

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Sergio Alencar de Souza

**APLICAÇÃO DE TERMOECONOMIA NA
ANÁLISE DE UM PROCESSO INDUSTRIAL DE
AQUECIMENTO DE REATORES QUÍMICOS**

Taubaté – SP

2010

Sergio Alencar de Souza

**APLICAÇÃO DE TERMOECONOMIA NA
ANÁLISE DE UM PROCESSO INDUSTRIAL DE
AQUECIMENTO DE REATORES QUÍMICOS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico (Energia)

Orientador: Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas

Taubaté – SP

2010

S729a Souza, Sergio Alencar de.
Aplicação de termoeconomia na análise de um
processo industrial de aquecimento de reatores químicos./
Sergio Alencar de Souza. – Taubaté: Unitau, 2010.

84 f. :il;30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté.
Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Mestrado em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Wendell de Queiróz Lamas

1. Modelo Termoeconômico. 2. Gás de efeito estufa. 3.
Aquecimento solar. I. Universidade de Taubaté. Departamento
de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 628

SERGIO ALENCAR DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE TERMOCONOMIA NA ANÁLISE DE UM PROCESSO
INDUSTRIAL DE AQUECIMENTO DE REATORES QUÍMICOS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Projeto Mecânico (Energia)

Orientador: Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. José Rui Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Universidade Estadual Paulista

Assinatura _____

SOUZA, S. A. **Aplicação de termoeconomia na análise de um processo industrial de aquecimento de reatores químicos**. 2010. 84f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté.

RESUMO

Alinhado à constante busca por melhor desempenho ambiental por parte da indústria com a aplicação dos conceitos de eficiência energética, proporcionando maior competitividade devido à otimização de recursos, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar os possíveis impactos ambientais positivos, somados aos ganhos econômicos produzidos pela redução de despesas com energia, por meio da aplicação do aquecimento solar de água como alternativa para a redução do consumo de gás natural em uma planta industrial do setor químico, onde as operações de transformação de matérias primas em produtos aptos para o posterior acondicionamento em frascos são realizadas em reatores químicos, tendo essa transformação grande dependência do controle da variável temperatura. Assim sendo, a proposta do presente trabalho consiste basicamente em pré-aquecer a água de reposição do sistema responsável por manter os diversos reatores de fabricação de uma unidade industrial de produtos de higiene pessoal sob temperatura controlada, interferindo positivamente na matriz energética empregada por essa indústria. Utilizando-se no desenvolvimento deste trabalho modelos termoeconômicos e protocolos para quantificação de gases de efeito estufa reconhecidos pelo IPCC (*International Panel on Climate Change*), demonstra-se a evolução de desempenho ambiental obtida pela aplicação do pré-aquecimento da água, possibilitando a redução do consumo de combustíveis fósseis, nesse caso o gás natural, em cerca de 60.000 m³/ano e, conseqüentemente, reduzindo a emissão atmosférica de um dos gases responsáveis pela intensificação do efeito estufa, o dióxido de carbono, em cerca de 150 tCO₂e/ano, representando ainda uma redução anual no consumo de energia de aproximadamente 700.000 kWh. Além da evolução no desempenho ambiental do sistema de geração de calor, estima-se que o investimento seja recuperado entre três e cinco anos.

Palavras-chave: Aquecimento solar, eficiência ecológica, gases de efeito estufa, modelos termoeconômicos.

SOUZA, S. A. **Thermoeconomic analysis applied to heating industrial process in chemical reactors**. 2010. 84p.. M.Sc. thesis (Master's Degree in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering University of Taubaté, Taubaté, Brazil.

ABSTRACT

In line with the constant search for better environmental performance on the part of industries with the application of energetic efficiency concept, affording greater competition due to the resource optimization, this work has as its aim to evaluate the possible environmental impacts, adding the economic gains produced by the expense reduction with energy by the application of solar water heating as an alternative for the reduction of natural gas consumption in a chemical industrial plant, where the operations to transform raw materials into suitable products for filling and packing assembly line are carried out in chemical reactors, having this mentioned transformation a great dependency on the temperature control. Hence, the basic proposal of this work is pre-heating the make-up water from the installation responsible for keeping under controlled temperature the several mixing reactors of an industrial plant for personal hygiene products, thus positively interfering in the energetic source used by such industry. Applying thermoeconomic models and protocols for quantifications of greenhouse effect gases recognized by IPCC (International Panel on Climate Change) on the development of this work, the environmental performance evolution is demonstrated by the advantage of water pre-heating application, which makes it possible the reduction of fossil fuels consumption, represented by natural gas in this case, at about 60,000 cubic meters per year, thus reducing the atmospheric emission of one of the most gases which are responsible for the greenhouse effect intensification, the carbon dioxide, at about 150 tCO₂e per year, additionally representing an annual energy reduction of approximately 700,000 kWh. In addition to the environmental performance evolution on the heating generation system, it's estimated that the investment might be recovered within a three and five year period.

Keywords: Solar energy heating, ecological efficiency, greenhouse effect gases, thermoeconomic models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Ilustração de volume de controle para um escoamento em regime permanente	24
Figura 2	- Processo quase-estático à pressão constante	25
Figura 3	- Ilustração de volume de controle entre um sistema e o ambiente	29
Figura 4	- Fluxograma geral do setor de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos	32
Figura 5	- Visão global do fluxo de produção	34
Figura 6	- Distribuição do consumo de energia elétrica e gás natural em uma indústria do setor de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos	35
Figura 7	- Fluxograma de produção de vapor em uma indústria do setor de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos	35
Figura 8	- Foto de duas colunas com resinas iônicas que promovem o abrandamento da água bruta	36
Figura 9	- Foto de uma área de produção típica da indústria de cosméticos, com seus reatores químicos	37
Figura 10	- Fluxograma do processo de produção de vapor e aquecimento de reatores com identificação das unidades e correntes	40
Figura 11	- Diagrama funcional do processo de produção de vapor e aquecimento de reatores	41
Figura 12	- Diagrama de custos do sistema de produção de vapor para aquecimento de reator químico (PVAR)	47
Figura 13	- Custos para produção de vapor do sistema PVAR	52
Figura 14	- Custos da água abrandada do sistema PVAR	53
Figura 15	- Custos de manufatura exergético do sistema PVAR	53
Figura 16	Receita anual do sistema para os períodos observados	55
Figura 17	- Princípio de funcionamento do economizador para caldeiras	59

