 5.1) podem ser descritas pelas equações a seguir:

Unidade 1 (Compressor de biogás):

$$\dot{E}x_{1,1} = \dot{m}_1 PCI_{bg} \quad (5.12)$$

$$\dot{E}x_{1,1} = \dot{E}x_{3,1} = \dot{m}_2 PCI_{bg} \quad (5.13)$$

Unidade 2 (Compressor de ar):

$$\dot{E}x_{2,1} = \dot{m}_3 cp_{ar} \left[(T_3 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_3}{T_0} \right) \right] \quad (5.14)$$

$$\dot{E}x_{2,1} = \dot{E}x_{3,2} = \dot{m}_4 cp_{ar} \left[(T_4 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_4}{T_0} \right) \right] \quad (5.15)$$

Unidade 3 (Câmara de combustão):

$$\dot{E}x_{3,1} = \dot{E}x_{4,1} = \dot{m}_5 cp_{ge} \left[(T_5 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_5}{T_0} \right) \right] \quad (5.16)$$

Unidade 4 (Turbina a biogás):

$$\dot{E}x_{4,1} = \dot{E}x_{7,1} = \dot{m}_6 cp_{ge} \left[(T_6 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_6}{T_0} \right) \right] \quad (5.17)$$

$$\dot{E}x_{4,2} = E_p \quad (5.18)$$

Unidade 5 (Motor elétrico 1):

$$\dot{E}x_{5,1} = E_p \quad (5.19)$$

Unidade 6 (Bomba 1):

$$\dot{E}x_{6,1} = \dot{E}x_{9,1} = \dot{m}_{10} [(h_{10} - h_0) - T_0 (s_{10} - s_0)] \quad (5.20)$$

Unidade 7 (Trocador de calor 1):

$$\dot{E}x_{6,1} = \dot{E}x_{7,2} = \dot{m}_{12} [(h_{12} - h_0) - T_0 (s_{12} - s_0)] \quad (5.21)$$

$$\dot{E}x_{7,1} = \dot{E}x_{12,1} = \dot{m}_7 cp_{ge} \left[(T_7 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_7}{T_0} \right) \right] \quad (5.22)$$

Unidade 8 (Turbina a vapor):

$$\dot{E}x_{7,2} = \dot{E}x_{8,1} = \dot{m}_8 [(h_8 - h_0) - T_0 (s_8 - s_0)] \quad (5.23)$$

$$\dot{E}x_{8,1} = \dot{E}x_{9,1} = \dot{m}_9 [(h_9 - h_0) - T_0 (s_9 - s_0)] \quad (5.24)$$

$$\dot{E}x_{8,2} = Ep \quad (5.25)$$

Unidade 9 (Condensador):

$$\dot{E}x_{9,2} = \dot{m}_{16} [(h_{16} - h_0) - T_0 (s_{16} - s_0)] \quad (5.26)$$

Unidade 10 (Motor Elétrico 2):

$$\dot{E}x_{10,1} = Ep \quad (5.27)$$

Unidade 11 (Bomba 2):

$$\dot{E}x_{11,1} = \dot{m}_{13} [(h_{13} - h_0) - T_0 (s_{13} - s_0)] \quad (5.28)$$

Unidade 12 (Trocador de calor 2):

$$\dot{E}x_{11,1} = \dot{E}x_{12,2} = \dot{m}_{14} [(h_{14} - h_0) - T_0 (s_{14} - s_0)] \quad (5.29)$$

$$\dot{E}x_{12,1} = \dot{E}x_{13,1} = \dot{m}_{17} cp_{ge} \left[(T_{17} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{17}}{T_0} \right) \right] \quad (5.30)$$

$$\dot{E}x_{12,2} = \dot{E}x_{9,2} = \dot{m}_{15} [(h_{15} - h_0) - T_0 (s_{15} - s_0)] \quad (5.31)$$

Unidade 13 (Secador de lodo):

$$\dot{E}x_{13,1} = \dot{m}_{20} cp_{ge} \left[(T_{20} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{20}}{T_0} \right) \right] \quad (5.32)$$

$$\dot{E}x_{13,2} = 0,22(\dot{m}_{18} PCI_{lodo}) + 0,78 \dot{m}_{18} [(h_{18} - h_0) - T_0 (s_{18} - s_0)] \quad (5.33)$$

$$\dot{E}x_{13,2} = \dot{m}_{19} PCI_{lodo} \quad (5.34)$$

$$\dot{E}x_{13,3} = \dot{m}_{21} [(h_{21} - h_0) - T_0 (s_{21} - s_0)] \quad (5.35)$$

Analogamente, as funções exergéticas para cada uma das unidades do Caso 2 (Figura 5.2) podem ser descritas pelas equações a seguir:

Unidade 1 (Motor a biogás):

$$\dot{E}x_{1,1} = \dot{m}_1 PCI_{bg} \quad (5.36)$$

$$\dot{E}x_{1,2} = \dot{m}_2 cp_{ar} \left[(T_2 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_2}{T_0} \right) \right] \quad (5.37)$$

$$\dot{E}x_{1,2} = E_p \quad (5.38)$$

$$\dot{E}x_{1,3} = \dot{m}_3 [(h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0)] \quad (5.39)$$

$$\dot{E}x_{1,3} = \dot{m}_4 [(h_4 - h_0) - T_0 (s_4 - s_0)] \quad (5.40)$$

$$\dot{E}x_{1,1} = \dot{E}x_{4,1} = \dot{m}_5 cp_{ge} \left[(T_5 - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_5}{T_0} \right) \right] \quad (5.41)$$

Unidade 2 (Motor elétrico 1):

$$\dot{E}x_{2,1} = E_p \quad (5.42)$$

Unidade 3 (Bomba):

$$\dot{E}x_{3,1} = \dot{E}x_{6,1} = \dot{m}_6 [(h_6 - h_0) - T_0 (s_6 - s_0)] \quad (5.43)$$

$$\dot{E}x_{3,1} = \dot{E}x_{4,2} = \dot{m}_7 [(h_7 - h_0) - T_0 (s_7 - s_0)] \quad (5.44)$$

Unidade 4 (Trocador de calor 1):

$$\dot{E}x_{4,2} = \dot{E}x_{5,1} = \dot{m}_8 \left[(h_8 - h_0) - T_0 (s_8 - s_0) \right] \quad (5.45)$$

$$\dot{E}x_{4,1} = \dot{E}x_{9,1} = \dot{m}_{11} cp_{ge} \left[(T_{11} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{11}}{T_0} \right) \right] \quad (5.46)$$

Unidade 5 (Turbina a vapor):

$$\dot{E}x_{5,1} = \dot{E}x_{6,1} = \dot{m}_9 \left[(h_9 - h_0) - T_0 (s_9 - s_0) \right] \quad (5.47)$$

$$\dot{E}x_{5,2} = Ep \quad (5.48)$$

Unidade 6 (Condensador):

$$\dot{E}x_{6,2} = \dot{E}x_{9,2} = \dot{m}_{14} \left[(h_{14} - h_0) - T_0 (s_{14} - s_0) \right] \quad (5.49)$$

$$\dot{E}x_{6,2} = \dot{m}_{15} \left[(h_{15} - h_0) - T_0 (s_{15} - s_0) \right] \quad (5.50)$$

Unidade 7 (Motor elétrico 2):

$$\dot{E}x_{7,1} = Ep \quad (5.51)$$

Unidade 8 (Bomba 2):

$$\dot{E}x_{8,1} = \dot{m}_{12} \left[(h_{12} - h_0) - T_0 (s_{12} - s_0) \right] \quad (5.52)$$

$$\dot{E}x_{8,1} = \dot{E}x_{9,2} = \dot{m}_{13} \left[(h_{13} - h_0) - T_0 (s_{13} - s_0) \right] \quad (5.53)$$

Unidade 9 (Trocador de calor 2):

$$\dot{E}x_{9,1} = \dot{E}x_{10,1} = \dot{m}_{16} cp_{ge} \left[(T_{16} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{16}}{T_0} \right) \right] \quad (5.54)$$

Unidade 10 (Secador de lodo):

$$\dot{E}x_{10,1} = \dot{m}_{19} cp_{ge} \left[(T_{19} - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T_{19}}{T_0} \right) \right] \quad (5.55)$$

$$\dot{E}x_{10,2} = 0,22(\dot{m}_{17} PCI_{lodo}) + 0,78 \dot{m}_{17} [(h_{17} - h_0) - T_0 (s_{17} - s_0)] \quad (5.56)$$

$$\dot{E}x_{10,2} = \dot{m}_{18} PCI_{lodo} \quad (5.57)$$

$$\dot{E}x_{10,3} = \dot{m}_{20} [(h_{20} - h_0) - T_0 (s_{20} - s_0)] \quad (5.58)$$

5.2.1.2. Determinação dos Custos dos Produtos

O primeiro passo é estimar o custo dos equipamentos adquiridos. O tipo de equipamento e seu tamanho, a faixa de operação e os materiais utilizados na sua fabricação devem ser determinados para que se possam estimar os custos. Segundo Bejan *et al.* (1996), a precisão das estimativas de custo depende do montante, da qualidade das informações e do tempo disponíveis para realizar essas estimativas.

A melhor estimativa para o custo dos equipamentos adquiridos pode ser obtida diretamente através da cotação junto a fabricantes. Para grandes projetos, as cotações junto aos fabricantes devem ser feitas pelo menos para os equipamentos mais caros. Os custos dos equipamentos também podem ser estimados através de valores dos custos de aquisições passadas, de consultas com profissionais experientes na área ou de cálculos utilizando bancos de dados específicos geralmente mantidos por companhias de engenharia.

Outra forma de se fazer esta estimativa é através da extrapolação a partir de preços de equipamentos já conhecidos. A conversão de custo em relação à capacidade ou tamanho do equipamento pode ser feita comparando-se equipamentos iguais e apenas de tamanho ou capacidade diferentes, de acordo com a seguinte correlação (BEJAN *et al.*, 1996):

$$C_{eq,d} = C_{eq,c} \left(\frac{VC_d}{VC_c} \right)^\alpha \quad (5.59)$$

onde:

$C_{eq,d}$ - Custo do equipamento “d” que se deseja determinar;

$C_{eq,c}$ - Custo do equipamento “c” conhecido;

VC_d - Variável de conversão (capacidade) do equipamento “d”;

VC_c - Variável de conversão (capacidade) do equipamento “c”;

α - Fator de escala em função do tipo de equipamento.

Esta equação permite quantificar o custo de aquisição de um equipamento ($C_{eq,d}$), dada sua capacidade ou a um determinado tamanho (VC_d) quando o custo do mesmo equipamento ($C_{eq,c}$) de diferente capacidade ou tamanho (VC_c) é conhecido. A variável VC na Eq. (5.57) é a principal variável ou combinação de variáveis que caracteriza o tamanho do equipamento em questão. Pelo processo térmico dos equipamentos, o valor do expoente “ α ” é geralmente menor, expressando o fator de aumento percentual (ou diminuição) no custo dos equipamentos. Na falta de outras informações sobre custos, o valor do expoente pode ser usado 0,6. Esta estimativa é conhecida como a regra de seis décimos.

O dimensionamento do expoente “ α ” para o mesmo item pode mudar com o ano de referência e com diferentes dimensões. Neste último caso, o expoente é normalmente assumido que se mantenha constante num determinado intervalo de tamanho do equipamento. A Tabela 5.1 mostra a principal variável VC e valores típicos para o expoente “ α ” para equipamentos comumente utilizados na concepção térmica de projetos (BEJAN *et al.*, 1996).

Tabela 5.1: Valores do expoente α para vários equipamentos.

Equipamentos	Variável de Conversão (VC)	Tamanho/Faixa de operação	α
Compressor	Potência	0,05 a 1,2 MW	0,60
Bomba centrífuga com motor	Potência	0,3 a 20 kW	0,37
Motor elétrico	Potência	3,5 a 15 kW	0,80
Torre de resfriamento	Taxa de arrefecimento	0,05 a 9 m ³ /s	0,93
Secador	Área superficial	1,0 a 10 m ²	0,40
Turbina a gás	Potência de entrada	0,01 a 15 MW	0,65
Turbina a vapor	Potência de entrada	0,1 a 15MW	0,50
Motor de combustão interna	Potência	0,007 a 10 MW	0,81
Trocador de calor	Área superficial	15 a 400 m ²	0,66

O ponto desfavorável em relação a esta metodologia é o fato de cada componente ser caracterizado por apenas um parâmetro associado a sua capacidade, sendo desprezada a qualidade do equipamento e o nível de tecnologia usado na sua construção.

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, como ilustrado na Figura 5.3, modelo que relaciona os custos alocados em função da unidade constituinte do sistema como um todo.

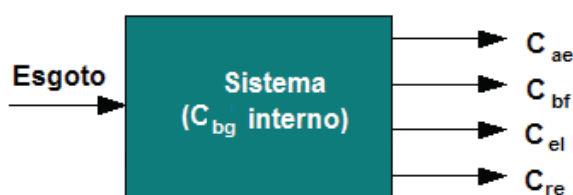


Figura 5.3: Modelo estrutural baseado em custos para as plantas.

Para o modelo estrutural elaborado, as unidades têm associadas os custos da produção de biofertilizante (c_{bf}), de água de esgoto (c_{ae}), de biogás (c_{bg}), eletricidade (c_{el}) e de água de reuso (c_{re}).

Assim, o custo de manufatura exergetico (CM_{ex}) para o Caso 1 pode ser definido por:

$$CM_{ex} = c_{ae} \dot{E}x_{ae} + c_{bf} \dot{E}x_{13.2} + (c_{el} \dot{E}x_{4.2} + c_{el} \dot{E}x_{8.2}) + c_{re} \dot{E}x_{9.2} \quad (5.60)$$

Como se trata de uma estação de tratamento de esgoto urbano em que está em funcionamento a parte de tratamento de esgoto e de água considera-se, para ambos os casos estudados, os valores referentes à água de esgoto e água de reuso como tendo “custo zero”. Assim a nova fórmula do custo fica:

$$CM_{ex} = c_{bf} \dot{E}x_{13.2} + c_{el} (\dot{E}x_{4.2} + \dot{E}x_{8.2}) \quad (5.61)$$

Para essa formulação, são relacionados a seguir os custos referentes aos produtos gerados no Caso 1:

$$c_{bf} = \left(\frac{I_{sec} f}{t_{op} \dot{E}x_{13.2}} + c_{OM_{sec}} \right) fp_{bf} \quad (5.62)$$

$$c_{bg} = \left(\frac{I_{bi} f}{t_{op} \dot{E}x_{3.1}} + c_{OM_{bi}} \right) fp_{bg} \quad (5.63)$$

$$c_{el} = \left[\frac{I_{el} f}{t_{op} (\dot{E}x_{4.2} + \dot{E}x_{8.2})} + c_{OM_{el}} \right] + \left[c_{bg} \frac{(\dot{E}x_{3.1} + \dot{E}x_{7.2})}{(\dot{E}x_{4.2} + \dot{E}x_{8.2})} \right] + c_{pu} \quad (5.64)$$

$$c_{OM_{el}} = 0,1 \left[\left(\frac{I_{el} f}{t_{op} (\dot{Ex}_{4.2} + \dot{Ex}_{8.2})} \right) + c_{pu} \right] \quad (5.65)$$

Onde os valores do fator de produção ou ponderação (fp) são dados por:

$$fp_{bf} = \frac{\dot{Ex}_{13.2}}{\dot{Ex}_{13.2} + \dot{Ex}_{3.1}} \quad (5.66)$$

$$fp_{bg} = \frac{\dot{Ex}_{3.1}}{\dot{Ex}_{13.2} + \dot{Ex}_{3.1}} \quad (5.67)$$

Usando o mesmo modelo estrutural (Figura 5.3) e fazendo as mesmas considerações do Caso 1, o custo de manufatura exergetico (CM_{ex}) para o Caso 2 pode ser definido por:

$$CM_{ex} = c_{bf} \dot{Ex}_{10.2} + c_{el} (\dot{Ex}_{1.2} + \dot{Ex}_{5.2}) \quad (5.68)$$

Para essa formulação, são relacionados a seguir os custos referentes aos produtos gerados no Caso 2:

$$c_{bf} = \left(\frac{I_{sec} f}{t_{op} \dot{Ex}_{10.2}} + c_{OM_{sec}} \right) fp_{bf} \quad (5.69)$$

$$c_{bg} = \left(\frac{I_{bi} f}{t_{op} \dot{Ex}_{1.1}} + c_{OM_{bi}} \right) fp_{bg} \quad (5.70)$$

$$c_{el} = \left[\frac{I_{el} f}{t_{op} (\dot{E}x_{1,2} + \dot{E}x_{5,2})} + c_{OM_{el}} \right] + \left[c_{bg} \frac{(\dot{E}x_{1,1} + \dot{E}x_{4,2})}{(\dot{E}x_{1,2} + \dot{E}x_{5,2})} \right] + c_{pu} \quad (5.71)$$

$$c_{OM_{el}} = 0,1 \left[\left(\frac{I_{el} f}{t_{op} (\dot{E}x_{1,2} + \dot{E}x_{5,2})} \right) + c_{pu} \right] \quad (5.72)$$

onde:

$$fp_{bf} = \frac{\dot{E}x_{10,2}}{\dot{E}x_{10,2} + \dot{E}x_{1,1}} \quad (5.73)$$

$$fp_{bg} = \frac{\dot{E}x_{1,1}}{\dot{E}x_{10,2} + \dot{E}x_{1,1}} \quad (5.74)$$

Nas equações apresentadas anteriormente, as seguintes definições de alguns parâmetros importantes são:

$c_{OM_{bi}}$ - Custo de operação e manutenção dos biodigestores considerando a ênfase na produção do biogás (US\$/kWh);

$c_{OM_{el}}$ - Custo de operação e manutenção dos equipamentos para geração e distribuição de eletricidade (US\$/kWh);

c_{pu} - Custo de purificação do biogás (US\$/kWh);

f - Fator de anuidade (ano^{-1});

fp_{bg} - Fator de produção de biogás;

t_{op} - Tempo anual de funcionamento da planta (h/ano);

I_{bi} - Investimento nos biodigestores anaeróbios (US\$);

I_{el} - Investimento em equipamentos para geração de eletricidade (US\$);

η - Eficiência (%).

O fator de anuidade (f) é calculado por:

$$f = \frac{j(1+j)^N}{(1+j)^N - 1} \quad (5.75)$$

onde:

N - Período de amortização de capital (anos);

j - Taxa anual de juros (%).

5.3. Análise Econômica

Depois da análise termoeconômica será feita uma análise econômica que definirá se o projeto é economicamente viável considerando a variação do mercado atual e considerando a qualidade dos equipamentos utilizados assim como o produto final que no caso é a geração de energia.

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.

5.3.1. Receita Anual

A receita anual da ETE pode ser calculada em função da diferença dos custos da eletricidade produzida na ETE com o custo médio nacional das concessionárias do serviço de fornecimento de energia elétrica, da diferença entre os valores dos custos de tratamento de água e esgoto, bem como se levando em conta a receita obtida com a comercialização de créditos de carbono e de biofertilizante (lodo seco), através da seguinte equação para o Caso 1:

$$R = \left\{ \left[(P_{el} - c_{el})(Ep_{TG} + Ep_{TV}) \right] + \left[(P_{bf} Q_{bf}) - (c_{bf} E\dot{x}_{13.2}) \right] + (P_{co} Q_{co}) \right\} t_{op} \quad (5.76)$$

A receita anual para o Caso 2 pode ser expressa pela seguinte equação:

$$R = \left\{ \left[(P_{el} - c_{el})(Ep_{MCI} + Ep_{TV}) \right] + \left[(P_{bf} Q_{bf}) - (c_{bf} E\dot{x}_{10.2}) \right] + (P_{co} Q_{co}) \right\} t_{op} \quad (5.77)$$

onde:

c_{bf} - Custo da produção do lodo (US\$/t);

c_{el} - Custo da produção de eletricidade na ETE (US\$/kWh);

Ep_{TG} - Energia elétrica produzida pela Turbina a Gás (kW);

Ep_{MCI} - Energia elétrica produzida pelo Motor a biogás (kW);

Ep_{TV} - Energia elétrica produzida pela Turbina a Vapor (kW);

t_{op} - Tempo anual de funcionamento da planta (h/ano);

P_{bf} - Valor médio de comercialização do lodo (US\$/t);

P_{co} - Valor de certificados de emissões evitadas de CO₂ (US\$/t);

P_{el} - Valor médio da tarifação de energia elétrica (US\$/kWh);

Q_{bf} - Vazão volumétrica do lodo (t/h);

Q_{co} - Quantidade de créditos de carbono (t/h);

R - Receita anual (US\$/ano).

Os valores médios de tarifação praticados por classe de consumo regional e no Brasil referente aos meses de janeiro a dezembro de 2007 estão dispostos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Tarifas médias por classe de consumo e do país (R\$/MWh).

Classe de Consumo	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
Residencial	289,40	278,78	303,11	274,43	302,72	293,59
Industrial	219,71	209,11	222,79	207,74	219,80	216,61
Comercial	288,23	292,50	272,47	249,27	284,64	273,06
Rural	214,94	172,48	192,86	147,97	192,52	174,68
Poder Público	303,69	320,44	287,32	269,81	294,23	294,32
Iluminação Pública	164,46	171,98	167,88	143,98	164,79	164,19
Serviço Público	195,36	185,78	197,29	179,75	186,54	191,27
Consumo Próprio	285,91	307,18	291,71	233,81	301,15	283,88
Tarifa Média Total	262,54	251,08	261,90	226,38	260,83	252,91

Neste trabalho será adotada uma tarifação média da energia elétrica comprada de acordo com os dados da ANEEL (2007) apresentados na Tabela 5.2 para uso industrial na região centro-oeste, onde se localiza a planta, ou seja, $P_{el} = \text{R\$ } 219,80/\text{MWh}$ (equivalente a US\$ 137,37/MWh, considerando a cotação média do dólar para o mês de julho de 2008).

O valor médio do tratamento de esgoto praticado pelas companhias de saneamento, segundo Godoy Júnior *et al.* (2004), é de US\$ 0,70/m³, no entanto, estes custos não serão considerados no presente trabalho, pois não fazem parte da implantação do sistema de cogeração.

5.3.2. Aspectos Econômicos da Produção de Biogás

Segundo Lima (2005) o consumo de energia em uma ETE ocorre na construção do sistema, gastando-se energia nas diversas etapas da execução da

obra. Na operação utiliza-se energia nos equipamentos elétricos, para o bombeamento, aeração e no transporte de lodo para recirculação.

Os custos operacionais para produção de biogás numa planta RALF/UASB, de médio porte, situam-se entre US\$ 0,03/m³ e US\$ 0,05/m³. Para plantas de grande porte esses custos podem baixar para cerca de US\$ 0,02/m³ (JOHANSSON *et al.*, 1993). Contudo, esse custo não foi levado em conta na dissertação, admitindo-se que esse processo já foi computado no decorrer da construção da obra, ou seja, trata-se de uma planta que está em operação.

O primeiro fator econômico a ser analisado é a utilização de um gás combustível de baixo custo (biogás), para geração de energia elétrica, uma vez que esse biogás é um subproduto de um processo de digestão anaeróbia e que normalmente é desprezado nas ETE's e queimado em “flare” para minimizar o impacto ambiental ou emitido diretamente no ar livre contribuindo para o aumento do efeito estufa.

O biogás de estações de tratamento pode ter um fim mais nobre, podendo ser utilizado como combustível, contribuindo sensivelmente para a diminuição de eletricidade em ETE's, otimizando o uso dos recursos naturais. Vale ressaltar, porém, que geralmente o volume de biogás gerado no tratamento anaeróbio não permite a auto-suficiência da operação da estação da ETE (COELHO *et al.*, 2003).

O custo de produção da eletricidade com aproveitamento do biogás é composto do capital investido na construção e manutenção dos biodigestores RALF/UASB de uma ETE e do sistema de conversão energética.

Segundo Pecora (2006), o biogás para ser gerado em quantidade depende de certos fatores, dentre eles, o tempo de funcionamento do biodigestor, podendo ser utilizado no sistema de conversão energética, ou então armazenado em um

gasômetro antes de alimentar o sistema. É importante ressaltar que o biogás de estações de tratamento de esgoto deve passar por um sistema de purificação antes de ser convertido em energia elétrica e, quanto menor for o tempo anual de operação do biodigestor, maior será o custo de geração de energia elétrica, aumentando, com isso, o tempo de retorno do investimento.

O custo específico de purificação do biogás (US\$/kWh) pode ser definido/estimado a partir do custo de produção do mesmo (US\$/m³) e de seu poder calorífico (kWh/m³). Nesse sentido, foi levado em conta um custo de purificação da ordem de US\$ 0,03/m³, tendo como base o custo de produção de biogás sugerido por Johansson *et al.* (1993) e, sendo o valor do PCI da ordem de 5.500 kcal/m³, resulta um custo específico de purificação do biogás de cerca de US\$ 0,0047/kWh, o qual será considerado no presente trabalho.

5.3.3. Contabilização e Comercialização de Créditos de Carbono

Segundo Pecora (2006), é uma maneira de se controlar as emissões de carbono e utilizá-lo de forma mais eficiente, diminuindo assim a necessidade de aumento no consumo energético. Outra maneira é substituir os recursos energéticos derivados de combustíveis fósseis por outros com menores emissões de carbono por kWh consumido, como é o caso das fontes renováveis. Para que sejam efetuados os cálculos de crédito de carbono neste setor, devem ser consideradas informações sobre a energia total gerada pela planta e o total de CO₂ equivalente evitado.

A energia total gerada pela planta é dada por:

$$ETG = E_p t_{op} \quad (5.78)$$

onde:

ETG - Energia Total Gerada (kWh/ano);

Ep - Energia elétrica produzida (kW);

t_{op} - Tempo anual de funcionamento da planta (h/ano).

O total de CO₂ equivalente evitado é dado por:

$$TCO_2 = ETG \cdot FTI \quad (5.79)$$

onde:

TCO_2 - Total de CO₂ equivalente evitado (t CO₂ equivalentes / ano);

FTI - Fator de intensidade de carbono equivalente (t CO₂ equivalentes / kWh).

O total de US\$ em certificados pode ser definido pela seguinte equação:

$$TOT_{CEE} = TCO_2 \cdot P_{co} \quad (5.80)$$

onde:

TOT_{CEE} - Total de US\$ em certificados (US\$/ano);

P_{co} - Valor de certificados de emissões evitadas de CO₂ (US\$/t).

O total de US\$ em certificados durante a vida útil da planta:

$$TVU_{pl} = TOT_{CEE} \cdot n \quad (5.81)$$

onde:

TVU_{pl} - Total de US\$ durante a vida útil da planta;

n - Vida útil de planta (anos).

As emissões evitadas de carbono de um projeto necessitam de uma elaboração de um documento que fique dentro dos padrões exigidos pelo *Executive Board* do MDL para que o projeto seja viável. Este documento é conhecido como *Project Design Document* (PDD).

6. Resultados e Discussões

A partir das plantas de cogeração proposta para a ETE (Figuras 4.4 e 4.5) foram elaboradas as Tabelas 6.1 e 6.3 que relacionam todas as características termodinâmicas do sistema considerado: vazão mássica, pressão, temperatura, entalpia, entropia e exergia específica (ou PCI, quando for o caso). Nas Tabelas 6.2 e 6.4 estão discriminadas as potências elétricas e de eixo geradas ou consumidas pelos equipamentos.

Tabela 6.1: Representação das características termodinâmicas do Caso 1.

Estados	$\dot{m}$ (kg/s)	P (bar)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
P1	0,27	1,013	308	63,68	10,29	26.347,14
P2	0,27	15	571	633,77	10,42	26.347,14
P3	12,71	1,013	298	25,38	6,93	0
P4	12,71	15	682	425,22	7,01	143
P5	12,98	15	1.272	1.140,18	7,88	619
P6	12,98	1,059	789	559,63	8,08	218
P7	12,98	1,054	466	202,78	7,50	37
P8	1,60	45	723	3.324,05	6,88	1.279
P9	1,60	1	373	2.619,57	7,21	475,55
P10	1,60	1	373	417,44	1,30	33,88
P11	1,60	1	373	417,44	1,30	33,88
P12	1,60	45	374	424,03	1,31	38,89
P13	211,34	1,013	298	104,93	0,37	0,01
P14	211,34	2,113	298	105,08	0,37	0,12
P15	211,34	2,013	299	109,19	0,38	0,12
P16	211,34	1,013	303	125,83	0,44	0,21
P17	12,98	1,013	403	135,89	7,36	841,29
P18	0,58	1,013	308	64,33	10,58	829,26
P19	0,17	1,013	348	138,54	10,81	3.768,12
P20	12,98	1,013	338	67,35	7,18	2,54
P21	0,41	1,013	373	2.224,21	6,14	397,64
P22	0,41	1,013	373	2.224,21	6,14	397,64

Tabela 6.2: Potência gerada ou consumida nos equipamentos do Caso 1.

Equipamento	$\dot{W}_{eixo}$ (kW)	$\dot{W}_{ele}$ (kW)
Turbina a Gás	1.062,81	1.000
Turbina a Vapor	956,53	900
Moto-bomba 1	11	12
Moto-bomba 2	34	36

Tabela 6.3: Representação das características termodinâmicas do Caso 2.

Estados	$\dot{m}$ (kg/s)	P (bar)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
P1	0,27	1,013	308,15	63,68	10,29	26.347,14
P2	4,16	1,013	298,15	25,38	6,93	0,00
P3	10,03	1,013	303,15	125,83	0,44	0,19
P4	10,03	1,013	363,15	376,99	1,19	26,20
P5	4,43	2,510	782,15	583,55	8,02	225,90
P6	0,63	0,600	359,07	359,84	1,15	23,17
P7	0,63	22,100	359,43	363,02	1,15	31.289,50
P8	0,63	22,000	593,15	3065,11	6,80	1.044,26
P9	0,63	0,600	359,08	2558,17	7,27	397,08
P10	0,63	0,600	359,08	359,84	1,15	23,17
P11	4,43	2,410	453,15	198,58	7,40	33,41
P12	73,96	1,013	298,15	104,93	0,37	0,00
P13	73,96	2,113	298,18	105,08	0,37	0,11
P14	73,96	2,013	298,67	107,09	0,37	0,10
P15	73,96	1,013	303,15	125,83	0,44	0,19
P16	4,43	2,310	423,15	165,01	7,34	22,75
P17	0,33	1,013	308,15	90,83	9,40	1.123,45
P18	0,58	1,013	333,15	64,33	10,58	3.768,12
P19	4,43	1,013	322,46	53,80	7,28	1,03
P20	0,25	1,013	373,12	1.998,55	5,54	352,20
P21	0,25	1,013	373,12	1.998,55	5,54	352,20

Tabela 6.4: Potência gerada ou consumida nos equipamentos do Caso 2.

Equipamentos	$\dot{W}_{eixo}$ (kW)	$\dot{W}_{ele}$ (kW)
Motor de Combustão Interna	1.062,81	1.000,00
Moto-bomba 1	2,11	2,34
Moto-bomba 2	11,73	13,84
Turbina a Vapor	303,72	279,87

Vale destacar que existem diversas e diferentes informações sobre a relação entre o biogás produzido e o esgoto tratado em biodigestores anaeróbios, porém Guardabassi e Pires (2006) apresentaram uma relação entre 20 e 30 %, dependendo da quantidade de sólidos encontrados no efluente. Entretanto, Martins *et al.* (2006) observaram que essa relação para a ETE Barueri decresce para um valor em torno de 3,6 %, considerando que na região há uma maior incidência de água de chuva e de instalações comerciais e industriais, que têm maior concentração de água do que esgoto residencial. Por outro lado, Mello (2007) apresenta um dado mais realista baseado numa moderna e eficiente ETE de Los Angeles (EUA), na qual essa relação é da ordem de 17 %, este é o valor a ser considerado nesta dissertação por ser um dado intermediário entre os valores mínimo (3,6 %) e máximo (30 %) e por falta de um dado real para a ETE considerada.

A massa molecular do biogás (M_{bg}) produzido é estimada adotando-se as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), através da seguinte equação:

$$M_{bg} = 0,808CH_4 + 0,0407CO_2 + 0,132N_2 + 0,0089O_2 + 0,0098H_2O + 0,0006H_2S \quad (6.1)$$

Considerando as seguintes massas atômicas para os constituintes do biogás: C=12 g/mol; H=1 g/mol; O=16 g/mol; N=14 g/mol e S= 32 g/mol, a massa molecular do mol do biogás produzido é equivalente a 18,8802 g/mol. Sabe-se ainda que, nas CNTP, um mol de biogás corresponde a 22,4 litros de biogás purificado, com 80,8 % de metano em sua composição.

As Tabelas 6.5 e 6.6 representam os valores dos fluxos exergéticos dos Casos 1 e 2 associados às unidades descritas nos diagramas funcionais, ilustrados

respectivamente nas Figuras 5.1 e 5.2, de acordo com a metodologia proposta por Silveira (1998), consistindo em uma ferramenta fundamental para as análises realizadas.

Tabela 6.5: Valores dos fluxos exergéticos associados ao Caso 1.

Unidade 1		Unidade 2		Unidade 3		Unidade 4		Unidade 5	
Compressor de biogás		Compressor de ar		Câmara de combustão		Turbina a biogás		Motor Elétrico 1	
$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)
1,1	1013,10	2,1	0,00	3.1=4,1	8.041,51	4.1=7,1	2.834,10	5,1	12,03
1.1=3,1	1013,10	2.1=3,2	1.816,65			4.2=Ep	1.000		
Unidade 6		Unidade 7		Unidade 8		Unidade 9		Unidade 10	
Bomba 1		Trocador de Calor 1		Turbina a Vapor		Condensador		Motor Elétrico 2	
$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)
6,1=9.1	54,12	6.1=7,2	62,13	7.2=8,1	2.043,72	9.2	43,40	10,1	36
		7.1=12,1	475,50	8.1=9,1	759,64				
				8.2=Ep	900				
Unidade 11		Unidade 12		Unidade 13					
Bomba 2		Trocador de Calor 2		Secador					
$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)				
11,1	3,15	11.1=12,2	25,56	13,2	474,21				
		12.1=13,1	204,71	13.2	651,88				
		12.2=9,2	25,42	13.1	33				
				13.3	402,81				

Tabela 6.6: Valores dos fluxos exergéticos associados ao Caso 2.

Unidade 1		Unidade 2		Unidade 3		Unidade 4		Unidade 5	
Motor a biogás		Motor elétrico 1		Bomba		Trocador de calor 1		Turbina a vapor	
$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)
1,1	7.083,69	2,1	2,34	3,1=6,1	14,61	4.2=5,1	658,57	5.1=6,1	250,42
1.1=4,1	999,94			3.1=4,2	19.732,68	4.1=9,1	147,88	5.2	279,87
1,2	0								
1.2	1.000								
1,3	1,92								
1.3	262,72								
Unidade 6		Unidade 7		Unidade 8		Unidade 9		Unidade 10	
Condensador		Motor elétrico 2		Bomba		Trocador de calor 2		Secador de Lodo	
$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)	$E\dot{x}$	(kW)
6,2=9,2	7,72	7,1	13,84	8,1	0,07	9.1=10,1	100,69	10.1	4,58
6.2	14,15			8.1=9,2	7,91			10,2	3.074,60
								10.2	2.181,74
								10.3	88,05

Para calcular o potencial elétrico de energia a partir do biogás teoricamente produzido para o tratamento de esgoto, foram adotados os valores para uma grande estação de tratamento de esgoto (ETE) com capacidade para tratar 1,8 m³/s.

Foi adotado o poder calorífico inferior do biogás de 5.500 kcal/m³ (23.027,40 kJ/m³) e para a taxa média de geração de biogás usou-se o equivalente a 170,9 m³ biogás/1.000 m³ esgoto tratado.

No primeiro caso estudado, mostrado na Figura 6.1, utiliza-se uma turbina a gás Solar Saturn 20-T1602 de 1.200 kW que, em função do seu rendimento, produzirá uma média de 1.000 kW. Os gases de exaustão da turbina passam por trocadores de calor modelo-BEM, onde transferem calor para a água produzindo vapor que entra em uma turbina a vapor TS500 gerando uma média de eletricidade de 900 kW. O vapor que sai dessa turbina passa por um condensador Standard

onde depois é bombeado e retorna para o ciclo onde o vapor excedente entra em um secador Andritz 3Sys AG.

O lodo antes entrar no secador, passa pelo processo tradicional de desaguamento mecânico (centrífuga, filtro prensa), já existente na ETE, tendo na sua saída um teor de sólidos de 90 %. O secador irá utilizar gás de exaustão proveniente da turbina, para gerar energia térmica para secagem. Os gases da turbina são previamente comprimidos para não alterar o funcionamento dos equipamentos. Considera-se que os gases são livres de pó e outros produtos corrosivos. Na entrada do secador pode-se ter os gases entrando a uma temperatura de 130 °C, prevendo um bom funcionamento do processo.