Figura 18	- Foto de um modelo de economizador para uso em caldeiras, fabricado pela Aalborg Industries	60
Figura 19	- Foto de um modelo de economizador para uso em caldeiras, fabricado pela Heatmec Indústria Metalúrgica Ltda	60
Figura 20	- Fluxograma da instalação proposta para pré-aquecimento por sistema solar	61
Figura 21	- Fluxograma do processo de produção de vapor e aquecimento de reatores contendo as unidades propostas	63
Figura 22	- Custos para produção de vapor do sistema PVAR no cenário 2	72
Figura 23	- Custos da água abrandada do sistema PVAR no cenário 2	72
Figura 24	- Custos de manufatura exergético do sistema PVAR no cenário 2	73
Figura 25	- Comparação de custos para produção de vapor do sistema PVAR nos dois cenários	74
Figura 26	- Comparação de custos de manufatura exergético do sistema PVAR nos dois cenários, em US\$/kWh	75
Figura 27	- Comparação de custos de manufatura exergético do sistema PVAR nos dois cenários, em US\$/kWh	76
Figura 28	- Demonstração do retorno sobre o investimento para a redução do consumo de gás natural (cenário 2 em comparação ao cenário 1)	77
Figura 29	- Demonstração do retorno sobre o investimento para a redução do consumo de gás natural, considerando os demais investimentos pagos	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Propriedades termodinâmicas do sistema de produção de vapor	45
Tabela 2	- Fluxos exergéticos do sistema de produção de vapor	46
Tabela 3	- Valores estimados para operação e manutenção anual da caldeira	50
Tabela 4	- Valores estimados para operação e manutenção anual do sistema de abrandamento	51
Tabela 5	- Valores tomados como referência para o cálculo dos custos do sistema PVAR	51
Tabela 6	- Valores dos custos para o sistema PVAR com taxa de 12%a.a	52
Tabela 7	- Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados, com taxa de juros de 12% a.a	55
Tabela 8	- Total de emissões CO ₂ e de acordo com <i>GHG Protocol tool for stationary combustion, version 4.0</i>	58
Tabela 9	- Novo cenário de emissões CO ₂ e de acordo com o <i>GHG Protocol toll for stationary combustion, version 4.0</i>	68
Tabela 10	- Valores de referência para o cálculo de investimentos no cenário 2	70
Tabela 11	- Valores estimados para operação e manutenção anual da caldeira no cenário 2	70
Tabela 12	- Valores estimados para operação e manutenção anual do sistema de abrandamento no cenário 2	71
Tabela 13	- Valores tomados como referência para o cálculo dos custos do sistema PVAR no cenário 2	71
Tabela 14	- Valores dos custos para o sistema PVAR no cenário 2, com taxa de juros de 12% a.a	71
Tabela 15	- Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados (cenário 2), com taxa de juros de 12% a.a	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIHPEC	- Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	- Associação Brasileira de Refrigeração Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
BCB	- Banco Central do Brasil
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEDAE	- Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Estado do Rio de Janeiro
CEG-RIO	- Companhia Estadual de Gás – Rio de Janeiro
CEPEL	- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CETESB	- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
COMGAS	- Companhia de Gás de São Paulo
CRESESB	- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
GEE	- Gases de Efeito Estufa
GHG	- <i>Greenhouse Gases</i>
GN	- Gás Natural
GRI	- <i>Global Reporting Initiative</i>
IPCC	- <i>International Panel on Climate Change</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
MP	- Material Particulado
NBR	- Norma Brasileira Registrada
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
PVAR	- Produção de Vapor para o Aquecimento de Reatores
tCO ₂ e	- Tonelada de dióxido de carbono equivalente

LISTA DE SÍMBOLOS

η	-	Eficiência da caldeira	[%]
η_{EC}	-	Eficiência do economizador da caldeira	[%]
c_{ab}	-	Custo do abrandamento de água	[US\$/kWh]
c_{er}	-	Custo do efluente de regeneração	[US\$/kWh]
c_{gn}	-	Custo do gás natural	[US\$/kWh]
c_{gn2}	-	Custo do gás natural no cenário 2	[US\$/kWh]
$c_{anual-gn}$	-	Custo anual do gás natural	[US\$/ano]
$c_{anual-gn2}$	-	Custo anual do gás natural no cenário 2	[US\$/ano]
c_{Mex}	-	Custo de manufatura exerético	[US\$/kWh]
c_{MO}	-	Custo de mão de obra	[US\$/ano]
c_{OMab}	-	Custo de operação e manutenção do abrandamento	[US\$]
c_{OMcal}	-	Custo de operação e manutenção da caldeira	[US\$]
cp	-	Calor específico	[kJ/kg.°C]
cp_{agua}	-	Calor específico da água	[kJ/kg.°C]
cp_{ar}	-	Calor específico à pressão constante do ar ambiente	[kJ/kg.K]
cp_{fe}	-	Calor específico do fluxo energético	[kJ/kg.K]
cp_{ge}	-	Calor específico à pressão constante dos gases de exaustão da caldeira	[kJ/kg.K]
c_v	-	Custo do vapor	[US\$/kWh]
e_{anual}	-	Economia de energia anual - gás natural	[kWh/ano]
$e_{anual-gn}$	-	Economia anual de gás natural	[US\$/ano]
E_{gn}	-	Energia produzida pelo gás natural	[kJ]
E_v	-	Fluxo exerético do vapor = $Y_{2,3}$	[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]
g	- Aceleração da gravidade = 9,80	[m/s ²]
G	- Função específica de Gibbs	[J/mol]
H	- Entalpia do fluxo energético	[kJ]
h	- Entalpia específica do fluxo energético	[kJ/kg]
h_a	- Entalpia específica da água de alimentação da caldeira	[kJ/kg]
h_v	- Entalpia específica do vapor produzido pela caldeira	[kJ/kg]
h_0	- Entalpia específica de referência	[kJ/kg]
h_i	- Entalpia específica do ponto i	[kJ/kg]
I_{ab}	- Investimento no abrandamento	[US\$]
I_{cal}	- Investimento na caldeira	[US\$]
k	- Período de amortização de capital	[anos]
m	- Massa de água	[kg]
\dot{m}	- Vazão em massa de fluxos energéticos (vapor, gases etc.)	[kg/s]
m_{gn}	- Massa de gás natural	[kg]
m_v	- massa de vapor	[kg]
\dot{m}	- Vazão mássica de água	[kg/s]
\dot{m}_i	- Vazão mássica no ponto i	[kg/s]
\dot{m}_{gn}	- Vazão mássica de gás natural	[kg/s]
\dot{m}_v	- Vazão mássica de vapor	[kg/s]
N	- Período de funcionamento do sistema	[h/ano]
P_0	- Pressão de referência	[atm]
P	- Potência instalada	[kW]
PCI_{gn}	- Poder calorífico inferior do gás natural	[kJ/kg]
PCS_{gn}	- Poder calorífico superior do gás natural	[kJ/kg]

P_v	- Taxa de cobrança do vapor	[US\$/kWh]
q	- Valor do capital	[US\$]
Q	- Potência	[kJ/dia]
Q_{EC}	- Potência transferida pelo economizador na forma de calor	[kJ/s]
\dot{Q}_{vc}	- Fluxo de calor transferido ao volume de controle em análise	[kW]
Q_{gn}	- Consumo anual de gás natural	[kWh/ano]
Q_{gn2}	- Consumo anual de gás natural com aquecimento solar e economizador – cenário 2	[kWh/ano]
Q_{cen2}	- Energia reduzida na forma de calor do cenário 1 para o cenário 2	[kWh/ano]
Q_v	- Potência do vapor	[kW]
r	- Taxa anual de juros	%a.a
R	- Constante universal dos gases = 8,31	[J/mol.K]
R_{CO2e}	- Redução de emissão de gases de efeito estufa	[tCO _{2e}]
s_0	- Entropia específica de referência	[kJ/kg.K]
s_i	- Entropia específica do ponto i	[kJ/kg.K]
T_{ar}	- Temperatura do ar	[K]
T_0	- Temperatura de referência	[K]
T_i	- Temperatura no ponto i	[K]
T_e	- Temperatura da água na entrada do sistema solar térmico	[°C]
T_{ge}	- Temperatura dos gases de exaustão	[K]
T_s	- Temperatura da água na saída do sistema solar térmico	[°C]
T_{SEC}	- Temperatura de saída da água no economizador	[°C]
v	- Velocidade escalar do fluxo energético	[m/s]
W_{B1}	- Potência da bomba 1	[kW]
W_{B2}	- Potência da bomba 2	[kW]

\dot{W}_{vc}	-	Potência de eixo transferida ao volume de controle	[kW]
Y	-	Função exergética em base incremental	[kW]
$Y_{i,j}$	-	j-ésima entrada à i-ésima unidade	[kW]
$Y_{i,k}$	-	k-ésima saída da i-ésima unidade	[kW]
z	-	Cota da superfície de controle com passagem de fluxo energético	[m]
μ_{i0}	-	Potencial de exergia química em condições ambiente	[J/mol]
μ_{i00}	-	Potencial de exergia química para o estado morto	[J/mol]