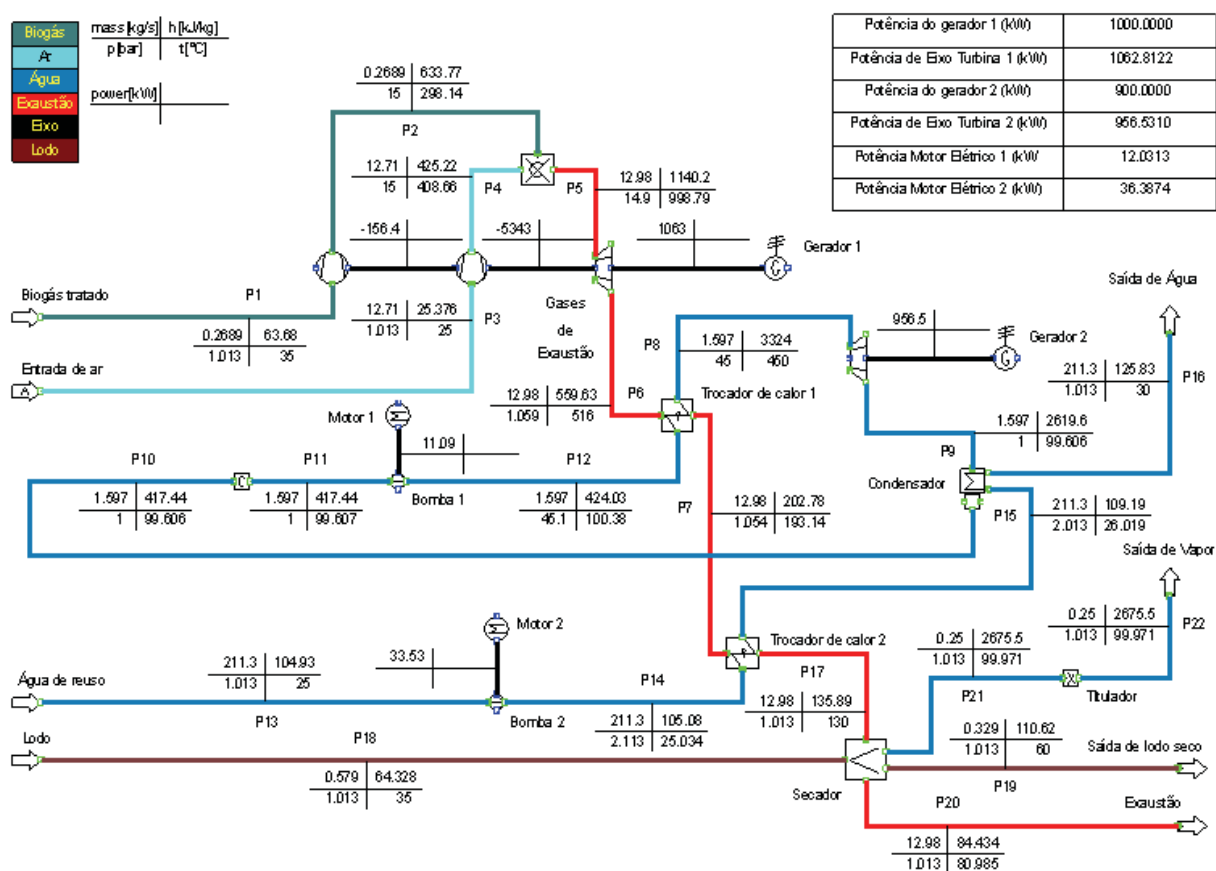


Figura 6.1: Simulação do Caso 1, confeccionado no IPSEpro®.

No segundo caso estudado, mostrado na Figura 6.2, utiliza-se um motor a biogás GE Jenbacher JMS320 GS-B.L que produz uma potência de 1.000 kW. Os gases de exaustão saem do motor a uma temperatura de 509 °C e, devido essa alta temperatura, uma parte dos gases será utilizada para alimentar os trocadores de calor para aquecimento da água que se transforma em vapor para a turbina TG320 que produz uma potência de aproximadamente 280 kW, o restante do vapor vai para um condensador para depois ser bombeada e retornar ao ciclo. O restante dos gases de exaustão entrando a uma temperatura máxima de 150 °C será encaminhado para um secador Andritz 3Sys AG onde será efetuada a secagem térmica do lodo.

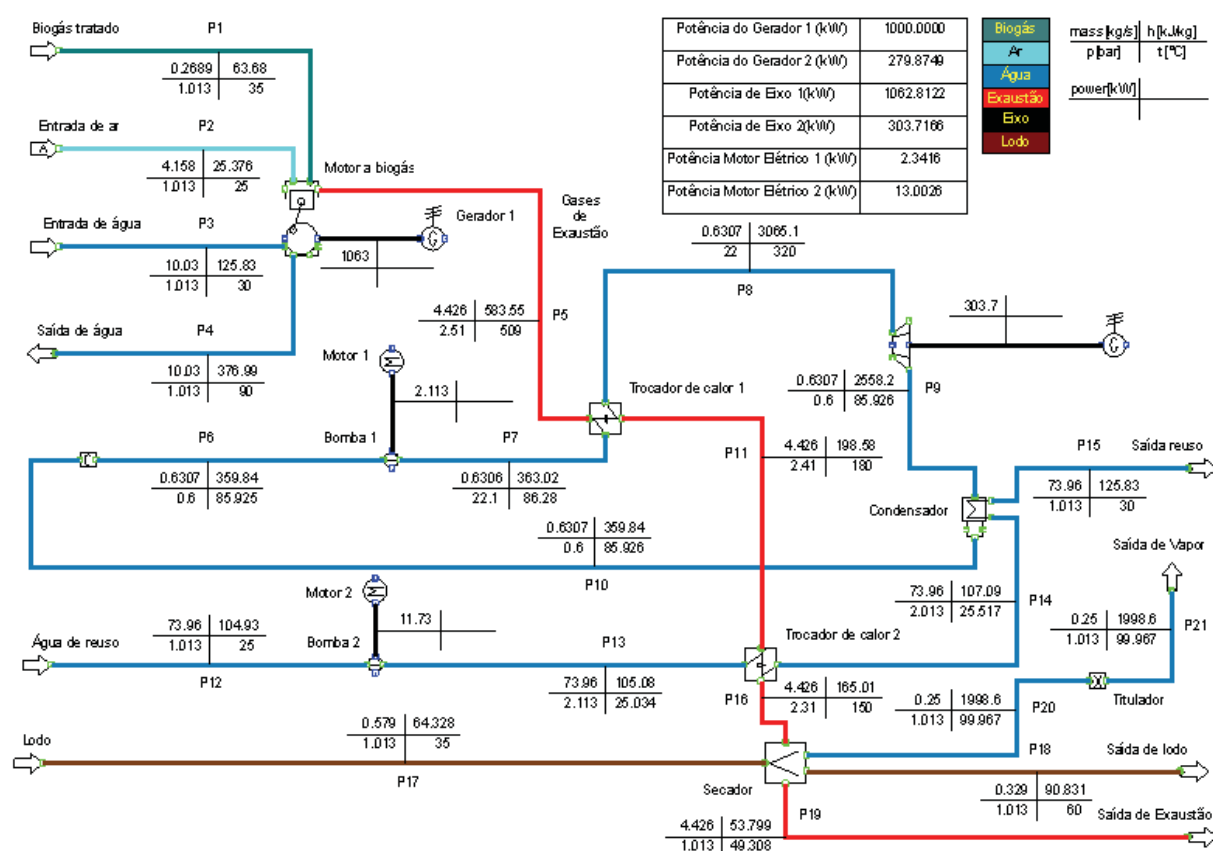


Figura 6.2: Simulação do Caso 2, confeccionado no IPSEpro®.

O produto final será um granulado estável (2 a 3 mm em média). Por motivo de segurança de operação, deve-se operar em circuito fechado para minimizar o teor de oxigênio e evitar qualquer risco de incêndio ou explosão, típico para secadores operando com produtos orgânicos, em particular lodos.

Na Tabela 6.7 é apresentada a comparação termodinâmica entre os Casos 1 e 2, em termos de potências dos geradores (incluindo a potência de compressão para o Caso 1), de bombeamento, assim como de potência térmica perdida no condensador.

Tabela 6.7: Comparação termodinâmica entre os Casos 1 e 2.

Parâmetros	Equipamentos	Caso 1	Caso 2
Potência gerada (kW)	Turbina a vapor	900	280,00
	Turbina a gás	1.000,00	-
	Motor a biogás	-	1.000,00
	Total	1.900,00	1.280,00
Potência consumida (kW)	Bomba	48,42	16,18
	Compressor	339,45	-
	Total	387,87	16,18
Potência térmica (kW)	Condensador	3.517,69	1.386,38
	Secador	889,75	381,57
	Total	4.407,44	1.757,94
Eficiência global (%)	-	38,7	23,0

Para calcular os créditos de carbono evitado para o tratamento de esgoto, considerando a potência instalada de geração de energia a partir do biogás para os Casos 1 e 2 respectivamente de 1.900 kW para o Caso 1 e 1.280 kW para o Caso 2, onde o tempo de operação da planta de 8.760 h/ano.

O total de CO₂ equivalente evitado, de acordo com o fator de intensidade de carbono estabelecido de 0,5 tCO₂ equivalente/MWh, resulta num total de

8.322,00 tCO₂ equivalente/ano para o Caso 1 e de 5.606,40 tCO₂ equivalente/ano para o Caso 2, tendo como base a Equação (5.79).

Considerando um valor de Certificados de Emissões Evitadas (CEE) da ordem de $P_{co} = \text{US\$ } 10,00/\text{tCO}_2$ equivalente, resulta uma receita total de US\$ 83.220,00/ano para o Caso 1 e US\$ 56.064,00/ano para o Caso 2, segundo a Equação (5.80), perfazendo um total de US\$ 1.664.400,00 para o Caso 1 e US\$ 1.121.280,00 para o Caso 2 durante a vida útil das plantas (20 anos), segundo a Equação (5.81).

As eficiências globais mostradas na Tabela 6.7 foram calculadas com base nos dados apresentados na mesma e utilizando-se a Equação (5.10), é possível se calcular as eficiências globais do Caso 1 e do Caso 2, onde se têm o valor percentual de 38,7 % para o primeiro caso e de 23 % para o segundo caso, mostrando que os equipamentos utilizados no Caso 1 são muito mais eficientes.

Nas Tabelas 6.8 e 6.9 estão discriminados os custos para os Casos 1 e 2 do presente trabalho.

Tabela 6.8: Custos dos equipamentos para geração de eletricidade no Caso 1.

Equipamentos	Modelo	Quant.	Custo (US\$)
Turbina a gás Caterpillar de 1.200 kW	Saturn 20	1	770.000,00
Compressor de palhetas	V04G	1	245.000,00
Bomba re-autoescovante IMBIL	E/EP	1	62.500,00
Trocador de calor	BEM	2	200.000,00
Turbina a vapor de 900 kW	TS500	1	312.500,00
Condensador	Standard	1	200.000,00
Secador de Lodo Andritz	3Sys AG	1	2.140.000,00
Total de Investimentos			3.930.000,00

Tabela 6.9: Custos dos equipamentos para geração de eletricidade no Caso 2.

Equipamentos	Modelo	Quant.	Custo (US\$)
Motor a biogás GE 1.000 kW	Jenbacher JMS 320	1	850.000,00
Bomba IMBIL	E/EP	1	62.500,00
Trocador de calor	BEM	2	200.000,00
Turbina a vapor 300 kW	TG320	1	162.500,00
Condensador	Standard	1	200.000,00
Secador de Lodo Andritz	3Sys AG	1	2.140.000,00
Total de Investimentos			3.615.000,00

De acordo com o total de investimentos dos dois casos, nota-se que o custo dos equipamentos do Caso 1 é US\$ 315.000,00 mais elevado que o Caso 2, por se tratar de uma tecnologia mais eficiente.

Adotando-se um valor para comercialização do lodo como biofertilizante da ordem de US\$ 88,00 por tonelada, segundo Corrêa e Corrêa (2001), resultaria em receita anual de US\$ 1.606.000,00 para cada uma das plantas, pois a quantidade de biofertilizante produzido é a mesma, resultando um valor total de US\$ 32.120.000,00 ao final da vida útil da planta.

A diferença de equivalente evitado de CO₂ do Caso 1 para o Caso 2 é de 2.715,60 tCO₂ equivalente/ano e o valor de Certificados de Emissões Evitadas tem a diferença de US\$ 543.120,00 para um período de 20 anos.

Os ganhos obtidos pela ETE com a implantação da planta de cogeração de energia são: a diminuição do uso de eletricidade comprada, a obtenção de receitas pela venda do lodo e a comercialização de créditos de carbono, possibilitando uma redução anual dos custos. A Tabela 6.10 faz a comparação econômica entre os casos e a Tabela 6.11 relaciona os valores dos custos dos produtos dos mesmos.

Tabela 6.10: Comparação econômica entre os Casos 1 e 2.

	Parâmetros	Caso 1	Caso 2
Custos (US\$)	Investimento em equipamentos	3.930.000,00	3.615.000,00
	Operação e manutenção	17.347.954,00	11.841.472,00
	Custo total	21.277.954,00	15.456.472,00
Receitas (US\$)	Comercialização Créditos de Carbono	1.664.400,00	1.121.166,00
	Comercialização do lodo	3.650.000,00	32.120.000,00
	Geração de eletricidade (economia)	45.727.725,00	30.803.035,00
	Receita total	51.042.125,00	64.044.201,00
Balanco (US\$)	-	29.764.171,00	48.587.729,00

Tabela 6.11: Comparação dos custos nas diversas condições de análise.

Caso 1 (Turbina a Gás de 1.000k W e Turbina a vapor de 900 kW)					
<i>N</i> (anos)	<i>j</i> (%)	<i>f</i> (ano ⁻¹)	<i>c_{bf}</i> (US\$/kWh)	<i>c_{el}</i> (US\$/kWh)	<i>CM_{ex}</i> (US\$/h)
2	0,12	0,592	0,0180	0,0752	151,36
4	0,12	0,329	0,0100	0,0441	88,58
6	0,12	0,243	0,0074	0,0339	68,01
8	0,12	0,201	0,0061	0,0290	57,98
10	0,12	0,177	0,0054	0,0261	52,16
12	0,12	0,161	0,0049	0,0243	48,44
14	0,12	0,151	0,0046	0,0230	45,91
16	0,12	0,143	0,0044	0,0221	44,12
18	0,12	0,138	0,0042	0,0215	42,82
20	0,12	0,134	0,0041	0,0210	41,85
Caso 2 (Motor a Biogás de 1.000 kW e Turbina a vapor de 280 kW)					
<i>N</i> (anos)	<i>j</i> (%)	<i>f</i> (ano ⁻¹)	<i>c_{bf}</i> (US\$/kWh)	<i>c_{el}</i> (US\$/kWh)	<i>CM_{ex}</i> (US\$/h)
2	0,12	0,592	0,017	0,091	153,65
4	0,12	0,329	0,010	0,053	88,43
6	0,12	0,243	0,007	0,040	67,06
8	0,12	0,201	0,006	0,034	56,64
10	0,12	0,177	0,005	0,031	50,60
12	0,12	0,161	0,005	0,029	46,73
14	0,12	0,151	0,004	0,027	44,11
16	0,12	0,143	0,004	0,026	42,25
18	0,12	0,138	0,004	0,025	40,89
20	0,12	0,134	0,004	0,025	39,88

Após serem estabelecidos os custos dos produtos gerados pelos Casos 1 e 2, esses valores são transportados, respectivamente, para as Figuras 6.3 e 6.4, nas quais são visualizados a variação do custo do lodo e da eletricidade ao longo da vida útil das plantas.

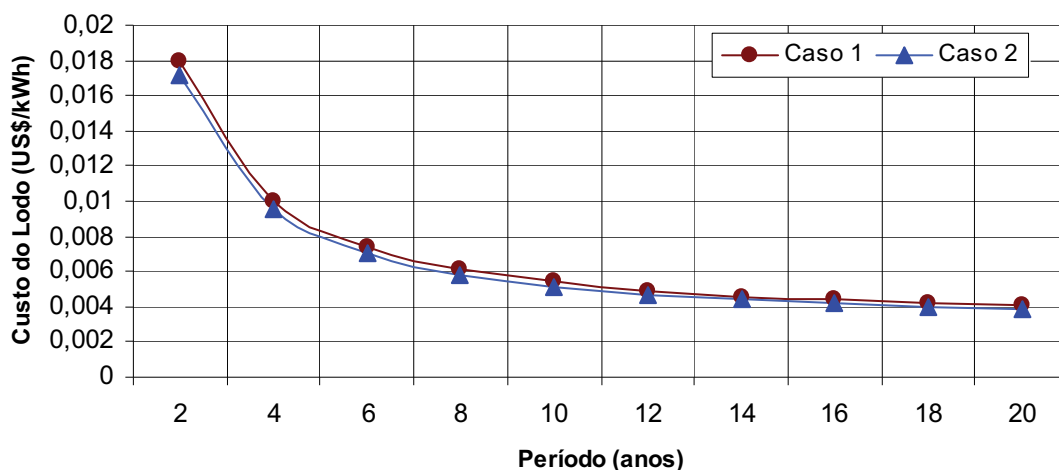


Figura 6.3: Custos do lodo produzido pelos Casos 1 e 2.

Analisando-se a Figura 6.3, nota-se nos primeiros anos que o custo do lodo no Caso 1 é ligeiramente mais alto que no Caso 2, mas com o passar do tempo esses custos decaem e tendem a se igualar, estabilizando-se em torno de US\$ 0,004/kWh a partir do décimo quinto ano.

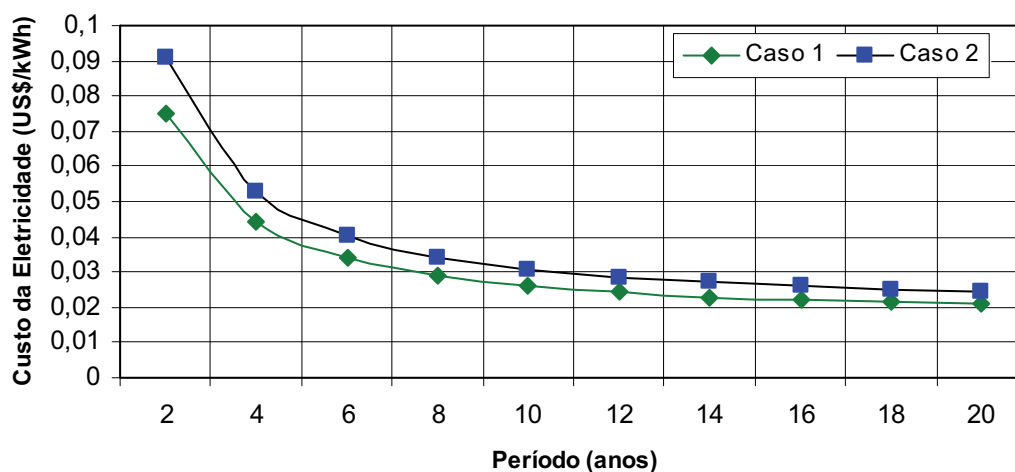


Figura 6.4: Custo da eletricidade gerada nos Casos 1 e 2.