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.1 Introdução	17
1.2 Revisão bibliográfica	18
1.3 Objetivos	20
1.4 Justificativa	20
1.5 Metodologia	21
2. FUNDAMENTOS DE ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONOMIA	23
2.1 Introdução	23
2.2 A primeira lei da termodinâmica	23
2.3 A propriedade termodinâmica entalpia	25
2.4 A segunda lei da termodinâmica	26
2.5 A propriedade termodinâmica entropia	27
2.6 A propriedade termodinâmica exergia	28
3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO E DA PRODUÇÃO DE VAPOR PARA AQUECIMENTO DE REATORES QUÍMICOS	31
3.1 Algumas características da indústria de cosméticos	31
3.2 Consumo de energia na indústria de cosméticos	32
3.3 Abrandamento	35
3.4 Caldeira	36
3.5 Reatores químicos	37
3.6 Tanque de condensado	38
4. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	39
4.1 Expressões matemáticas	41
5. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE VAPOR	44
5.1 Cálculo dos custos associados ao PVAR	48
5.2 Avaliação da viabilidade econômica	54
6. IMPACTO AMBIENTAL ASSOCIADO AO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE VAPOR EM ESTUDO	56

6.1 Estimativa de emissão de gases de efeito estufa (GEE)	57
7. PROPOSTA DE REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GEE	59
7.1 Pré-aquecimento com economizadores para caldeiras	59
7.2 Pré-aquecimento com energia solar térmica	61
8. RESULTADOS ESPERADOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS E EMISSÃO DE GEE	64
8.1 Redução do consumo de energia	65
8.2 Redução da emissão de GEE	67
8.3 Redução de custos	69
8.4 Comparação entre os dois cenários e considerações finais	73
9. CONCLUSÕES	80
9.1 Recomendações para futuros trabalhos	81
REFERÊNCIAS	82
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	85
APÊNDICE A – Valores dos custos para o sistema PVAR	86
APÊNDICE B – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados	88
APÊNDICE C – Valores dos custos do sistema PVAR no cenário 2	90
APÊNDICE D – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados (cenário 2)	92

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de aquecimento de água por meio de painéis solares vem sendo amplamente difundida e seu uso passa por momento de grande expansão mundial. No Brasil, essa recente expansão está diretamente associada ao aumento do custo da energia elétrica na última década, pois essa fonte é a comumente empregada nas residências brasileiras para o aquecimento de água, especialmente no uso de chuveiros elétricos. Para demonstrar a citada expansão, destaca-se aqui o caso de algumas cidades brasileiras como São Paulo e Belo Horizonte, por exemplo, que adotaram leis de incentivo ao uso energia de solar. Ainda dentro dessa exemplificação, a lei paulistana número 14.459, de 3 de julho de 2007, estabelece no seu Art. 2º que

“é obrigatória a instalação de sistema de aquecimento de água por meio de aproveitamento da energia solar, nas novas edificações do Município de São Paulo, destinadas às categorias de uso residencial e não-residencial, ...”.

Portanto, é notório o crescimento da aplicação dessa solução como alternativa ao uso de energia elétrica, interferindo positivamente na matriz energética brasileira. Todavia, outros possíveis e importantes ganhos econômico-ambientais proporcionados pelo uso do aquecimento solar, como a redução da emissão de gases de efeito estufa e o conseqüente combate ao aquecimento global, não são percebidos pela grande maioria, mas podem representar oportunidades de importantes avanços no balanço das emissões atmosféricas no Brasil.

Na indústria, onde o aquecimento de água envolve potências muito maiores para sua produção, normalmente empregam-se derivados do petróleo como combustíveis nos sistemas de geração de calor, destacando-se o uso do gás natural em caldeiras e aquecedores (*boilers*). Na atualidade, quando disponível, o gás natural oferece flagrantes vantagens competitivas, tanto no aspecto econômico quanto no ambiental. Todavia, da mesma forma que há grande oportunidade de redução de custos no emprego do aquecimento solar como alternativa ao

aquecimento produzido por energia elétrica podem e devem existir significativas oportunidades de redução de custos no emprego dessa mesma fonte renovável na redução do consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, das emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono. Adicionalmente, pode-se destacar ainda o emprego de gás natural para aquecimento nas residências de algumas grandes cidades brasileiras como importante alvo.

Assim sendo, neste trabalho é apresentado estudo de caso que mensura os possíveis ganhos, econômicos e ambientais, com a aplicação do aquecimento solar de água como alternativa para a redução do consumo de gás natural. A proposta consiste em pré-aquecer a água de alimentação de uma caldeira que produz vapor com a finalidade de aquecer os diversos reatores de uma unidade industrial fabricante de produtos de higiene pessoal.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta dissertação conta em sua elaboração com consultas à literatura especializada em termodinâmica, modelagem e otimização de sistemas termodinâmicos, em recursos naturais renováveis, notadamente a energia solar, além de estudos relativos às condições de fornecimento de gás natural e seus custos associados, além do perfil de produção do setor de produtos de higiene pessoal.

Szargut (1988) estudara a exergia química e fôra mais uma fonte para o esclarecimento da questão das exergias negativas.

Tsatsaronis (1993) esclarecera a questão das exergias negativas ao apontar que, em alguns casos, o sentido adotado para o fluxo exergético é contrário ao da transferência de calor.

Silveira (1998) desenvolvera um método de otimização termoeconômica com base na análise do diagrama funcional termoeconômico.

Tuna (1999), que apresentara uma metodologia de análise exergoeconômica aplicada a sistemas de cogeração, permitira estabelecer o custo do gás natural em US\$/kWh, facilitando a padronização das variáveis com valores monetários.

Bogdanic et al. (2000) forneceu importantes elementos para a análise do desempenho de um economizador de energia, ao estudar um sistema de aquecimento solar e a recuperação de perdas de calor em processos industriais.

Brizi (2002) permitiu estabelecer uma relação com o sistema em estudo e facilitar o entendimento das características termodinâmicas deste mesmo sistema, ao dimensionar um sistema de cogeração.

Com a consulta a Wylen et al. (2003) pôde-se abordar os princípios conceituais envolvendo a primeira e a segunda leis da termodinâmica e, por meio do aplicativo CATT2, pôde-se a principal fonte empregada para o cálculo dos valores de entalpia específica, entropia específica e exergia específica dos diversos fluidos estudados.

Silveira e Tuna (2003) destacaram a importância da termoeconomia como ferramenta para estudar e otimizar sistemas energéticos e permitiram melhor compreensão da técnica ao apresentar um método de análise termoeconômica para otimização de sistema combinado de potência e calor.

Tiba (2003) demonstrou, por meio de dados solarimétricos do Brasil, a grande disponibilidade de insolação na região do empreendimento cujo processo foi objeto de estudo.

ABNT (2004) definiu os conceitos de aspecto e impacto ambiental que estão diretamente relacionados com a abordagem de análise de entradas e saídas empregadas nesta dissertação, tendo sido importante elemento para introduzir o capítulo que tratou dos aspectos ambientais associados ao sistema em estudo.

Pellegrini et al. (2005), ao abordar uma das técnicas para atribuição de custos em sistemas, pôde-se outra importante fonte para contribuir com a conceituação dos fundamentos de termoeconomia.

L'ORÉAL (2005) apresentou um claro fluxograma para o entendimento das etapas do processo produtivo na indústria de cosméticos e produtos de higiene pessoal.

L'ORÉAL (2009) apresentou dados de desempenho, objetivos e metas ambientais para os próximos anos que auxiliaram na justificativa da presente dissertação.

Para estimativa de emissão de gases de efeito estufa pôde-se adotada metodologia de quantificação reconhecida pelo relatório do *International Panel on Climate Change – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006).

São Paulo [município] (2007) fôra mencionada como importante motivador do incentivo ao emprego de energia solar térmica, por se tratar de regulamento municipal da maior cidade brasileira.

Balestieri (2007) contribuía para a conceituação dos fundamentos de termoeconomia, ao abordar o tema otimização de sistemas energéticos.

ABNT (2008) orientara quanto aos regulamentos normativos brasileiros para projeto e instalação de sistemas de aquecimento solar em circuito direto.

A consulta a Martinelli (2008), que apresenta detalhada introdução ao funcionamento de máquinas térmicas, contribuía significativamente para os cálculos associados ao desempenho da caldeira empregada no sistema estudado.

Com ampla aplicação na presente dissertação, Lamas et al. (2009) estudara a análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética, configurando-se como a principal fonte de consulta sobre análise exérgica e exergoeconômica desta dissertação. A metodologia aqui aplicada fôra norteada por essa fonte para o seu desenvolvimento.

CETESB & ABIHPEC (2009) relatara dados de desempenho e detalhara o processo produtivo do setor de perfumaria, cosméticos e produtos de higiene pessoal, destacando a relação do setor com o meio ambiente.

CEDAE (2009) fornecera as tarifas de cobrança de água na cidade do Rio de Janeiro, indispensáveis ao estabelecimento dos custos associados ao sistema de abrandamento de água.

BCB (2009) fornecera tabelas para conversão de moedas no ano de 2009.

CEG (2009) fornecera as tarifas de cobrança de gás natural no estado do Rio de Janeiro, bem como suas características físico-químicas empregadas em alguns cálculos.

PWB (2009) fornecera preços para caldeiras comercializadas no Brasil.

O CEPEL (2010), vinculado ao Ministério de Minas e Energia, por meio do CRESESB, disponibilizara algumas importantes informações sobre investimentos e custos de sistemas solares térmicos empregados neste trabalho.

Aalborg (2010) fornecera dados de aspectos construtivos, dimensões e desempenho de economizadores de caldeiras comercializados no Brasil.

ABRAVA (2010) apresentara dados sobre dimensionamento de sistemas de aquecimento solar e de unidades de aquecimento operando em escala industrial no Brasil.

COMGAS (2010) fôra consultada para identificação da densidade do gás natural, empregada como fator de conversão em diversos momentos.

GRI (2010) contribuíra significativamente para a justificativa da presente dissertação ao informar a importância da transparência em relatórios de sustentabilidade como elemento chave para o engajamento de partes interessadas no desempenho de uma organização.

A mencionada metodologia para quantificação de gases de efeito estufa, reconhecida pelo relatório do *International Panel on Climate Change – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006), fora disponibilizada por WRI (2010), a partir da fundação *The Greenhouse Gas Protocol Initiative*, por meio do protocolo intitulado *GHG Protocol tool for stationary combustion*, na versão 4.0.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar um processo que consome recursos naturais não renováveis e emite gases de efeito estufa durante sua operação para geração de vapor possibilitando, com o uso de metodologias conhecidas, identificar oportunidades de otimização, tanto no consumo de recursos naturais quanto na emissão de poluentes e custo operacional.

1.4. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho é motivado pela demanda por melhor desempenho ambiental por parte da indústria, conseqüência da busca pelo desenvolvimento sustentável e da competitividade entre as organizações, tendo a redução do consumo de energia como um de seus principais alvos.

Portanto, as iniciativas para redução do consumo de energia e da emissão de poluentes tendo como conseqüência a contribuição para a preservação dos recursos naturais e da capacidade da biosfera de assimilar tais poluentes têm feito parte dos objetivos de diversas empresas e de sua prestação de contas aos diversos

stakeholders: acionistas, clientes, empregados, comunidades vizinhas, poder público e sociedade em geral, entre outros. Neste contexto, é destacado pelo *Global Reporting Initiative* (2006) que:

“o objetivo do desenvolvimento sustentável é satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. Como forças fundamentais na sociedade, as organizações de todos os tipos têm um papel importante a desempenhar em seu alcance.”

Assim, o presente trabalho pretende contribuir para o cumprimento do citado papel, podendo seu alinhamento com a questão do desenvolvimento sustentável ser verificado, por exemplo, no relatório de desenvolvimento sustentável referente ao ano de 2008 publicado pelo Grupo L'ORÉAL de Paris (2009), que traz como uma das prioridades da organização a redução das emissões de gases de efeito estufa em fábricas e armazéns.

1.5. METODOLOGIA

Emprega-se neste trabalho a metodologia de análise termoeconômica adaptada de Lamas et al. (2009) de Silveira (1998) ao identificar os componentes que constituem o sistema de produção de vapor, levantar as propriedades termodinâmicas dos fluidos do sistema, construir o diagrama funcional, desenvolver as equações e formular o problema de custos dos produtos associados. Essa metodologia é empregada para simular os ganhos promovidos pelo aproveitamento de energias “disponíveis”, comparação entre cenários, análise dos resultados e conclusões.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS DA ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONOMICA

2.1. INTRODUÇÃO

A termoeconomia é uma ciência que se dedica às pesquisas envolvendo a ligação entre a termodinâmica e a economia. Trata-se de uma área direcionada à distribuição de custos dos sistemas termodinâmicos que tem a grandeza exergia como elemento primordial.

A termoeconomia tem sido uma potente ferramenta para estudar e otimizar sistema energéticos, possibilitando aplicações em estudos de viabilidade, tomadas de decisão para investimentos, comparação entre alternativas tecnológicas e condições de operação (SILVEIRA; TUNA, 2003).

Devido à “dependência” da grandeza termodinâmica exergia para o desenvolvimento da análise exergética e termoeconômica, este capítulo se dedica à abordagem de alguns importantes conceitos indispensáveis para a compreensão dessa grandeza.

2.2. A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A primeira lei da termodinâmica é também conhecida como lei da conservação de energia, na qual se observa a equivalência entre calor e trabalho.

De acordo com Balestieri (2007), adotando-se um volume de controle (VC) sobre certo escoamento em regime permanente, conforme traçado na Figura 1, a Equação (1) de conservação de energia para este volume de controle pode ser estabelecida, de forma geral, conforme Equação (2), que mostra em seu segundo termo a representação das energias de entrada e saída do sistema.



Figura 1 – Ilustração de volume de controle para um escoamento em regime permanente (Balestieri, 2007)

$$\int \dot{Q} - \int \dot{W} = \Delta \dot{E} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} = \dot{E}_s - \dot{E}_e$$

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} = \sum_s \dot{m} \cdot \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_e \dot{m} \cdot \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2)$$

Ainda segundo Balestieri (2007), a Equação (3) representa o fluxo de calor transferido ao volume de controle em análise.

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m} \cdot c_{pfe} \cdot (T_s - T_e) \quad (3)$$

Originalmente, de acordo com Wylen et al. (2003), quando se supunha uma condição reversível para os processos físicos reais, a Equação (1) foi imaginada como sendo a descrita pela Equação (4).

$$\int \dot{Q} - \int \dot{W} = 0 \quad (4)$$

Assim, conforme Balestieri (2007), a equação de conservação de energia quantifica os valores de energia envolvidos no problema sem discutir a qualidade das mesmas, o que faz com que, em um balanço energético, uma forma de energia é obtida, por conservação, em decorrência dos demais valores. Portanto, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, para um sistema fechado, seja qual for a transformação sofrida por este sistema, a energia se conserva.

2.3. A PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTALPIA

Segundo Wylen et al. (2003), quando um sistema passa por uma mudança de estado, realiza trabalho e absorve certa quantidade de calor.

O processo quase-estático proposto por Wylen et al. (2003), mostrado na Figura 2, facilita entendimento desse conceito.

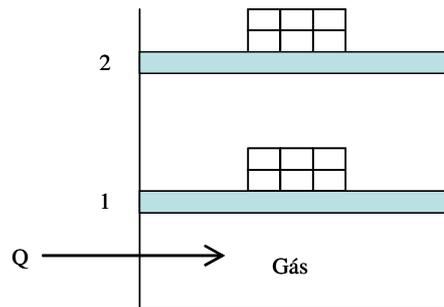


Figura 2 – Processo quase-estático à pressão constante (Wylen et al. 2003)

Para o esquema mostrado na Figura 2, aplicando a primeira lei da termodinâmica e tomando o gás como sistema e ainda admitindo que não haja variações de energias cinética ou potencial e que o único trabalho realizado durante o processo seja o associado ao movimento de fronteira entre os estados 1 e 2, provocado pelo calor aplicado Q , tem-se a representação da Equação (5).