Verifica-se na Figura 6.4 que o custo inicial da eletricidade no Caso 2 é significativamente mais alto que o Caso 1. Esta diferença se dá pelo fato dos dois casos usarem a mesma quantidade de combustível (biogás), sendo que no Caso 1

gera-se uma quantidade maior de eletricidade que no Caso 2. Com o decorrer do tempo ambos os custos decaem e se aproximam, estabilizando-se entre US\$ 0,02/kWh e US\$ 0,03/kWh a partir do décimo quinto ano.

A Figura 6.5 ilustra o custo de manufatura exergético (CM_{ex}) dos Casos 1 e 2, considerando os custos dos produtos e suas exergias.

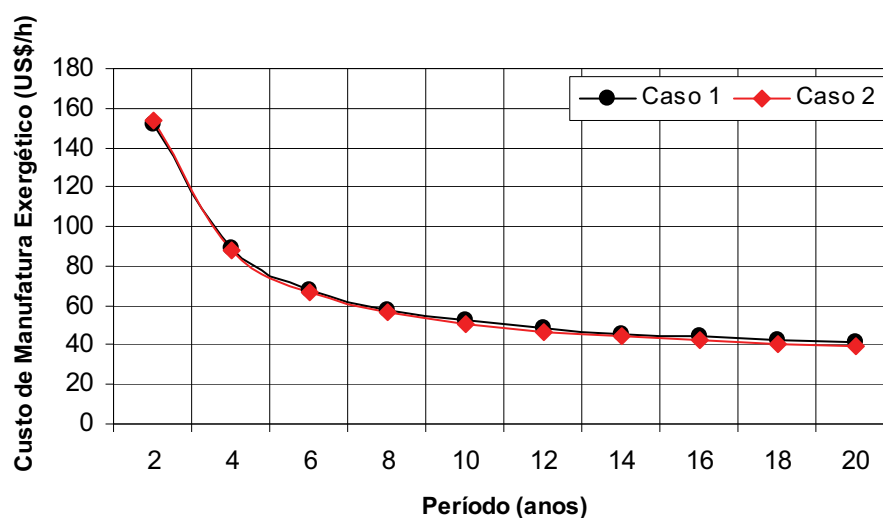


Figura 6.5: Custo de manufatura exergético dos Casos 1 e 2.

Analisando-se a Figura 6.5, observa-se que os custos de manufatura Exergético do Caso 1 e do Caso 2 são praticamente iguais para todo o período. Contudo o custo de ambos os casos tendem a diminuir no decorrer do período, sendo observada uma queda de cerca de 50 % após os primeiros 5 anos e mantendo-se quase que constante em torno de US\$ 40,0/h a partir do décimo quinto ano.

A comparação entre as receitas anuais da ETE para os Casos 1 e 2, calculadas através das Equações (5.76) e (5.77), estão dispostas na Tabelas 6.12. Os resultados obtidos são utilizados para a elaboração da Figura 6.6, que permite avaliar a viabilidade econômica da implantação de cada um dos casos estudados.

Tabela 6.12: Comparação das receitas anuais entre os Casos 1 e 2.

Caso 1 (Turbina a Gás de 1.000 kW e Turbina a vapor de 900 kW)								
<i>N</i> (anos)	<i>j</i> (%)	<i>P_e - c_{el}</i> (US\$/kWh)	<i>Ep_{tg} + Ep_{tv}</i> (kW)	<i>P_{bf} · Q_{bf}</i> (US\$/h)	<i>c_{bf} · Ex_{13.2}</i> (US\$/h)	<i>P_{co} · Q_{co}</i> (US\$/h)	<i>t_{op}</i> (h/ano)	<i>R</i> (US\$/ano)
2	0,12	0,062	1.900	183,33	11,75	9,5	8.760	2.621.610,99
4	0,12	0,093	1.900	183,33	6,54	9,5	8.760	3.184.042,60
6	0,12	0,103	1.900	183,33	4,83	9,5	8.760	3.368.350,09
8	0,12	0,108	1.900	183,33	4,00	9,5	8.760	3.458.186,33
10	0,12	0,111	1.900	183,33	3,51	9,5	8.760	3.510.298,66
12	0,12	0,113	1.900	183,33	3,20	9,5	8.760	3.543.614,98
14	0,12	0,114	1.900	183,33	2,99	9,5	8.760	3.566.255,85
16	0,12	0,115	1.900	183,33	2,85	9,5	8.760	3.582.287,32
18	0,12	0,116	1.900	183,33	2,74	9,5	8.760	3.593.971,89
20	0,12	0,116	1.900	183,33	2,66	9,5	8.760	3.602.668,89
Caso 2 (Motor a Biogás de 1.000 kW e Turbina a vapor de 280 kW)								
<i>N</i> (anos)	<i>j</i> (%)	<i>P_e - c_{el}</i> (US\$/kWh)	<i>Ep_{tg} + Ep_{tv}</i> (kW)	<i>P_{bf} · Q_{bf}</i> (US\$/h)	<i>c_{bf} · Ex_{10.2}</i> (US\$/h)	<i>P_{co} · Q_{co}</i> (US\$/h)	<i>t_{op}</i> (h/ano)	<i>R</i> (US\$/ano)
2	0,12	0,047	1.280	183,33	37,44	6,40	8.760	1.856.237,98
4	0,12	0,085	1.280	183,33	20,83	6,40	8.760	2.427.568,62
6	0,12	0,097	1.280	183,33	15,39	6,40	8.760	2.614.792,3
8	0,12	0,103	1.280	183,33	12,74	6,40	8.760	2.706.049,97
10	0,12	0,107	1.280	183,33	11,20	6,40	8.760	2.758.986,84
12	0,12	0,109	1.280	183,33	10,22	6,40	8.760	2.792.830,31
14	0,12	0,110	1.280	183,33	9,55	6,40	8.760	2.815.829,41
16	0,12	0,111	1.280	183,33	9,07	6,40	8.760	2.832.114,54
18	0,12	0,112	1.280	183,33	8,73	6,40	8.760	2.843.983,98
20	0,12	0,113	1.280	183,33	8,47	6,40	8.760	2.852.818,59

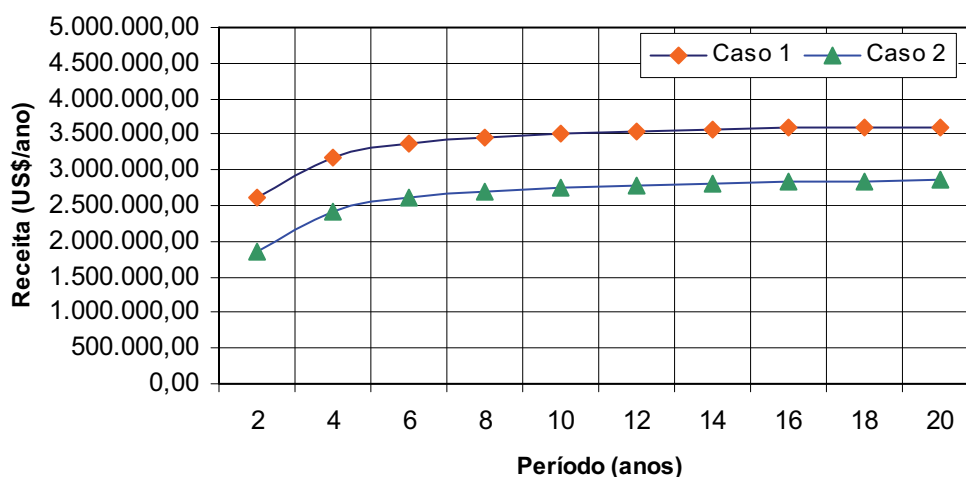


Figura 6.6: Receita anual nos Casos 1 e 2 ao longo da vida útil das plantas.

Analisando a Figura 6.6, onde se faz uma progressão econômica para 20 anos de vida útil das plantas, pode-se reparar que a receita referente ao Caso 1 é muito maior que o Caso 2, assim como a sua potência instalada. Como foi mostrado na Figuras 6.4, o Caso 1 tem uma geração de energia maior que o Caso 2 utilizando a mesma quantidade de combustível. Nota-se que a partir do décimo quinto ano as receitas tornam-se praticamente constantes. Contudo, a receita do Caso 1 manteve-se com uma média de US\$ 753.007,00/ano maior que a do Caso 2 durante todo o período da vida útil das plantas.

7. Conclusões

Foi verificado que o biogás gerado numa ETE possui um bom potencial energético, que normalmente não costuma ser aproveitado, uma vez que geralmente ele é queimado em *flare*, apenas para evitar a emissão de metano para a atmosfera. O aproveitamento energético desse biogás por meio das técnicas propostas neste trabalho reduz o consumo de energia elétrica da planta e, principalmente, possibilita a secagem de todo o lodo da ETE.

Analisando-se os dois casos em questão pode-se chegar à conclusão que, apesar dos custos dos equipamentos do Caso 2 ser menor que os do Caso 1, o Caso 1 é economicamente mais viável que o Caso 2, pois permite a geração de uma maior quantidade de energia elétrica, é mais eficiente e gera uma quantidade maior de receita com a comercialização de créditos de carbono, tornando assim a sua implementação mais atrativa.

No entanto, com base nos dados obtidos através das tecnologias utilizadas, verifica-se que os custos envolvidos ainda são elevados e não permitem a total auto-suficiência energética da planta, principalmente devido à grande demanda de eletricidade requerida pelos equipamentos do processo de tratamento de esgoto. Contudo, os ganhos decorrentes da venda de lodo e dos créditos de carbono proporcionam uma receita positiva para ambos os casos considerados.

Vale destacar que este trabalho é o primeiro no contexto do NUPLN (Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia) dentro deste contexto e, assim sendo, o mesmo servirá como base para o desenvolvimento de trabalhos futuros mais aprofundados para o aproveitamento do biogás de gerado em

Estações de Tratamento de Esgoto, visando buscar novas alternativas para contribuir para a redução do impacto ambiental.

Existem algumas formas diferentes de se aproveitar esse biogás, como por exemplo, utilizá-lo para abastecimento de uma frota veicular, onde devem ser feitas as devidas adaptações aos motores dos automóveis que irão usar o biogás no lugar de outros combustíveis.

O biogás também pode ser usado para vários tipos de processos, podendo ser citado como exemplo o aquecimento de caldeiras, até mesmo o uso em fogões domésticos e industriais, substituindo o GLP.

Além do aquecimento, o biogás pode ser utilizado em processos de resfriamento, como para alimentar um *Chiller* de absorção gerando água fria, a qual posteriormente pode ser utilizada para o sistema de ar condicionado de prédios ou escritórios, eliminando assim os custos que poderiam ser gastos com esses tipos de aparelhos.

Vale destacar que uma das maiores dificuldades encontradas para o desenvolvimento deste trabalho foi a pequena quantidade de informações relacionadas ao assunto disponível na literatura, tornando esse trabalho importante dentro deste contexto.

Além disso, outra dificuldade foi adequar as plantas às novas tecnologias do mercado, para tanto foram simuladas inúmeros modelos até que se chegasse a uma estrutura compatível a tecnologia existente, preocupando-se sempre com a relação custo benefício do projeto como um todo.

A pesquisa de equipamentos de geração que utilizam biogás também foi um dos fatores que dificultou o andamento desse trabalho, tendo sido gasto um tempo maior do que esperado para encontrar o equipamento certo e a empresa que o

fabricasse. Contudo, isso contribui positivamente, para que se tenha um novo mercado nacional para esses tipos de energias renováveis no país, onde o governo terá futuramente que se mobilizar ainda mais para acompanhar esse crescimento tão promissor de geração e cogeração de energia.

Referências

AISSE, M.M. **Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABRES, 2000. 192 p.

AISSE, M.M.; JÜRGENSEN, D.; LOBATO, M.B.; ALÉM SOBRINHO, P. Avaliação do um sistema reator RALF e flotação por ar dissolvido, no tratamento de esgoto sanitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. Anais: Rio de Janeiro: ABES, 2001. p. 10.

CORRÊA, R.S.; CORRÊA, A.S. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. **Revista Técnica da SANARE**, Curitiba, v. 16, n.2, p. 49-56, 2001. (Companhia de Saneamento do Paraná).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Guia do cogrador de energia elétrica**. Brasília: Distrito Federal, 1998. (Série Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas, 5). CD ROM.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Tarifas médias por classe de consumo regional e no Brasil (R\$/MWh) referentes ao ano de 2007**. Brasília: Distrito Federal, 2005. 30 p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifamedia/Default.cfm>> Acessado em: 2 jul. 2008.

BALESTIERI, J.A.P. **Cogeração: Geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002. 279 p.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design & optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 542 p.

BOUGRIER, C.; CARRÈRE, H.; BATTIMELLI, A.; DELGENÈS, J.P. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quality and

improve biogas yield. **Process safety and environmental protection**, 84 (B4) **Institution of chemical engineers**. Narbonne: France, 2006. Part B, p. 280-284.

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

BUSATO, R. **Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como tratamento de efluente de reator UASB - Estudo de caso da ETE de Imbituva**. 2004. 214 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto (ENERG-BIOG)**. Relatório Técnico final. São Paulo: ENERG, 2004. 222 p.

CERQUEIRA, S.A.A.G. **Metodologia de análise termoeconômica de sistemas**. 1999. 137 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios: Fundamentos da digestão anaeróbia**. Belo Horizonte: UFMG, 1997. v. 5, 245 p.

COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C.; VARKULYA JUNIOR; A.; PECORA, V. Programa de uso racional de energia e fontes alternativas – PUREFA. In: CONGRESSO INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ICTR, 1, 2003, São Paulo. **Biodigestor modelo UASB**. São Paulo: São Paulo, 2003. 20 p.

COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL

– AGRENER-GD, 6, 2006, Campinas. **Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio.** Campinas: UNICAMP, 2006. p. 12. CD-ROM.

COLLARES PEREIRA, M. **Energias renováveis, a opção inadiável.** Lisboa: Sociedade Portuguesa de Energia Solar - SPES, 1998. 256 p.

COSTA, D.F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DAVID, A.C. **Secagem térmica de lodos de esgoto.** 2002. 151 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

FRANÇA, M. **Avaliação da biodegradabilidade e da biodisponibilidade do lodo de esgoto anaeróbico termohidrolisado pelo uso de biogás.** 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

GITMAN, L.J. **Princípios da administração financeira.** 3.ed. São Paulo: Harba, 1984. 781 p.

GODOY JÚNIOR, E.; SILVEIRA, J.L.; GIACAGLIA, G.E.O. Miniestação de tratamento de esgoto e reuso de águas associada a sistema de cogeração energética no aproveitamento do biogás produzido. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 4, 2004, Natal. **Anais...** Natal: [s.n.], 2004. CD-ROM.

GODOY JÚNIOR, E. Sistema de armazenamento e aproveitamento energético de GNB (Gás Natural a Baixa Pressão) e de biogás de esgoto. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - SILUBESA, 12, 2006, Taubaté. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2006. 11 p.

GUARDABASSI, P.; PIRES, R.G. Auto geração de energia elétrica em condomínios residenciais utilizando biogás de esgoto/gás natural, In: FERRER, J.T.V. (Ed.).

Biogás: Projetos e pesquisas no Brasil. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2006. p. 131-137.

HORLOCK, J.H. **Cogeneration – Combined heat and power (CHP): Thermodynamics and economics.** Florida: Krieger Publishing Company, 1997. 226 p.

JOHANSSON, T.B.; KELLY, H.; REDDY, A.K.N.; WILLIAMS, R.H. **Renawable energy sources for fuels and electricity.** Washington: Island Press, 1993. 1160 p.

JORDÃO, E.P.; ALÉM SOBRINHO, P. **Pesquisa e experiência com pós-tratamento para reatores no Brasil.** São Carlos: Universidade de São Paulo, USP, 2004. (Relatório PROSAB/FINEP, 13 p).

KATO, M.T.; FLORÊNCIO, L.; ARANTES, R.F.M. Tratamento de esgotos sanitários em reatores tipo EGSB anaeróbio e aeróbio. In: CHERNICHARO, C.A.L. (Org.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: Minas Gerais, 2001. v. 2, p. 165-174.

KOTAS, T.J. **The exergy method of thermal plant analysis.** Florida: Krieger Publishing, 1985. 328 p.

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

LAUTMAN, L. **Reliability of natural gas cogeneration systems.** New York: Gas Research Institute, 1993. 186 p.

LIMA, F.P. **Energia no tratamento de esgotos:** análise tecnológica e institucional para a conservação de energia e o uso do biogás. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MALTA, T.S. **Aplicação de lodos de ETE's na agricultura: Estudo de caso Município de Rio das Ostras - RJ**. 2001. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública FIOCRUZ/ENSP, Engenharia Sanitária e Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2001.

MARTINS, O.S.; GUARDABASSI, P.; COSTA, D.F. 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**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2006. p. 139-147.

MELLO, J.C.O.; ANDRADE CANELLAS CONSULTORIA E ENGENHARIA LTDA. **Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás**. Minuta do Termo de Referência TR8. São Paulo: Comissão Especial de Bioenergia de Estado de São Paulo - CEBE, 2007. 75 p.

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

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PROGRAMA EM SANEAMENTO BÁSICO - PROSAB. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. Belo Horizonte: PROSAB, 2001. 107 p.

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON G. The role of biomass energy in rural development. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2000. p. 183-199.

SANTOS, P. **Valorização energética de lamas de ETARs Municipais: Digestão anaeróbia e cogeração com biogás**. Lisboa: Centro para a Conservação de Energia - CCE, 2000.

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

SIMTECH. **IPSEproUser documentation: Version 3.1**, Simulations Technology. Austria: SIMTECH, 2000. 667 p.

SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R.; **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process**. Hemisphere publishing corporation. New York: New York, 1988. p. 332.

TIAGO FILHO, G.L.; FERREIRA, E.F. Agroenergia: Fundamentos sobre o uso da energia no meio rural. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4, 2004, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2004.

TONETTI, A.L.; CORAUCCI FILHO, B.; STEFANUTTI, R.; KANEGAE, A.P. Método alternativo de tratamento de esgotos: reator anaeróbio com recheio de bambu associado com filtros biológicos de areia. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, Brasília, v. 31, p. 109-115, 2003.