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2 \quad (5)$$

Nesse sistema, o trabalho pode ser calculado a partir da Equação (6).

$${}_1W_2 = \int_1^2 P \cdot dV \quad (6)$$

Como a pressão é constante, tem-se a Equação (7).

$${}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P \cdot (V_2 - V_1) \quad (7)$$

Portanto:

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + P_2 \cdot V_2 - P_1 \cdot V_1 \quad (8)$$

$${}_1Q_2 = (U_2 + P_2 \cdot V_2) - (U_1 + P_1 \cdot V_1)$$

Então, como a transferência de calor durante esse processo é dada em termos de $U + PV$ entre os estados inicial e final, caracterizando-se como uma propriedade termodinâmica do sistema, define-se esta propriedade como entalpia (H), representada pela Equação (9).

$$H = U + PV \quad (9)$$

Por unidade massa, representa-se como:

$$h = u + pv .$$

2.4. A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Baseando-se em Wylen et al. (2003), enquanto a primeira lei da termodinâmica trata unicamente da conservação de energia, não impondo nenhuma restrição quanto à direção do fluxo de calor e trabalho, a segunda lei refere-se ao

sentido direcional em que a energia na forma de calor flui em um sistema, ou seja, processos ocorrem em uma determinada direção e não na oposta. Portanto, de acordo com a segunda lei:

“é impossível construir um dispositivo que opere, segundo um ciclo, e que não produza outros efeitos, além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.”

Um dos primeiros cientistas a se dedicar a esta questão foi o engenheiro francês Sadi Carnot (1796-1832). Posteriormente, com base nos trabalhos de Carnot e Clapeyron (1799-1864), Lord Kelvin (1824-1907) e Rudolf Clausius (1822-1888) desenvolveram, paralelamente, os enunciados que conduziram ao estabelecimento da segunda lei da termodinâmica e da definição da grandeza termodinâmica entropia (S).

2.5. A PROPRIEDADE TERMODINÂMICA ENTROPIA

Entropia é uma grandeza introduzida pela segunda lei da termodinâmica. É resumidamente definida como medida da "quantidade de desordem" de um sistema, representando a energia que não pode ser convertida em trabalho.

O seguinte exemplo auxilia no entendimento do conceito de entropia: uma xícara de café quente esfria em virtude da troca de calor com o meio, mas o meio não cederá calor para a xícara de café quente. Um carro consome gasolina ao subir uma ladeira, mas ao descer o nível da gasolina não voltará à condição inicial.

O físico e matemático alemão Rudolf Clausius é o principal responsável pela formulação dos conceitos da segunda lei da termodinâmica e da introdução do conceito de entropia. Segundo Wylen et al. (2003), o primeiro passo para entender o significado da propriedade entropia é através da desigualdade de Clausius, o qual mostrou que, num ciclo, a razão entre a variação de calor pela temperatura é menor ou igual a zero, conforme Equação (10).

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (10)$$

Adotando duas trajetórias distintas para ciclos reversíveis entre dois estados (1 e 2), Wylen et al. (2003) demonstram que, como $\oint \frac{\delta Q}{T}$ é a mesma para todas as trajetórias reversíveis adotadas entre os estados, conclui-se que essa grandeza é independente da trajetória e é somente função dos estados extremos e, conseqüentemente, uma propriedade, denominada entropia, representada por S , Equação (11).

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \quad (11)$$

Portanto, a entropia (S), definida em função de um processo reversível, é uma propriedade extensiva e a entropia por unidade de massa é representada por s , indicando a Equação (11) que, quando um sistema termodinâmico passa de um estado a outro, a variação em sua entropia é igual à variação da quantidade de calor reversível dividido pela temperatura.

2.6. CONCEITO DE EXERGIA

Comumente chamada de energia útil, exergia é a parte da energia que pode ser completamente convertida para realização de trabalho, sem perdas. Ou seja, de acordo com o proposto por Gaggioli (1983) *apud* Pelegrinni et al. (2005), exergia é de fato o que a pessoa leiga considera energia, ou seja, a capacidade de se produzir um efeito útil.

Outra definição é a de Kotas (1985) *apud* Pellegrini et al. (2005), para o qual exergia representa

“a máxima quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do meio ambiente, através de processos reversíveis, envolvendo interação apenas com os componentes do meio ambiente.”

Traduzindo estes conceitos em uma expressão matemática, para Balestieri (2007), exergia é o máximo trabalho reversível que se obtém entre um sistema e o ambiente quando interagem para alcançar o equilíbrio, ou seja, a Equação (12).

$$Ex = W_{rev} \quad (12)$$



Figura 3 – Ilustração de volume de controle entre um sistema e o ambiente (Balestieri, 2007)

Ainda segundo Balestieri (2007), para o processo mostrado na Figura 3, em termos de fluxo de massa, tem-se a Equação (13).

$$Ex_0^1 = \dot{m} \left[h_1 - h_0 + \frac{V_1^2 - V_0^2}{2} + g(Z_1 - Z_0) - T_0 (s_1 - s_0) \right] \quad (13)$$

Desprezando-se tanto a parcela cinética quanto a potencial, tem-se a Equação (14).

$$Ex_0^1 = \dot{m} \left[(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) \right] \quad (14)$$

A parcela representada pela Equação (13) é conhecida como exergia física. Segundo Balestieri (2007), assim como o trabalho, a exergia pode ser desagregada em diversas formas, sendo representada pelo somatório das exergias cinética, potencial, física e química, conforme a Equação (15).

$$Ex = Ex_c + Ex_p + Ex_f + Ex_q \quad (15)$$

Sendo a exergia cinética representada pela Equação (16) e a potencial pela Equação (17).

$$Ex_c = \frac{\dot{m}V_0^2}{2} \quad (16)$$

$$Ex_p = \dot{m} \cdot g \cdot Z_0 \quad (17)$$

A exergia química, segundo Szargut et al. (1988) *apud* Balestieri(2007), consiste no máximo trabalho possível de se obter quando um sistema é levado da condição inicial até o equilíbrio químico com o meio ambiente ou estado morto (condição em que ocorre completo equilíbrio entre sistema e ambiente), sendo representada pela Equação (18).

$$Ex_q = \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00}) \quad (18)$$

Onde:

$$\mu_{i0} = G_i \cdot (P_0, T_0) + RT_0 \cdot \ln\left(\frac{P_{i0}}{P_0}\right) \quad (19)$$

$$\mu_{i00} = G_i \cdot (P_0, T_0) + RT_0 \cdot \ln\left(\frac{P_{i00}}{P_0}\right) \quad (20)$$

Onde:

$$G_i \cdot (P_0, T_0) = h_{i0} - T_0 \cdot s_{i0} \quad (21)$$

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO PROCESSO E DA PRODUÇÃO DE VAPOR PARA AQUECIMENTO DE REATORES QUÍMICOS

3.1. ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS

Segundo CETESB & ABIHPEC (2009, p.24), de acordo com a definição de cosméticos, as preparações têm como finalidade: limpar, perfumar, mudar a aparência, proteger, manter em boas condições ou corrigir odores corporais. Dada a diversidade de utilização e de produtos, o setor pode ser subdividido em três segmentos básicos:

- Higiene pessoal: engloba sabonetes, produtos para higiene oral, desodorantes axilares e corporais, talcos, produtos para higiene capilar e produtos para barbear. Também estão contidos nesse segmento absorventes, papéis higiênicos e fraldas descartáveis;
- Perfumaria: composto pelas águas de colônia, perfumes, extratos e loções pós-barba;
- Cosméticos: constituído por produtos para coloração, tratamento, fixação e modelagem capilar, maquiagem, protetores solares, cremes, loções para a pele e depilatórios.