TSATSARONIS, G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems, **Energy Combustion**, Progress in Energy and Combustion Systems 19, p. 227-257, 1993.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. **Anaerobic sewage treatment: A practical guide for regions with a hot climate**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. 226 p.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 594 p.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Lodos ativados**. Belo Horizonte: UFMG/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 1997. 416 p.

VON SPERLING, M. **Características típicas dos principais sistemas de tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: UFMG/Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2001. 211 p.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Design of municipal wastewater treatment plants**. Alexandria: WEF Manual of Practice, 1992. v.2, p. 831-869.

Anexo A – Protocolo de Kyoto, MDL e Créditos de Carbono

A.1. Protocolo de Kyoto

Na tentativa de reverter as terríveis previsões de um planeta com temperaturas cada vez maiores, causadas pelo Efeito Estufa, surgiu o Protocolo de Kyoto. As partes da convenção sobre mudança do clima, durante sua terceira convenção em 1997, aprovaram e abriram para assinaturas o Protocolo de Kyoto, um acordo internacional que estabelece metas de controle dos gases causadores do efeito estufa.

O Protocolo obriga 39 países desenvolvidos a deixar, no período de 2008 a 2012, a emissão de dióxido de carbono e outros gases nocivos 5,2 % menor do que o índice global registrado em 1990. O documento é um complemento a convenção da ONU sobre mudança do clima no planeta, assinada na Conferência das Nações Unidas sobre Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro em 1992 (ECO-92).

Uma das idéias disseminadas pelo Protocolo de Kyoto para amenizar os prejuízos causados pela incalculável quantidade de dióxido de carbono já emitida por esses países é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O objetivo do MDL é estimular a produção de energia limpa, como a solar e a gerada a partir de biomassa, e remover o carbono da atmosfera.

Neste campo, chamado seqüestro de carbono, os principais planos consistem no replantio de florestas que, ao crescer, absorvam CO₂ do ar. O financiador da recuperação ambiental, por exemplo, iria receber um Certificado de Redução de Emissões (CERs).

O Protocolo de Kyoto divide os países em dois grupos: os que precisam reduzir suas emissões de poluentes e os que não têm essa obrigação. O Brasil está

no segundo grupo que irá receber para não poluir mais e para tirar da atmosfera, com suas florestas e matas, o dióxido de carbono ainda produzido por seus financiadores.

Assim, os países mais poluidores, os mais ricos em sua maioria, poderão pagar para continuar poluindo em alguma medida, através do Leilão de Certificado de Emissões.

O tratado entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, depois da decisão russa de ratificá-lo. Para entrar em vigor, era necessária a aprovação do Protocolo por países que representem juntos 55 % das emissões de gases do efeito estufa. No Brasil, foi ratificado em 19 de junho de 2002 e sancionado pelo presidente Fernando Henrique Cardoso em 23 de julho do mesmo ano.

Os Estados Unidos, maior poluidor do mundo, sendo responsável por 36,1 % das emissões de gases poluentes, não aderiu ao acordo, além de apontá-lo como um golpe contra a economia e os empregos no país. Para alcançar as metas de redução estipuladas pelo Protocolo, os americanos teriam de fazer grandes investimentos, com reflexos na sua atividade econômica, alegam os dirigentes.

O Protocolo estabelece alguns mecanismos de flexibilização para auxiliar no cumprimento das metas de reduções, a saber:

- Implementação Conjunta (*Joint Implementation*) ou: mecanismo que só pode ser utilizado entre países, onde um financia projetos de reduções em outro, onde os custos são mais baixos;
- Comércio de emissões: ocorre quando um país que tenha reduzido as suas emissões a níveis abaixo da meta pode vender o “excesso” a outro, sendo os dois integrantes;

- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL (*Clean Development Mechanism* - CDM): mecanismo que inclui os países em desenvolvimento.

Há a criação de um mercado mundial derivado do comércio de Reduções Certificadas de Emissões (CERs) entre os países. Este mecanismo evita a emissão ou retirada da atmosfera de gases do efeito estufa (GEE), promovendo o desenvolvimento sustentável no país hospedeiro do projeto. Além disso, permite que ocorram transferências de tecnologias, atuando nas áreas: energética, de transporte e florestal, além de auxiliar o país no cumprimento das suas metas de redução de GEE.

Os projetos de MDL deverão oferecer um critério de adicionalidade no qual devem ocorrer reduções de emissões adicionais às quais ocorreriam na ausência do projeto; oferecer benefícios reais, mensuráveis e a longo prazo relacionados com a mitigação das mudanças climáticas e submeter-se a orientação da Conferência das Partes.

Para países em desenvolvimento como o Brasil, o MDL oferece oportunidades principalmente, para aumentar os investimentos na área energética, com inovações no setor de energia com fontes mais limpas, gerando empregos e oportunidades. No setor florestal, surge a oportunidade da recuperação financiada de áreas degradadas, com projetos de reflorestamento e aflorestamento (sendo que, o manejo florestal e a conservação, não são incluídos no mecanismo).

A.2. Créditos de Carbono

O mercado de créditos de carbono nasceu em dezembro de 1997 com a assinatura do Protocolo de Kyoto, que estabeleceu metas de redução de gases de efeito estufa pelos países desenvolvidos que se comprometeram em reduzir as

emissões, em média, 5 % abaixo dos níveis registrados em 1990. Os países que não conseguirem atingir suas metas terão liberdade para investir em projetos MDL de países em desenvolvimento (AMBIENTE BRASIL, 2005).

Nesse cenário, o Brasil pode se colocar como país-sede de projetos de tecnologia limpa que contribuam para a redução de emissões de gases de efeito estufa, podendo, portanto, tornar-se vendedor de créditos de carbono e também alvo de investimentos.

O Brasil é, depois da Índia e da China e à frente do México, o mais importante alvo de manifestações de interesse para acolher projetos de geração de créditos de carbono no âmbito do MDL do Protocolo de Kyoto.

A negociação de contratos futuros de crédito de carbono já ocorre com a União Europeia e entre países do Velho Continente, através do EU ETS; com o Canadá, Japão e até com os Estados Unidos, através da Bolsa Climática de Chicago.

O crescente amadurecimento deste mercado vem influenciando o surgimento de novas bolsas internacionais de comercialização de créditos de carbono, bem como o investimento das bolsas de já existentes neste novo segmento de mercado, sendo que dentre essas bolsas podem ser citadas: a bolsa de comércio do setor elétrico da Escandinávia (*Nord Pool*); a bolsa de comercialização de energia da Europa Central (*European Energy Exchange* - EEX), com sede na Alemanha; o braço da bolsa climática de Chicago no mercado europeu (*European Climate Exchange*); e a própria Bolsa de Mercadorias e Futuros do Brasil (BM&F).

O maior dos mercados do carbono é, por enquanto, o mercado europeu, onde existem seis plataformas de transação que dão conta de metade do atual comércio de licenças de emissão. Na sua primeira fase, de Janeiro de 2005 a Dezembro de

2007, o EU-ETS regula as emissões de CO₂ de grandes instalações industriais (sobretudo produções elétrica e térmica, e, também, produtos minerais metálicos e não metálicos, e hidrocarbonetos) que representam cerca de 40 % do total de emissões no espaço da UE. Essas emissões foram limitadas pelo teto de 6.600 milhões de toneladas. O volume do comércio de licenças cresceu aceleradamente desde 2003, tendo atingido 322 milhões de toneladas em 2005 (uma movimentação de ativos e uma liquidez ainda modesta face ao volume de ativos). Entretanto, foram sendo criados os instrumentos e instituições do novo mercado, desde o nível nacional ao comunitário, até ao Registro de Transações Comunitárias (CTL) no topo, que deverão facilitar a sua expansão futura.

Desde o início que os protagonistas principais neste mercado foram as companhias do setor energético, pela experiência que detêm na transação de eletricidade e gás, e pela proximidade às oportunidades de negócio; mas, a partir de meados de 2005, bancos e fundos de investimento tomaram a iniciativa de procurar outras empresas interessadas em atuar como gestores dos respectivos ativos em carbono e, dentro deste contexto, é que surge uma boa oportunidade para empresas que atuam nas áreas de tratamento de esgoto e coleta de lixo urbano, as quais podem produzir biogás.

Anexo B – Informações sobre o Programa IPSEpro®

B.1. Informações Gerais

O IPSEpro® (SIMTECH, 2000) é um programa que possui um conjunto de módulos e bibliotecas que apresentam diferentes funções e que são destinados à criação de modelos para simulação de processos, permitindo a utilização dos mesmos para a análise de uma planta térmica.

A Figura B.1 mostra esquematicamente a estrutura do IPSEpro®.

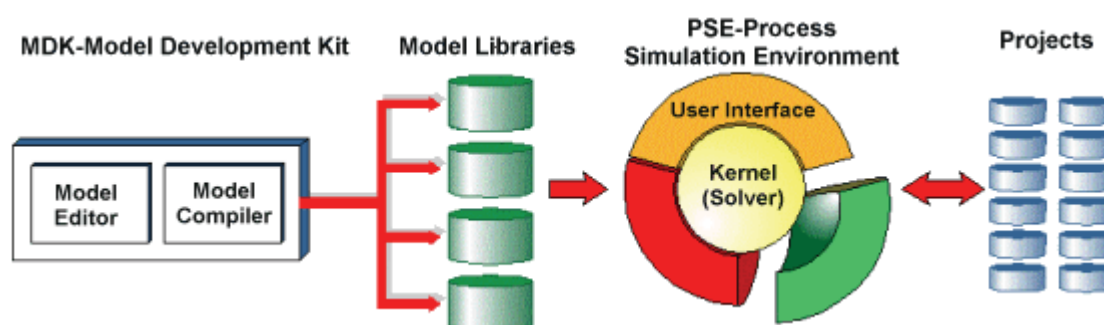


Figura B.1: Representação esquemática da estrutura do IPSEpro®.

O IPSEPro® é constituído de dois módulos principais: o MDK (*Model Development Kit*) e o PSE (*Process Simulation Environment*).

Com o PSE, o usuário monta seu ciclo baseado em componentes pré-definidos ou criados com *Model Development Kit* numa biblioteca. O ciclo é montado selecionando os componentes do menu e colocando-os numa janela e interligando-os da maneira desejada. Logo após é inserido os dados dos componentes e através de métodos matemáticos robustos o programa garante cálculos rápidos e exatos.

B.2. Bibliotecas do IPSEpro®

O IPSEpro® tem várias bibliotecas disponíveis, sendo assim uma importante ferramenta na verificação da viabilidade técnica e/ou econômica de plantas de geração de energia. A seguir serão descritas algumas dessas bibliotecas.

B.2.1. Biblioteca APP

A biblioteca APP (*Advanced Power Plant*) foi projetada para a modelagem de uma grande faixa de sistemas térmicos de potência. A biblioteca contém modelos que permitem tanto projetar, quanto analisar qualquer tipo de planta de potência já existente, incluindo: Plantas de potência convencionais, plantas de cogeração e Plantas de ciclo combinado.

A seguir, serão apresentados na Figura B.2 os equipamentos contidos na biblioteca APP e na Figura B.3 a interface da biblioteca APP com seus componentes.

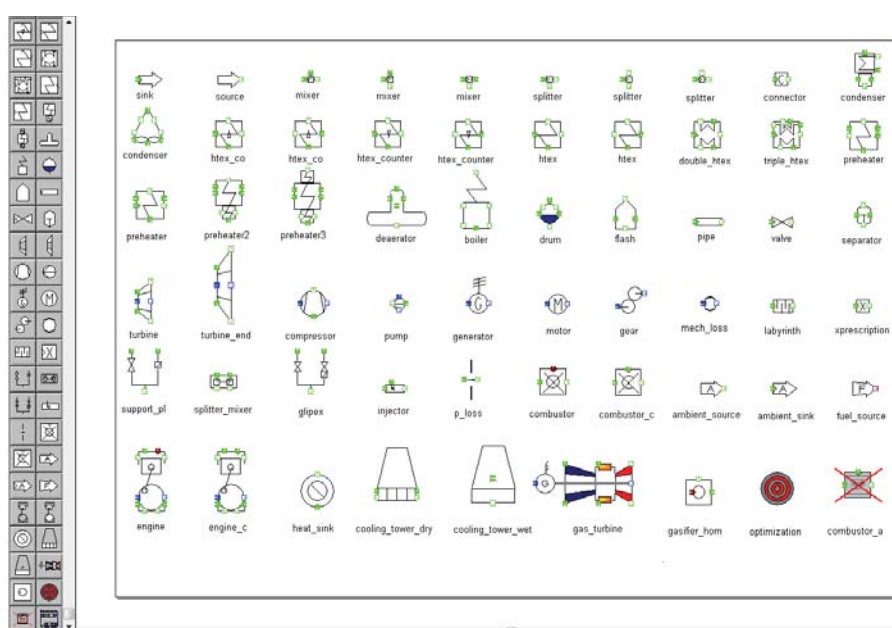


Figura B.2: Equipamentos da biblioteca APP.

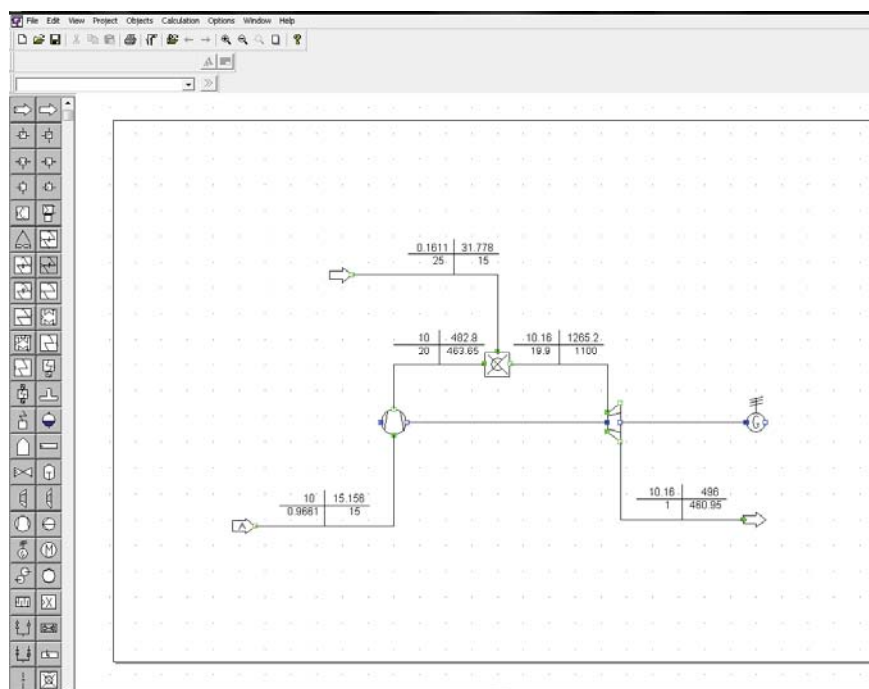


Figura B.3: Interface da biblioteca *Advanced Power Plant*.

B.2.2. Biblioteca *Gas Turbine*

A biblioteca *Gas Turbine* fornece um conveniente modo para avaliar o desempenho no uso de turbinas a gás específicas em uma planta de ciclo combinado. Essa biblioteca contém modelos pré-definidos de turbinas a gás comercializadas no mercado que podem ser usados juntos com a biblioteca *Advanced Power Plant*, propiciando avaliar o desempenho de turbinas a gás numa planta específica em questão. Os modelos existentes na biblioteca *Gas Turbine* conseguem reproduzir a influência de fatores externos, no desempenho das turbinas a gás.

A seguir, é apresentado na Figura B.4 um dos modelos de turbinas contidos na biblioteca *Gas Turbine* e na Figura B.5 a interface da biblioteca *Gas Turbine* com seus componentes.

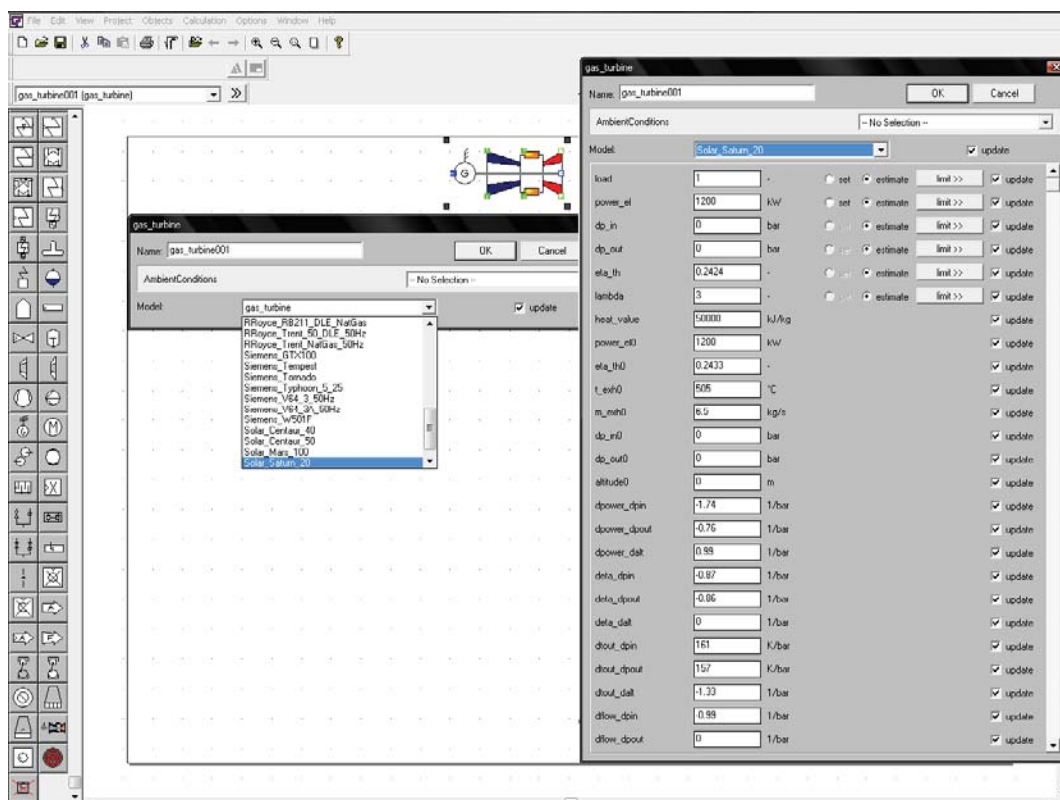


Figura B.4: Modelos de turbinas existentes na biblioteca *Gas Turbine*.