Sobre alguns indicadores econômicos, ainda segundo CETESB & ABIHPEC (2009, p.19), o setor tem se revelado um dos mais vigorosos do país, com um crescimento médio de 8,2% no período 1999-2004, tendo ocorrido um crescimento de 140% nas oportunidades de trabalho em atividades ligadas à higiene pessoal, perfumaria e cosméticos durante o período 1994-2004, representando um crescimento médio anual de 9,1%, possibilitando ao setor manter atualmente oportunidades de trabalho para mais de 2,6 milhões de pessoas em diversas atividades, incluindo 1.258 empresas fabricantes instaladas no Brasil. Dentre essas empresas, 16 são de grande porte, apresentando um faturamento anual líquido de impostos acima dos R\$ 100 milhões.

3.2. CONSUMO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS

Segundo CETESB & ABIHPEC (2009, p.24), o setor de perfumaria, cosméticos e produtos de higiene pessoal, cujo fluxograma geral é mostrado nas Figuras 4 e 5, não é grande consumidor de energia devido às próprias características de seus processos produtivos, nos quais a maioria das etapas é realizada a temperatura ambiente, estando o consumo de energia elétrica concentrado em máquinas e/ou equipamentos como motores, bombas, misturadores e outros equipamentos. Determinados produtos, no entanto, são obtidos a partir de operações que necessitam de aquecimento. Para tanto, é comum o emprego de caldeiras.

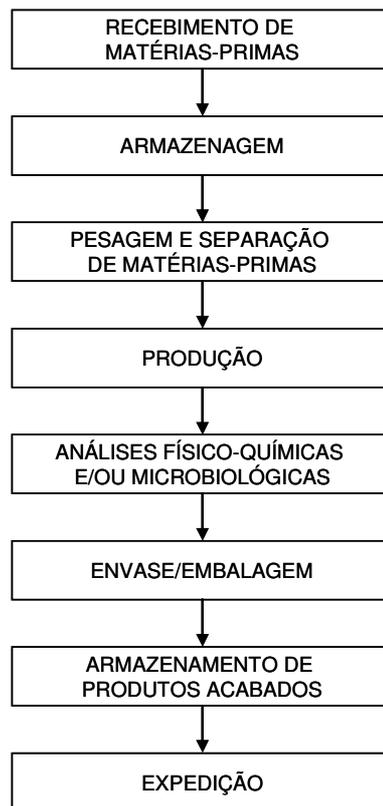


Figura 4 – Fluxograma geral do setor de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos (CETESB & ABIHPEC, 2009)

De acordo com CETESB & ABIHPEC (2009, p.25), o processo de produção de cosméticos consiste basicamente nas etapas de:

- Recebimento de matérias-primas e materiais de embalagem, passando por verificação do material recebido, por amostragem e análises físico-químicas;

- Armazenagem de matérias-primas, incluindo granel, embalagens para os produtos acabados e demais insumos;
- Pesagem e separação de matérias-primas para produção de cada produto a ser obtido. Nessa etapa as matérias-primas são previamente separadas e pesadas, de acordo com as quantidades necessárias, seguindo o estabelecido para cada processo e sendo encaminhadas à produção. Dependendo do nível tecnológico da empresa, os insumos recebidos a granel e estocados em tanques ou silos podem ser conduzidos ao setor produtivo por linhas de distribuição;
- Produção ou fabricação: nessa etapa as matérias-primas são inseridas em reatores químicos. A maioria dos produtos é fabricada sob temperatura e pressão controladas. Essa etapa do processo é mantida por um sistema de utilidades, responsável por fornecimento de energia elétrica, água de processo, vapor e ar comprimido;
- Análises: os lotes produzidos são amostrados e submetidos a análises de controle (físico-químicas e microbiológicas) e, após atestada sua adequação, são encaminhados para a etapa de envase;
- Envase e embalagem: confirmada a adequação do produto, nas linhas de envase ou enchimento, ocorre o acondicionamento em frascos (plásticos ou de vidro), sacos, bisnagas, entre outros;
- Armazenamento de produtos acabados: o produto, já acondicionado em embalagem para comercialização e agrupado em caixas geralmente de papelão para distribuição, é encaminhado para a área de armazenamento, onde permanece até que seja enviado ao mercado atacadista;
- Expedição: ponto de saída dos produtos acabados diretamente para o comércio ou para os centros de distribuição.

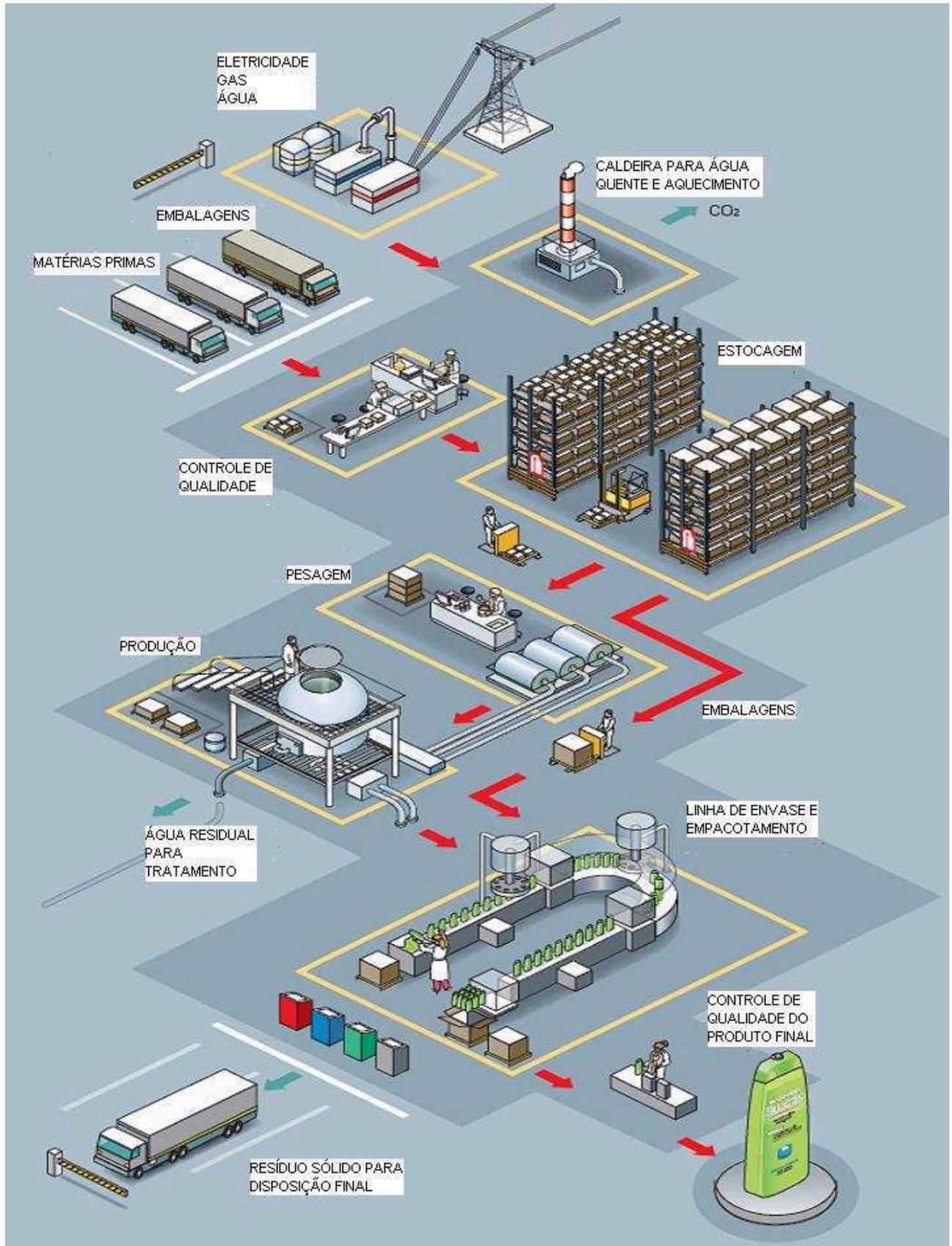


Figura 5 – Visão global do fluxo de produção (L'ORÉAL DE PARIS, 2006)

No processo em estudo, a distribuição do consumo de energia elétrica e de gás natural, distribuiu-se conforme mostrado no gráfico ilustrado na Figura 6.