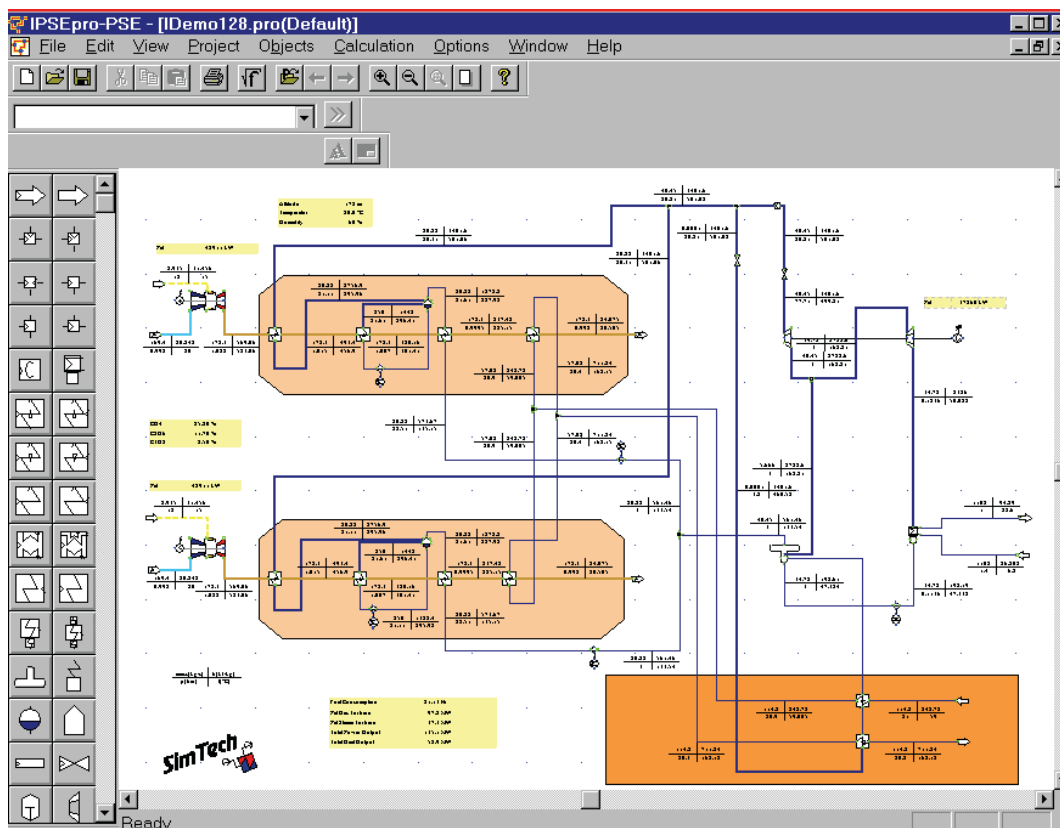


Figura B.5: Interface da biblioteca *Gas Turbine*.

B.3. Módulos do IPSEpro[®]

O *software* também é formado por diversos módulos que apresentam diferentes funções, os quais serão listados a seguir. Os módulos contidos no IPSEpro[®] são usados para:

- Calcular o balanço térmico e prever o desempenho do projeto;
- Estimar custos durante a concepção do projeto;
- Verificar e validar medidas durante os ensaios de aceitação;
- Monitorar e aperfeiçoar o desempenho de plantas térmicas;
- Planejar modificações e repotenciação de plantas térmicas existentes.

B.3.1. Módulo MDK

O módulo MDK (*Model Development Kit*) é um programa do IPSEpro[®] utilizado para construção de modelos de componentes ou para modificação de modelos existentes em sua biblioteca. Estes modelos, criados ou editados no MDK, representam componentes físicos através de equações matemáticas e numa linguagem própria (MDL - *Model Description Language*), permitindo que sistemas térmicos possam ser montados e simulados pelo PSE (*Process Simulation Environment*). A biblioteca existente no MDK possui diversos componentes físicos prontos e já modelados.

Há a possibilidade de serem incluídos novos componentes na estrutura de síntese de configurações a partir de comandos específicos, no módulo MDK; uma vez descritas as condições operacionais que se espera para o componente, um compilador adequado traduz as informações fornecidas em linguagem compatível

com o código de modo que possa ser considerado na análise. A Figura B.6 apresenta a interface do módulo MDK para um modelo de secador a gás construído.

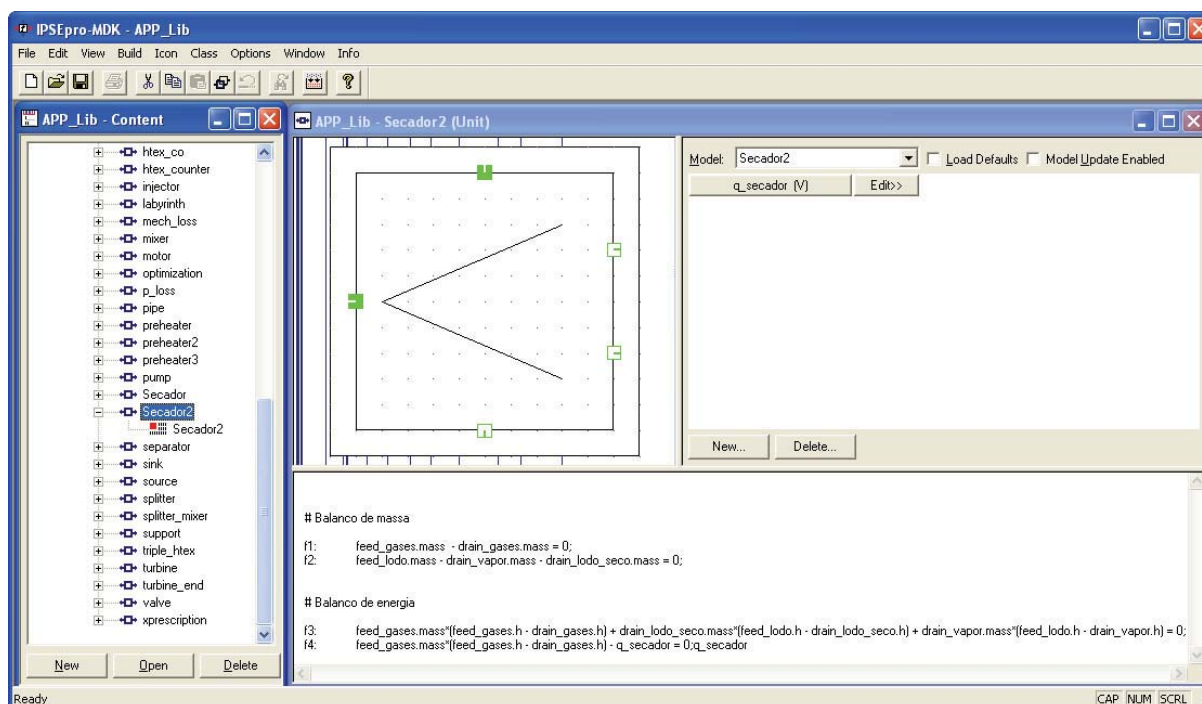


Figura B.6: Interface do Módulo MDK.

B.3.2. Módulo PSE

Com o módulo PSE o usuário seleciona os componentes requeridos no menu da biblioteca e os arranja de maneira apropriada. Todos os dados do processo são configurados diretamente na *flowsheet*. Os resultados são mostrados diretamente no esquema criado. Ao final da simulação, o PSE gera automaticamente um protocolo de saída, no qual são mostrados todos os parâmetros e variáveis do processo, bem como a situação de cada um deles: fornecido, calculado ou não-calculado e convergido ou não-convergado. No caso da existência de erros, a causa dos mesmos também são apresentadas nesse protocolo. Na Figura B.7 é apresentada a interface do módulo PSE para um modelo de planta térmica de ciclo combinado.

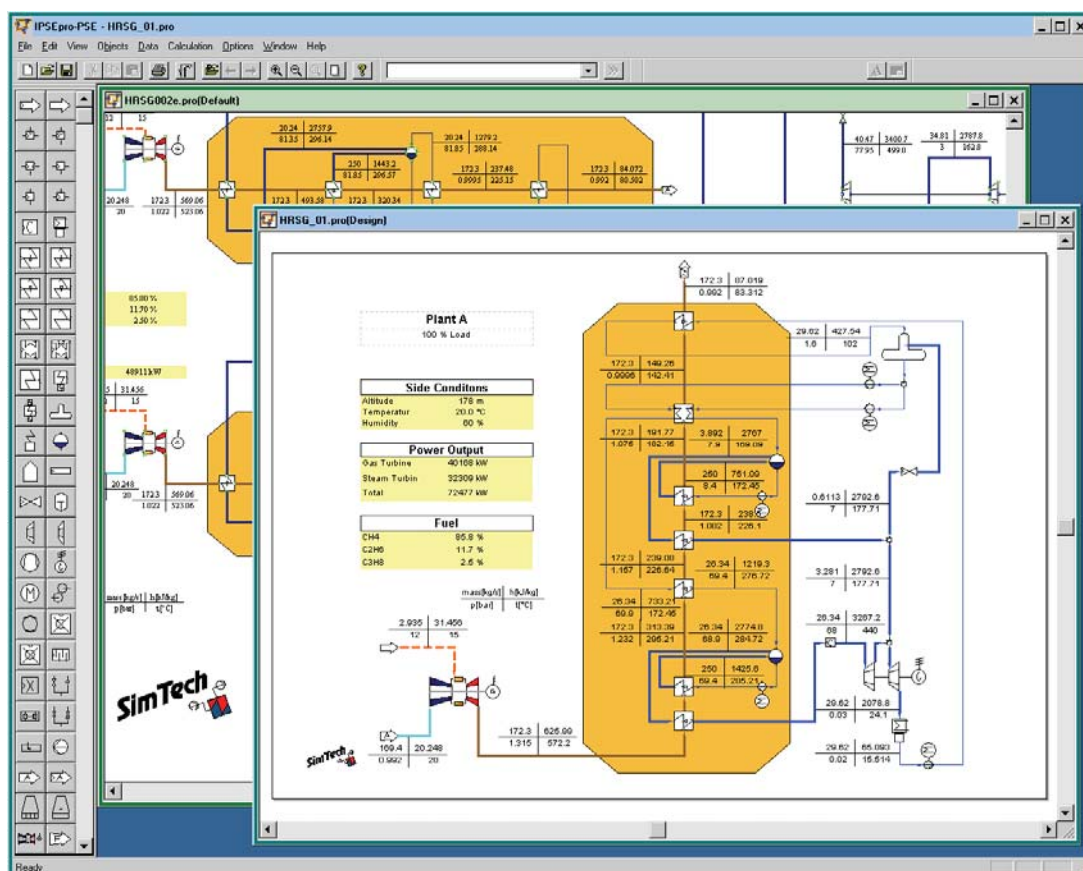


Figura B.7: Interface do Módulo PSE.

B.3.3. Módulo PSEExcel

O PSEExcel é um módulo da extensão que serve para integrar projetos de PSE com plantas do MS-Excel, sendo que a troca de dados pode ser feita em ambos os sentidos.

Os macros predefinidos suportam variações automáticas do parâmetro, assim a análise da sensibilidade pode ser feita para identificar como determinadas variáveis afetam resultados do cálculo (por exemplo: efeito da carga componente na eficiência do ciclo).

Anexo C – Dados de Alguns Equipamentos Utilizados nas Plantas

C.1. Turbina a Gás



Industrial/Utility Grade

Features

- Industrial Gas Turbine Package
- Compact, Integrated Package Providing Ease of Installation
- Factory Tested
- Multiple Fuel Capability
- Onskid Microprocessor-Control with Auto Sync Capability

Package Arrangement

Gas Turbine

- Saturn® 20 Industrial, Single-Shaft
- Axial Compressor – 8 Stages
- Annular Combustion Chamber
 - 12 Fuel Injectors
- Coatings
 - Compressor: Inorganic Aluminum
 - Turbine and Nozzle Blades: Precious Metal Diffusion Aluminide
- Velocity Vibration Transducers

Main Reduction Drive

- Epicyclic
 - 1800 or 1500 rpm
 - Acceleration Vibration Transducers

Generator

- Salient Pole, 3 Phase, 6 Wire, Wye Connected, Synchronous with Brushless Exciter
- Open Drip-Proof Construction
- Sleeve Bearings
- Velocity Vibration Transducers
- Solid-State Voltage Regulation with Permanent Magnet Generator
- NEMA Class H Insulation with H Rise
- Continuous Duty Rating

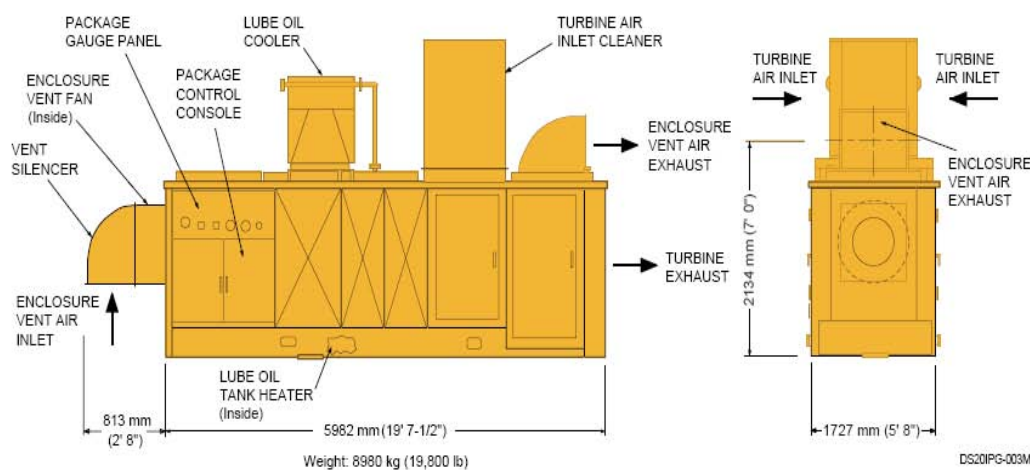
Package

- Steel Base Frame with Drip Pans
- Direct-Drive AC or Pneumatic Start System
- Natural Gas Fuel System
- Control System
 - Microprocessor-Based PLC
 - Generator Control
 - Vibration and Temperature Monitoring
 - Auto Synchronizing
- Integrated Lube Oil System
 - Turbine-Driven Lube Pump
 - AC Pre/Post Lube Pump
 - Air/Oil Cooler
 - Integral Lube Oil Tank
 - Lube Oil Filter
- Documentation
 - Drawings
 - Quality Control Data Book
 - Inspection and Test Plan
 - Test Reports
 - O&M Manuals
- Factory Testing of Turbine and Package
- Weatherproof Acoustic Enclosure

Optional Equipment/Services

- Generator Options:
 - Standby Duty Rating
 - Standard Voltages: 380, 415, 3300 50 Hz; 240, 480 2400, 4160 60 Hz

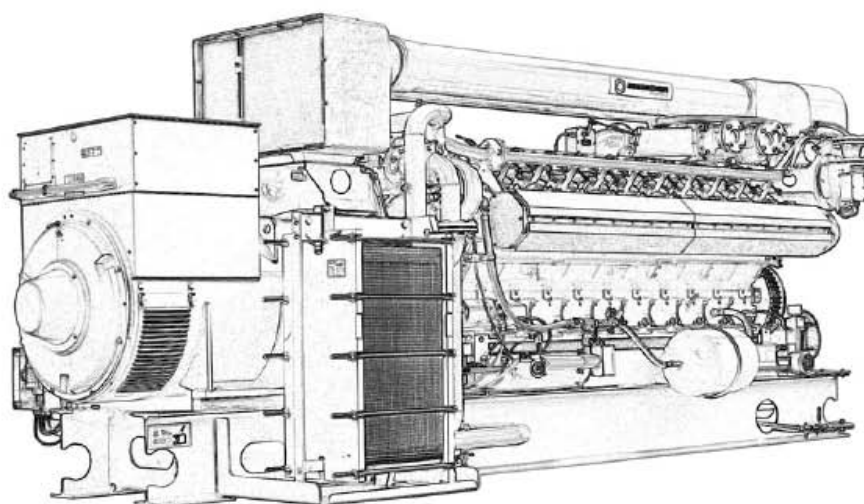
- Fuel Systems
 - Liquid
 - Dual (Gas/Liquid)
 - Water Injection for NOx Control
 - Alternate Fuels (such as naphtha, propane, low Btu)
- Lube Oil System
 - Water/Oil Lube Cooler
 - Electrostatic Demister
 - Lube Oil Tank Heater
- Control System
 - Remote Display/Control Terminal
 - Heat Recovery Application Interface
 - Serial Link Supervisory Interface
 - KW Control
 - KVAR/Power Factor Control
- Accessory Equipment
 - Turbine Cleaning System: On-Crank and On-line
 - Package Lifting Kit
- Ancillary Equipment: Various Air Inlet and Exhaust Systems
 - Inlet and Exhaust Silencers
 - Self-Cleaning or Prefilter/Barrier Air Inlet Filter
 - Inlet Evaporative Cooler
 - Inlet Chiller Coils
 - Ancillary Support Frame



C.2. Motor a Biogás



Especificação Técnica



JMS 320 GS-B.L
Biogás 1,060kW el.

JMS 320 GS-B.L
Biogás 1,060kW el.
Características do módulo de cogeração:

Potência eléctrica	kW el.	1,060
Potência térmica recuperável (180 °C)	kW	1,258
Energia entrada	kW	2,717
Consumo de gás com um PCI de 5 kWh/Nm³	Nm³/h	543
Rendimento eléctrico	%	39.0%
Rendimento térmico	%	46.3%
Rendimento total	%	85.3%
Calor a dissipar (circuito de B.T)	kW	33
Emissões:		
NOx < 500 mg/Nm³ (5% O2)		

Especificações técnicas do motor:

Tipo de motor		J 320 GS-C81
Configuração		V 70°
Número de cilindros		20
Diâmetro	mm	135
Curso	mm	170
Cilindrada	lit	48.67
Velocidade nominal	rpm	1,800
Velocidade média do êmbolo	m/s	10.2
Pressão média efectiva à potência e velocidade	bar	15.00
Relação de compressão	Epsilon	12.5
Potência nominal ISO ICFN	kW	1095
Consumo específico de combustível do motor	kWh/kWh	2.48
Consumo específico de óleo	g/kWh	0.30
Peso líquido	kg	5,000
Capacidade de óleo lubrificante	lit	370
Baseado no número de Metano	MZ	100

Parâmetros técnicos:

Condições standards de aplicação:	Segundo DIN-ISO 3046
	Segundo VDE 0530 REM com tolerâncias especificadas
Condições standard:	Pressão do ar: 1000 mbar ou 100 m acima do nível do mar
	Temperatura do ar: 25°C ou 298K
	Humidade relativa do ar: 30%

Redução da potência do motor: quando se instalam motores em alturas > 500m e/ou com temperatura de aspiração > 30°C, a diminuição de potência é calculada individualmente para cada projecto.