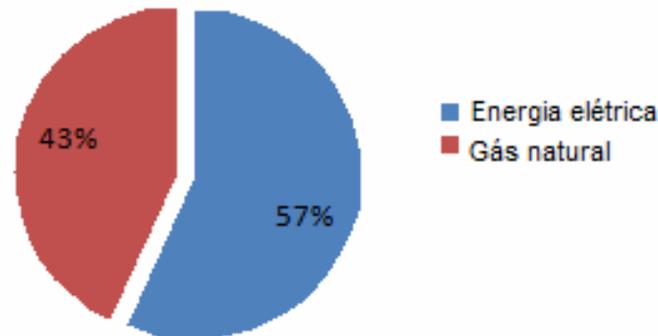


Figura 6 – Distribuição do consumo de energia elétrica e gás natural em uma indústria do setor de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos

A Figura 7 mostra o processo de produção de vapor e aquecimento de reatores químicos em estudo, responsável pelo consumo de gás natural.

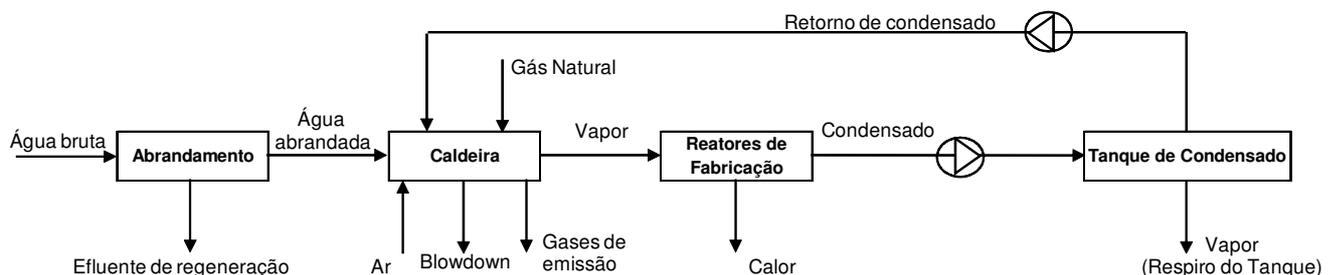


Figura 7 – Fluxograma de produção de vapor em uma indústria do setor de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos

As etapas do processo mostrado na Figura 7 são: abrandamento de água, caldeira, reatores de fabricação e tanque de condensado. A seguir é sucintamente descrita a função de cada unidade.

3.3. ABRANDAMENTO

O abrandamento tem como objetivo reduzir a dureza da água bruta por meio da retirada dos íons cálcio e magnésio. A presença de dureza na água da caldeira pode provocar a formação de depósitos (incrustações) nas superfícies de troca

térmica. Tais incrustações prejudicam significativamente a passagem de calor. A Figura 8 ilustra parte de um sistema de abrandamento contendo duas colunas. No interior dessas colunas estão as resinas iônicas que promovem o abrandamento da água bruta.



Figura 8 – Foto de duas colunas com resinas iônicas que promovem o abrandamento da água bruta (STELLA RESINAS, 2010)

3.4. CALDEIRA

A caldeira ou gerador de vapor é o equipamento que produz vapor de água, sendo que a do sistema em estudo é do tipo flamotubular, ou seja, no qual os gases provenientes da combustão atravessam a caldeira no interior de tubos imersos em uma câmara de água, cedendo calor a essa massa de água.

O processo em estudo emprega um gerador de vapor fabricado pela empresa ATA no ano 2000, modelo AWN3G, capacidade de produção de 3t/h (0,8333 kg/s) de vapor com um rendimento (η) de 88%. Considerando uma operação em plena carga e com máxima eficiência, o consumo de gás natural é estimado em 0,0458

kg/s, de acordo com os dados do gerador de vapor e o cálculo realizado por meio da Equação (22), proposta por Martinelli (1998).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_v}{E_{gn}} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{gn} \cdot PCI_{gn}} \therefore 0,88 = \frac{0,8333 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \left(2.774 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 285,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{\dot{m}_{gn} \cdot 51.378 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \quad (22)$$

$$\therefore \dot{m}_{gn} = 0,0458 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

3.5. REATORES QUÍMICOS

Os reatores químicos recebem as matérias primas, inclusive água, e realizam a mistura e homogeneização para obtenção de produtos. As transformações que se processam em temperaturas acima da ambiente são obtidas com o auxílio de vapor que circula junto à parede dos reatores, transferindo calor para a massa no seu interior. A Figura 9 ilustra uma área de produção típica da indústria de cosméticos, com cinco reatores de fabricação.



Figura 9 – Foto de uma área de produção típica da indústria de cosméticos, com seus reatores químicos (CETESB & ABIHPEC, 2009)

3.6. TANQUE DE CONDENSADO

A transferência de calor do vapor para a parede dos reatores possibilita a redução da temperatura do vapor de água, que é recolhida como líquido saturado no tanque de condensado. Esse condensado será realimentado na caldeira, produzindo vapor novamente e reiniciando o ciclo.

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

O presente trabalho aplica uma metodologia de análise e otimização termoeconômica em uma unidade de geração de vapor e aquecimento de reatores de fabricação, operando em uma indústria do setor químico. De acordo com Lamas et al. (2009, p.64), essa metodologia consiste na identificação das funções do sistema como um todo e cada unidade individualmente, na construção do diagrama funcional termoeconômico, na formulação do problema de custo e na solução do sistema de equações de custos associados a esse sistema.

A primeira etapa consiste na identificação de cada um dos componentes ou unidades e suas correntes, conforme representado na Figura 10.

O próximo passo consiste em etapa fundamental para o desenvolvimento do modelo: a montagem do diagrama funcional.

O diagrama funcional termoeconômico é composto por figuras geométricas que representam as unidades do sistema em estudo e dos processos que interagem com ele (Lamas et al., 2009).

A notação adotada nos diagramas funcionais é a seguinte:

Y – função exergética (em base incremental);

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

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

Ou seja, é usada “virgula” para notação de insumo ou entrada e “ponto” para notação de produto ou saída.

Assim, com base no diagrama do processo mostrado na Figura 10, é elaborado o digrama funcional do sistema em estudo, ilustrado na Figura 11, no qual a linha de fronteira mostrada tem como função separar os produtos (saídas) e insumos (entradas) do meio externo.