Qualidade do gás:	segundo TA 1000-0300
	Pressão do fluxo de gás: 80 - 200 (mbar)
	(Menor valor da pressão do gás por solicitação)

Máxima variação da pressão do gás: ±10%

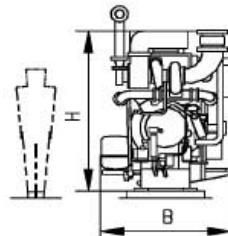
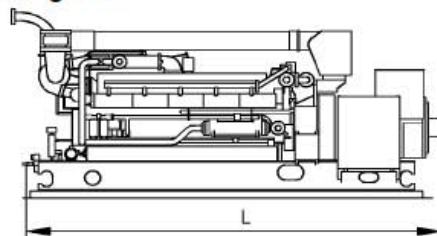
Informação adicional:

Nível de ruído do motor (valor médio a 1 m)	dB(A)	95
Nível de ruído dos gases de evacuação (a 1 m de d)	dB(A)	121
Caudal mássico húmido dos gases de evacuação	kg/h	5,869
Caudal volumétrico húmido dos gases de evacuação	Nm³/h	4,564
Contra-pressão máxima admitida nos gases de eva	mbar	60
Temperatura dos gases de evacuação a carga máx	°C [8]	509
Caudal mássico de ar para a combustão	kg/h	5,384
Caudal volumétrico de ar para a combustão	Nm³/h	4,165
Temperatura máxima da água de arrefecimento (à e	°C	60
Depressão máxima admissível de aspiração antes d	mbar	10
Temperatura de retorno	°C	60
Temperatura de saída	°C	90
Caudal de água quente	m³/h	36.1

Alternador:

Fabricante		STAMFORD
Tipo		HCI 634 K2
Tipo de potência	kVA	1,438
Rendimento com cos phi = 1,0	%	96.8%
Rendimento com cos phi = 0.8	%	95.7%
Potência efectiva nominal com o cos phi = 1,0	kW	1,060
Potência efectiva nominal com o cos phi = 0.8	kW	1,048
Frequência	Hz	60
Tensão	V	480
Classe de protecção		IP 23
Classe de isolamento		H
Velocidade	rpm	1,800
Massa	kg	2,591

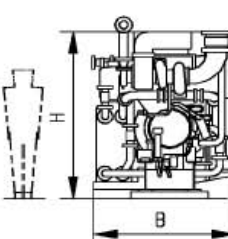
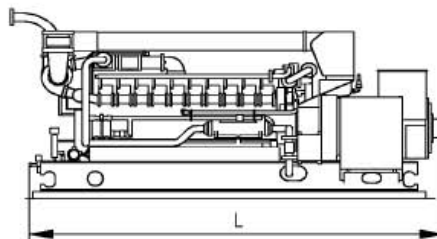
Todos os dados referem-se ao motor à carga máxima a temperaturas médias específicas e estão sujeitas a alteração
As instruções técnicas TA 1100-0110 "PARÂMETROS PARA MOTORES A GÁS GE Jenbacher" devem ser rigorosamente respeitadas

Grupo electrogéneo**Principais dimensões e pesos (Valor aproximado)**

Comprimento L	mm	5,700
Largura B	mm	1,700
Altura H	mm	2,300
Peso em vazio	kg	10,100
Peso bruto	kg	10,600

Ligações (no grupo electrogéneo)

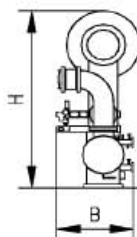
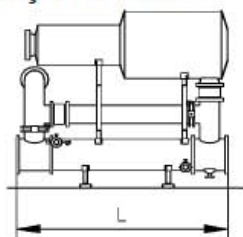
Entrada e saída da água de arrefecimento	DN/PN	80/10
Saída dos gases de evacuação	DN/PN	250/10
Gás combustível (na rampa de gás)	DN/PN	100/16
Ligação da água do arrefecedor:		
Circuito de baixa temperatura	DN/PN	65/10

Módulo**Principais dimensões e pesos (Valor aproximado)**

Comprimento L	mm	5,700
Largura B	mm	1,900
Altura H	mm	2,300
Peso em vazio	kg	10,600
Peso bruto	kg	11,100

Ligações (no módulo)

Entrada e saída de água quente	DN/PN	80/10
Saída dos gases de evacuação	DN/PN	250/10
Gás combustível (na rampa de gás)	DN/PN	100/16
Ligação da água do arrefecedor:		
Entrada/ saída de água do arrefecedor de baixa tem	DN/PN	65/10

Módulo de recuperação de calor**Principais dimensões e pesos (Valor aproximado)**

Largura B	mm	1,800
Altura H	mm	3,750
Comprimento L	mm	4,700

Ligações (no módulo de recuperação térmica)

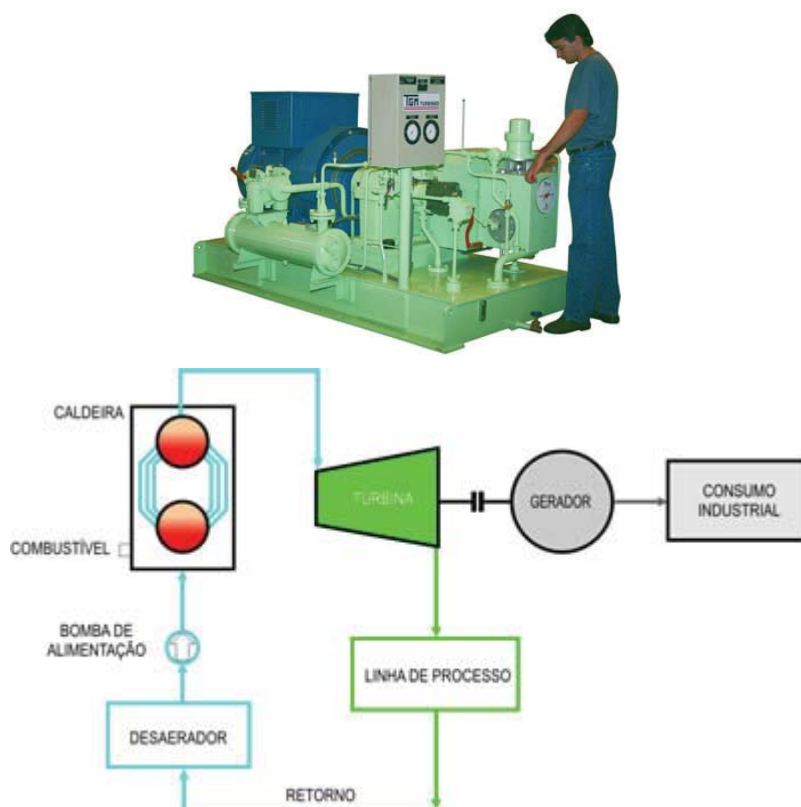
Entrada e saída de água quente	DN/PN	80/10
Saída dos gases de evacuação	DN/PN	250/10
Purga de condensados	DN/PN	50/10
Ligação de purga	1/2"	1/2"

C.3. Turbina a Vapor

➡ Baixa Pressão e Baixa Temperatura: TG | 22bar 320°C

As micro turbinas a vapor TG320 são projetadas para acionar pequenos geradores de energia elétrica e são instaladas tanto em geração isolada quanto em paralelo com a rede elétrica.

São ideais para aproveitamento de pequenas vazões e baixas pressões de vapor, mesmo na condição saturado, proveniente de caldeiras de biomassa, óleo, gás, resíduos e etc.



➡ Características

	Modelo	Potência (máx)	Rotação rpm	Condição de Vapor (máx)		
		kW		bar	°C	bar
Técnicas	TG320	300	10.000/1.800	22	320	6

➡ Média Pressão e Média Temperatura: TS | 45bar 450°C

Estes modelos de turbinas são de baixa potência, aplicáveis em acionamentos de bombas, ventiladores, exaustores e também em geradores de microcentrais termoelétricas com potência de 20 kW a 1.500 kW.

A turbina tipo TS500, série especial, foi desenvolvida para partidas a frio (emergência), sempre que se requer entrada imediata da turbina em operação. O suprimento de água de alimentação das caldeiras deve ser garantido sem riscos e danos irreversíveis.

Nessas condições, a TS500 entra em ação com o sistema misto de lubrificação (óleo sob pressão + anéis pescadores). A carcaça é equipada com purgadores automáticos para assegurar as drenagens requeridas e o regulador de velocidades é mecânico.

Este modelo de turbina é a melhor e mais barata solução disponível no mercado.



➡ Características Técnicas

Modelo	Potência (máx)	Rotação rpm	Condição de Vapor (máx)		
	kW		bar	°C	bar
TS2000	2.000	6.000	45	450	12
TS1000	1.600	6.000	45	450	12
TS500	900	6.000	45	450	4
TB50	30	3.600	45	450	3

C.4. Secador de Lodo



[Mapa do site](#)
[Contato](#)
[Idioma](#)

» Tecnologias em Processos e Meio Ambiente » **Secador de Esteira**

Secador de Esteira

Flexível e utilizado com baixo nível de energia

O sistema patenteado Andritz 3Sys AG – Sistema com Secador de Esteira (BDS) é caracterizado por sua flexibilidade e escolha em fontes de energia, em especial gases de exaustão de baixa temperatura. Pode ser utilizado para a secagem dos mais diversos produtos tais como lodos municipais e industriais, esterco, biomassa, assim como lodos municipais pré-tratados, etc.

Destaques do Sistema

- Capacidades de evaporação de até 10 t/h por linha >> menos linhas de produção, menos manutenção, menos custo.
- Para capacidades de evaporação acima de 3 t/h, a construção do secador prevê carcaça em concreto >> robustez, sem corrosão, sem necessidade de outro prédio.
- Baixo custo e de fácil manutenção pelo próprio conceito técnico, com fácil acesso a todos os elementos.
- Simples operação com partidas e paradas rápidas.
- Atende plenamente ao regulamento de segurança ATEX.



Sistema BDS em Nufri, Espanha

- Condição ideal para utilização de fontes de energia aproveitáveis
- Resfriamento de produto integrado na secagem
- Alta eficiência térmica devido à altas taxas de reciclagem do ar de secagem
- Facilmente adaptável à tipos diferentes de lodos / misturas, provenientes de várias ETE's.

Mediante a instalação de um sistema de recuperação de calor opcional, se consegue ainda outras vantagens adicionais:

- Nenhum custo de energia térmica, com redução significativa dos custos operacionais
- Solução sustentável imune à variações futuras no custo da energia, economizando ainda fonte primária de energia.
- Conceito compatível com o meio ambiente, reduzindo consideravelmente o efeito estufa
- Condições ideais para aproveitamento de fontes de calor recicladas como gases de exaustão, vapor, água quente, etc, provenientes de plantas de co-geração, plantas de incineração de resíduos, termoeletricas e outros processos.



*Vista da zona de descarga de produto,
durante operação normal*

Fluxo do produto

Lodo desaguado mecanicamente e lodo seco são conduzidos a um alimentador/misturador do tipo helicoidal. O lodo misturado (aprox. 60% TS) é distribuído sobre toda a superfície da esteira do secador através do dosador / distribuidor e transportador helicoidal. Uma camada homogênea de produto (espessura de 4 a 15 cm), ajustada na largura da esteira, é conseguida pelo transportador helicoidal e pelo raspador de altura ajustável.

O lodo misturado é aquecido e seco pelo ar de secagem reciclado.

Após a passagem pela zona de secagem, o produto terá mais de 90% de teor de sólidos (TS) é então resfriado na zona de resfriamento. No final da esteira, o produto seco é descarregado em um transportador helicoidal parte para utilização final e parte para a mistura inicial.



Instalação BDS em Wohlen, Suíça

Ar de Secagem

O ar de secagem é aquecido para 120 ~ 150 °C. O ar quente flui através da camada de produto absorvendo e transportando a umidade evaporada do produto. Para alcançar uma eficiência térmica ideal, o secador opera com altas taxas de reciclagem de ar. Dessa maneira, uma grande quantidade de ar é conduzida de volta aos trocadores de calor para re-aquecimento. Parte do ar circulado é transferido para o condensador e o lavador químico, onde poluentes ácidos e cáusticos são removidos. Todos os componentes do secador operam com pressão negativa, prevenindo a emissão de pó e odor.

Geração de calor

O ar de secagem pode ser aquecido diretamente através de gases quentes obtidos na combustão do gás natural ou indiretamente em trocadores de calor, utilizando calor reaproveitado de várias fontes, tais como gases de exaustão de fornos de cimento, plantas de conversão de resíduos em energia, turbinas à gás ou motores de combustão à gás de termoeletrônicas ou ainda água quente de motores à gás. Os gases quentes saindo do queimador são misturados diretamente com o ar de secagem e dirigidos ao secador. No caso de re-utilização de fontes de energia, o ar de secagem

é aquecido indiretamente em trocadores de calor que são posicionados na parte superior do secador. O ar de secagem passa pela camada de lodo úmido resfriando novamente. A umidade evaporada é condensada no condensador enquanto o ar de exaustão é limpo em lavadores.

Os ventiladores são posicionados após os componentes do secador em contato com o lodo. O sistema opera com pressão negativa e assim nem pó ou odor é lançado no ambiente.

C.5. Bomba d'água

Bombas E/ EP

Re-autoeskorvantes



APRESENTAÇÃO DO PRODUTO

APLICAÇÕES:

De uma diversificada gama de aplicações, por possuir características e concepções de projeto diferenciadas, as bombas re-autoeskorvantes IMBIL concentram-se em estações elevatórias de tratamentos de esgoto, e ainda cumpre seu fundamental papel como o coração de vários sistemas de bombeamento como, por exemplo em:

- Industrias Química
- Estações de tratamento de efluentes químicos
- Massa de papel e celulose
- Petroquímicas
- Captação de água bruta
- Adutoras de água para abastecimento público
- Agricultura
- Sistemas de Arrefecimento Industrial

Seus diferenciais oferecem grandes vantagens em relação às bombas centrífugas convencionais, o primeiro reflete sua própria designação: A não necessidade de ser eskorvada em todo início de funcionamento, mesmo que a tubulação de sucção se encontre sem fluido.

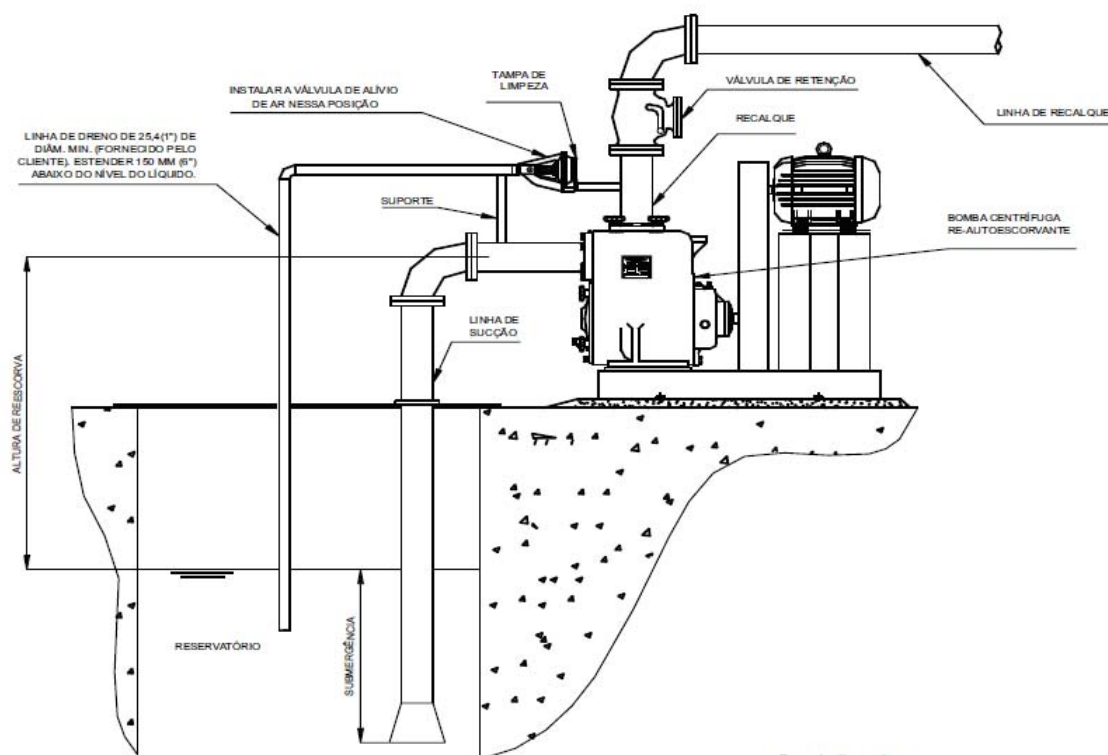
- Fluidos contendo sólidos com diâmetros até 3"
- Massa de papel
- Esgoto
- Efluentes Industriais
- Transporte e pulverização de líquidos fertilizantes e esterco animal
- Líquidos de lavagem

São alguns dos fluidos que as bombas re-autoeskorvantes IMBIL estão bombeando nas mais diversas instalações.



Bombas E/ EP

Re-autoeskorvantes

**DESENHO DE INSTALAÇÃO**

Desenho ilustrativo

C.6. Trocadores de calor



INFORMAÇÕES TÉCNICAS

Permutador de calor casco & tubos – Rev 3 - fev/2004

PERMUTADORES DE CALOR STANDARD MODELO BEM



A linha de Permutadores standard TroCalor, abrange 31 modelos que variam desde 0,53 a 10,52 m² de área de troca. Os números de passes no lado dos tubos variam de 2 ou 4 de acordo com a necessidade da aplicação, os cabeçotes de ferro fundido são facilmente removíveis para proporcionar uma manutenção rápida, os espelhos são fixos.

Estes modelos são particularmente indicados para resfriamento de óleo em máquinas injetoras, motores marítimos, unidades hidráulicas, motores estacionários, máquinas-ferramenta, resfriamento de água com água, etc.

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Casco confeccionado em com tubo preto de aço carbono.

Chapas defletoras (chicanas) confeccionadas em aço carbono galvanizado, garantem a orientação e circulação do fluido em regime turbulento, dando um máximo de eficiência ao equipamento, os furos das chicanas são punçoados em máquina CNC, de maneira a minimizar o bay-pass entre o tubo e o furo, proporcionando um melhor desempenho térmico.

Espelhos de aço carbono, aonde todos os furos são feitos dentro da tolerância permitida pela norma TEMA, mantendo assim um perfeito ajuste com os tubos na hora da expansão com o mandril.

Tubos lisos de cobre, são fixados ao espelho por mandrilamento com controlador de torque automático, evitando desta maneira que a parede do tubo sofra uma redução de espessura maior do que a permitida pela norma de fabricação.

Cabeçotes em aço carbono, são disponíveis em 2 ou 4 passes, podendo também ser fornecido com anodo de zinco para proteção contra corrosão galvânica, quando solicitado.

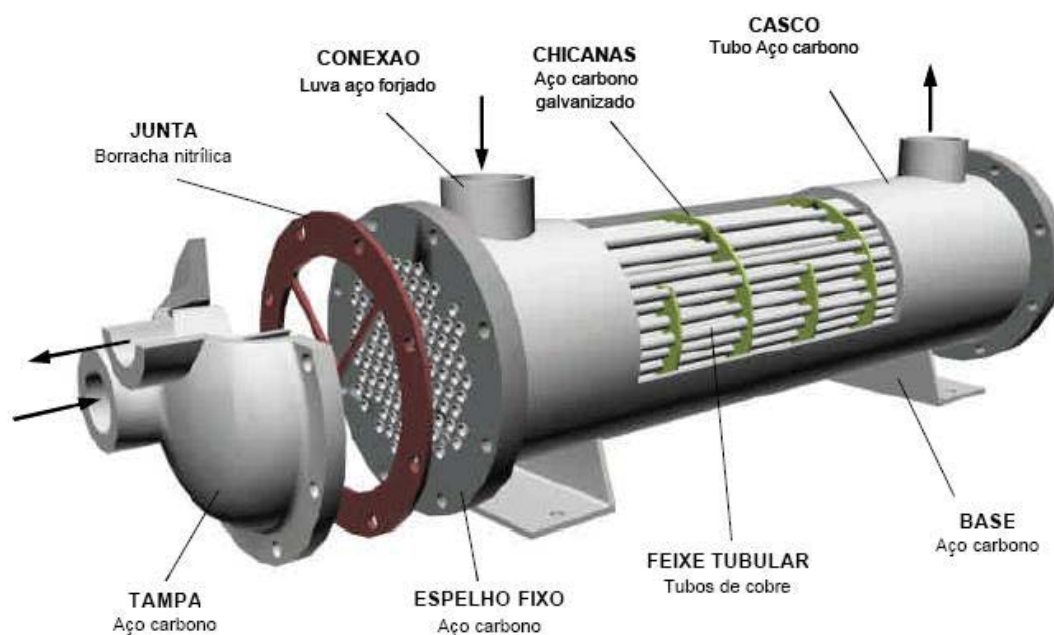
Os trocadores após limpeza externa, recebem como proteção anticorrosiva duas demãos de primer epóxi óxido de ferro, e no interior das tampas duas demãos com epoxi alcatrão de hulha.

Toda as fases de fabricação dos permutadores são acompanhadas por profissionais altamente especializados, conferindo assim nossa garantia da qualidade desde o recebimento da matéria prima, fabricação, testes e entrega do material junto ao cliente.

APLICAÇÕES

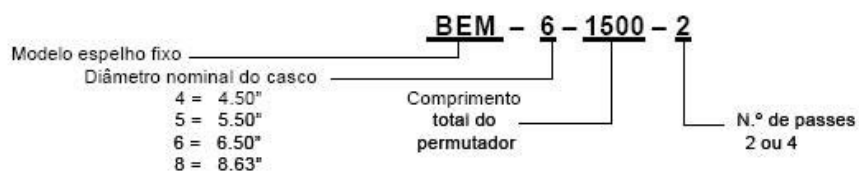
Esta linha de permutadores é recomendada para Troca de Calor entre: Óleo/Água; Água/Água; Água/Vapor; Vapor/Líquido; etc.

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS STANDARD – SÉRIE BEM



IDENTIFICAÇÃO

Exemplo:



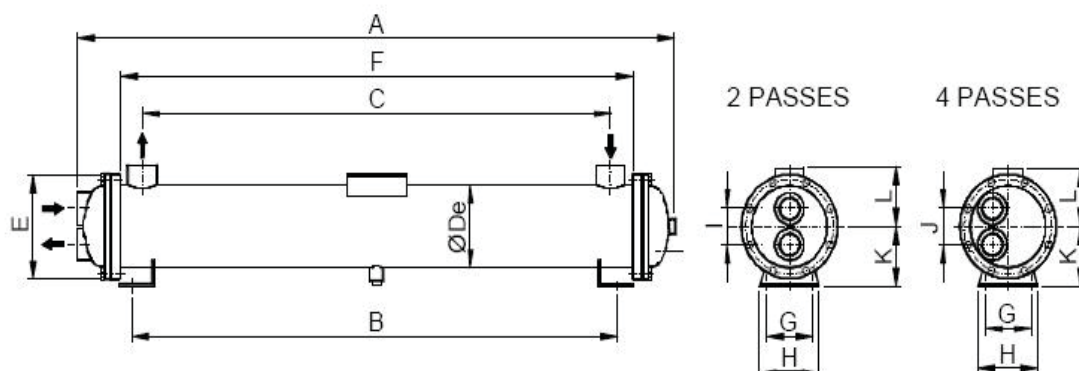
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO STANDARD E CONDIÇÃO DE PROJETO

Descrição	Material	Condição de projeto
Casco	Tubo de aço carbono	Pressão máx. trab. casco – 21 kgf/cm ²
Tubos	Cobre	
Chicanas	Aço carbono galvanizado	Pressão máx. trab. tubos – 15 kgf/cm ²
Tampas	Aço carbono	
Bases	Aço carbono	Temperatura máx. trabalho – 150° C
Espelhos	Aço carbono	
Juntas	Borracha nitrílica	

Teste hidrostático em todas as unidades com pressão de 21 kgf/cm².

DADOS DIMENSIONAIS STANDARD – MODELO BEM

Permutador de calor com 2 ou 4 passes nos tubos e espelhos fixos.



Modelo BEM	Área de troca m²	O H I C A N A S	N.º de Tubos / Ø	Dimensões em milímetros												Conexões			Vazão de óleo (l/h)		Vazão de água 2 passes (l/h)		Vazão de água 4 passes (l/h)	
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Corpo	Tampa 2 P	Tampa 4 P	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
4-500	0,53	3	44 / 3/8"	500	270	270	114	180	410	100	126	66	66	86	96	1"	1"	3/4"	1000	2300	3200	7820	1600	3880
4-800	0,86	5	44 / 3/8"	800	370	370	114	180	610	100	126	66	66	86	96	1"	1"	3/4"	1080	2460	3200	7820	1600	3880
4-750	0,86	5	44 / 3/8"	750	320	320	114	180	580	100	126	66	66	86	96	1"	1"	3/4"	1400	3400	3200	7820	1600	3880
4-1000	1,18	7	44 / 3/8"	1000	470	470	114	180	810	100	126	66	66	86	96	1"	1"	3/4"	1600	3800	3200	7820	1600	3880
4-1800	2,21	7	44 / 3/8"	1800	1560	1560	114	180	1890	100	126	66	66	86	96	1"	1"	3/4"	1800	3800	3200	7820	1600	3880
6-500	0,80	3	78 / 3/8"	500	230	230	140	186	380	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	2000	4900	6600	13880	2800	6840
6-800	1,02	3	78 / 3/8"	800	330	330	140	186	480	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	2200	5300	6600	13880	2800	6840
6-750	1,36	3	78 / 3/8"	750	480	480	140	186	610	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	2400	5800	6600	13880	2800	6840
6-1000	1,83	5	78 / 3/8"	1000	730	730	140	186	880	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	2600	6000	6600	13880	2800	6840
6-1250	2,50	5	78 / 3/8"	1250	980	980	140	186	1110	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	2700	6200	6600	13880	2800	6840
6-1600	3,07	7	78 / 3/8"	1600	1230	1230	140	186	1380	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	3200	7300	6600	13880	2800	6840
6-1750	3,84	7	78 / 3/8"	1750	1480	1480	140	186	1610	136	170	76	76	115	115	1.1/2"	1.1/2"	1"	3700	8800	6600	13880	2800	6840
8-750	1,97	3	110 / 3/8"	750	480	480	186	210	610	170	216	76	76	130	125	1.1/2"	1.1/2"	1.1/2"	2700	6000	7820	19800	3880	8900
8-1000	2,80	5	110 / 3/8"	1000	710	710	186	210	880	170	216	76	76	130	125	1.1/2"	1.1/2"	1.1/2"	3000	7000	7820	19800	3880	8900
8-1250	3,82	5	110 / 3/8"	1250	960	960	186	210	1110	170	216	76	76	130	125	1.1/2"	1.1/2"	1.1/2"	3200	7100	7820	19800	3880	8900
8-1600	4,44	7	110 / 3/8"	1600	1210	1210	186	210	1380	170	216	76	76	130	125	1.1/2"	1.1/2"	1.1/2"	3300	7300	7820	19800	3880	8900
8-1750	5,27	7	110 / 3/8"	1750	1480	1480	186	210	1610	170	216	76	76	130	125	1.1/2"	1.1/2"	1.1/2"	3700	8800	7820	19800	3880	8900
8-2000	6,08	7	110 / 3/8"	2000	1710	1710	186	210	1880	170	216	76	76	130	125	1.1/2"	1.1/2"	1.1/2"	4300	10100	7820	19800	3880	8900
8-750	3,48	3	188 / 3/8"	750	480	480	218	310	630	180	260	110	110	160	165	2"	2"	2"	3000	9870	13540	33840	6770	16820
8-1000	4,88	5	188 / 3/8"	1000	747	747	218	310	880	180	260	110	110	160	165	2"	2"	2"	3800	10730	13540	33840	6770	16820
8-1250	6,30	5	188 / 3/8"	1250	997	997	218	310	1130	180	260	110	110	160	165	2"	2"	2"	3800	11270	13540	33840	6770	16820
8-1600	7,70	7	188 / 3/8"	1600	1247	1247	218	310	1380	180	260	110	110	160	165	2"	2"	2"	4050	11580	13540	33840	6770	16820
8-1750	9,11	7	188 / 3/8"	1750	1487	1487	218	310	1630	180	260	110	110	160	165	2"	2"	2"	4800	13650	13540	33840	6770	16820
8-2000	10,52	7	188 / 3/8"	2000	1747	1747	218	310	1880	180	260	110	110	160	165	2"	2"	2"	5800	16100	13540	33840	6770	16820

Notas:

- 1) Recomendamos que sejam utilizadas as vazões de água da tabela, afim de evitar problemas de incrustações, erosão excessiva ou perda de carga elevada, antes do período normal de manutenção do permutador. Na tubulação do feixe, em caso de utilização da vazão mínima da tabela, consegue-se uma velocidade de escoamento de 0,90 m/s, que evitará um rápido acúmulo de crostas na parede da tubulação, já no caso do uso da vazão máxima tabelada, garantimos uma velocidade de 2,20 m/s, que para uma tubulação de cobre é a velocidade máxima indicada afim de evitar a erosão prematura da sua parede.
- 2) Em todos os modelos são usados tubos com Ø 3/8" e espessura de parede de 1,0 mm.
- 3) As quedas de pressões nos trocadores, estão limitadas ao máximo de 10 PSI (0,70 kgf/cm²), considerando o uso das vazões indicadas na tabela para cada modelo.

C.7. Condensador



INFORMAÇÕES TÉCNICAS

Condensadores Tipo Casco e Tubos

Revisão 02 – março / 2005

CONDENSADORES STANDARD DO TIPO CASCO E TUBOS.



Foto ilustrativa

As principais aplicações dos Condensadores Compactos TCT **Casco e tubos** da linha standard **TroCalor** são em circuitos de refrigeração e ar condicionados resfriados à água, com capacidades que variam de 1 TR (3.600 kcal/h) à 40 TR (144.000 kcal/h) (para capacidades maiores, consultar nosso departamento de engenharia). Compactos porque são fabricados com tubos Aletados do tipo TRUFFIN aletas baixas de 19 fios/polegada, que possuem alta capacidade de troca térmica devido a extensão de sua superfície de troca, proporcionando um aparelho menor, porém com alta performance, podem ser utilizados em circuitos com fluido refrigerante do tipo R-12, R-22 e R-502.

CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS:

TUBOS

São usados Tubos Aletados de $\varnothing$ 5/8" do tipo TRUFFIN aletas baixas com 19 fios / polegada, em cobre liga 122 ou em liga de Cobre-níquel 90-10 para uso NAVAL/OFFSHORE, os tubos são fixados ao espelho através de expansão mecânica (mandrilhamento) com controle de torque automático.

Todos os modelos são dimensionados com vários passes no lado dos tubos, sendo a quantidade de passes calculada em função da velocidade de escoamento da água no interior dos tubos, para se obter um ótimo coeficiente de transmissão de calor e uma baixa perda de carga no lado da água de condensação.

BASE DE SUSTENTAÇÃO

Fabricada em perfil de aço carbono estrutural.

ESPELHOS FIXOS

Confeccionados em chapa de aço carbono ou Latão Naval para uso NAVAL/OFFSHORE, dimensionados dentro nas normas, com seus furos calibrados e ranhurados, assegurando uma perfeita vedação para a expansão dos tubos.

CABEÇOTES REMOVÍVEIS

São confeccionados em ferro fundido cinzento com acabamento interno com tinta epóxi alcatrão de hulha ou em bronze para uso NAVAL/OFFSHORE, sua fácil remoção proporciona agilidade na limpeza e manutenção do equipamento.

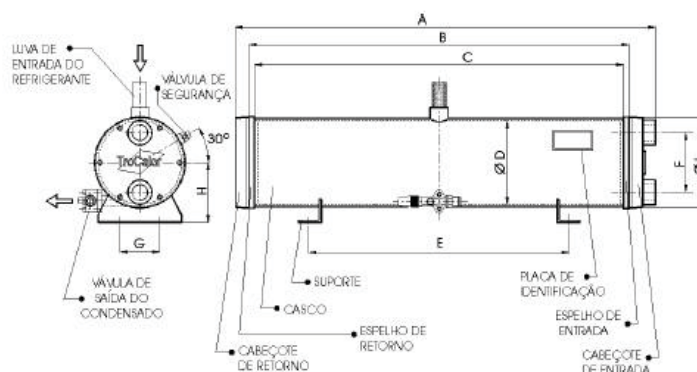
CARCAÇA

Construída com chapa de Aço Carbono, dimensionadas dentro das normas exigidas para vasos de pressão, com costura longitudinal executada com solda elétrica pelo processo MAG.

TESTES:

Os condensadores são submetidos a teste pneumático com nitrogênio no lado do gás (casco), e teste hidrostático com água no lado dos tubos, sendo os mesmos executados dentro das condições de projeto e das normas para vaso de pressão.

DADOS DIMENSIONAIS DOS CONDENSADORES STANDARD TROCALOR



Modelo TCT	Capacido Nominal Kcal/h	Área de troça (m²)	N.º tubos / passes	Vazão mínima p/ Δ T 5°C (m³)	Conexões em Pol.			Dimensões em mm										Perda de Carga mCA	Peso vazio	
					Refrigerante		Água													
					Entrada p/ solda	Saída rosca SAE e p/ solda	Entrada/ saída rosca SSP	A	B	C	ØD	E	F	G	H	ØI				
1	3.600	0,75	24 / 6	0,72	1/2"	válvula Tanque latão	3/8" SAE	3/4"	280	220	180	175	170	120	115	130	195	0,35	25	
2	7.200	1,50	24 / 6	1,44	1/2"		3/8" SAE	3/4"	490	430	390	175	270	120	115	130	195	1,10	27	
3	10.800	2,27	24 / 6	2,16	3/4"		1/2" SAE	3/4"	595	500	460	175	300	120	115	130	195	1,25	30	
4	12.500	2,63	36 / 6	2,88	3/4"		1/2" SAE	1"	700	640	600	200	410	150	150	160	220	1,35	35	
5	18.000	3,79	36 / 6	3,60	1.1/8"		5/8" SAE	1"	805	710	670	200	440	150	150	160	220	2,10	40	
7,5	27.000	5,31	48 / 6	5,40	1.1/8"		5/8" SAE	1.1/2"	850	750	710	230	470	165	180	175	250	3,80	80	
10	36.000	7,60	48 / 6	7,20	1.1/2"		3/4" SAE	1.1/2"	1.160	1.060	1.020	230	720	165	180	175	250	5,65	93	
15	54.000	10,90	48 / 6	10,80	1.1/2"		3/4" SAE	1.1/2"	1.625	1.525	1.485	230	1.085	165	180	175	250	4,35	130	
20	72.000	14,86	80 / 4	14,40	2"		Válvula de Serviço latão	7/8" solda	2.1/2"	1.355	1.245	1.205	290	805	200	195	220	310	1,90	
25	90.000	18,80	80 / 4	18,00	2"			1.3/8" solda	2.1/2"	1.675	1.575	1.535	290	935	200	195	220	310	2,20	
30	108.000	21,70	80 / 4	21,60	2.1/2"	1.3/8" solda		2.1/2"	1.920	1.820	1.780	290	1.120	200	195	220	310	2,50		
40	144.000	28,50	80 / 4	28,80	3"	1.5/8" solda		2.1/2"	2.485	2.380	2.340	290	1.645	200	195	220	310	2,90		

SELEÇÃO DO CONDENSADOR

CONDIÇÕES DE CÁLCULO

Temperatura de Condensação: 40°C

Temperatura de Entrada da Água: 27°C

Dados Necessários: Carga Frigorífica e Temperatura de Evaporação.

- Válvula na saída do refrigerante tipo Tanque c/ rosca SAE nos modelos standard TCT-1 até TCT-7,5.
- Válvula na saída do refrigerante tipo Serviço com rosca SAE nos modelos standard TCT-10 até TCT-15.
- Válvula na saída do refrigerante tipo Serviço p/ soldar nos modelos standard TCT-15 até TCT-40.

TEMPERATURA DE EVAPORAÇÃO (°C)										
-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10
COEFICIENTE DE CORREÇÃO										
1.53	1.49	1.44	1.39	1.35	1.30	1.27	1.24	1.21	1.19	1.17

Exemplo: Para uma Carga Frigorífica = 3.710 kcal/h e Temp. Evaporação = -5°C

$$3.710 \text{ kcal/h} \times 1.24 = 4.600 \text{ kcal/h}$$

Localizar no diagrama 4.600 kcal/h, o que corresponde ao condensador TCT-1, com vazão de 1.110 l/h

Obs.: As especificações e medidas deste catálogo estão sujeitas a alterações sem aviso prévio.