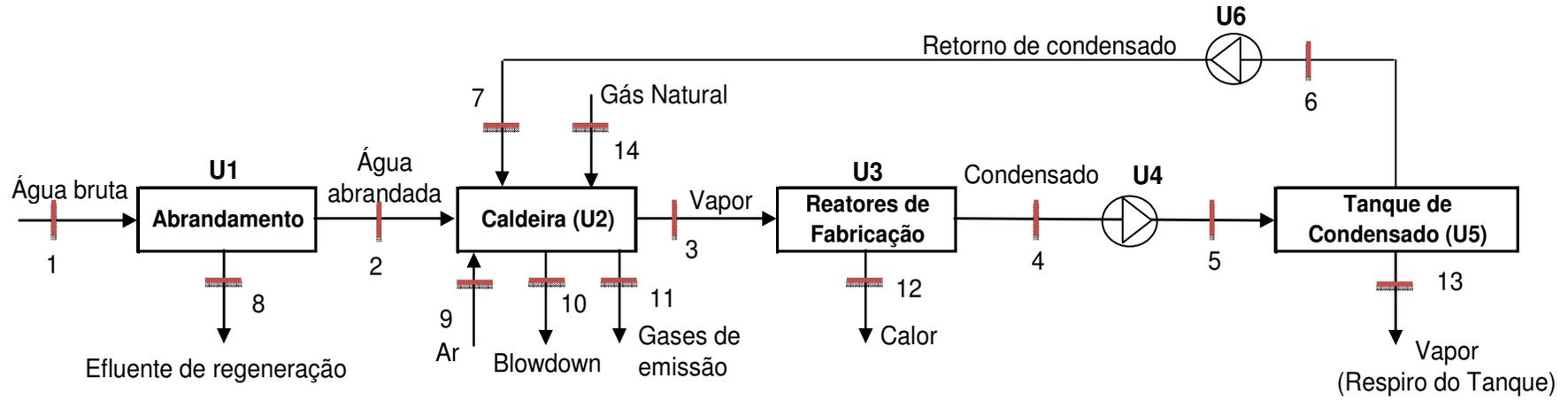


Figura 10 – Fluxograma do processo de produção de vapor e aquecimento de reatores com identificação das unidades e correntes

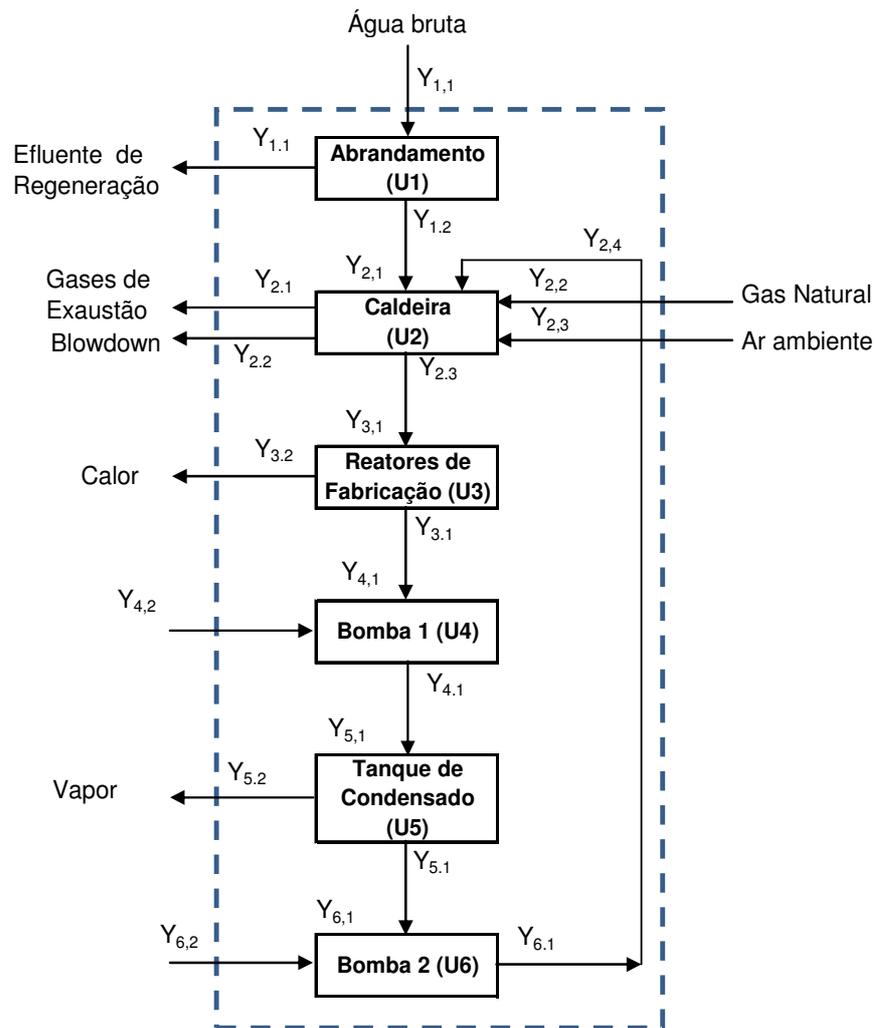


Figura 11 – Diagrama funcional do processo de produção de vapor e aquecimento de reatores

4.1. EXPRESSÕES MATEMÁTICAS

Na seqüência são desenvolvidas as expressões matemáticas associadas ao diagrama funcional mostrado na Figura 7, sendo que as Equações (23) a (45) foram desenvolvidas com base em Wylen et al. (2003), Silveira e Tuna (2003) e Lamas et al. (2009).

Unidade 1: Abrandamento

$$Y_{1,1} = \dot{m}_1 \cdot [(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)] \quad (23)$$

$$Y_{1,1} = \dot{m}_8 \cdot [(h_8 - h_1) - T_0 \cdot (s_8 - s_1)] \quad (24)$$

$$Y_{1,2} = \dot{m}_2 \cdot [(h_2 - h_1) - T_0 \cdot (s_2 - s_1)] \quad (25)$$

Unidade 2: Caldeira

$$Y_{2,1} = Y_{1,2} \quad (26)$$

$$Y_{2,2} = \dot{m}_{14} \cdot PCI_{gn} \quad (27)$$

$$Y_{2,3} = \dot{m}_9 \cdot cp_{ar} \cdot \left[(T_9 - T_0) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_9}{T_0}\right) \right] \quad (28)$$

$$Y_{2,4} = Y_{6,1} \quad (29)$$

$$Y_{2,1} = \dot{m}_{11} \cdot cp_{ge} \cdot \left[(T_{11} - T_0) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_{11}}{T_0}\right) \right] \quad (30)$$

$$Y_{2,2} = \dot{m}_{10} \cdot [(h_{10} - h_2) - T_0 \cdot (s_{10} - s_2)] \quad (31)$$

$$Y_{2,3} = \dot{m}_3 \cdot [(h_3 - h_{15}) - T_0 \cdot (s_3 - s_{15})]^* \quad (32)$$

(*)Para esclarecimento do fluxo 15, vide Tabela 1.

Unidade 3: Reatores de Fabricação ou Produção

$$Y_{3,1} = Y_{2,3} \quad (33)$$

$$Y_{3,1} = \dot{m}_4 \cdot [(h_4 - h_3) - T_0 \cdot (s_4 - s_3)] \quad (34)$$

$$Y_{3,2} = Y_{3,1} - |Y_{3,1}| \quad (35)$$

Unidade 4: Bomba 1

$$Y_{4,1} = Y_{3,1} \quad (36)$$

$$Y_{4,2} = W_{B1} \quad (37)$$

$$Y_{4,1} = \dot{m}_5 \cdot [(h_5 - h_4) - T_0 \cdot (s_5 - s_4)] \quad (38)$$

Unidade 5: Tanque de Condensado

$$Y_{5,1} = Y_{4,1} \quad (39)$$

$$Y_{5,1} = \dot{m}_6 \cdot [(h_6 - h_5) - T_0 \cdot (s_6 - s_5)] \quad (40)$$

$$Y_{5,2} = \dot{m}_{13} \cdot [(h_{13} - h_5) - T_0 \cdot (s_{13} - s_5)] \quad (41)$$

$$Y_{5,1} = Y_{5,1} - Y_{5,2} \quad (42)$$

Unidade 6: Bomba 2

$$Y_{6,1} = Y_{5,1} \quad (43)$$

$$Y_{6,2} = W_{B2} \quad (44)$$

$$Y_{6,1} = \dot{m}_7 \cdot [(h_7 - h_6) - T_0 \cdot (s_7 - s_6)] \quad (45)$$

CAPÍTULO 5 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE VAPOR

Os dados de consumo e operação das diversas etapas de operação do sistema de geração de vapor permitem a montagem da tabela de propriedades termodinâmicas, resumida na Tabela 1. As propriedades são obtidas com o uso do aplicativo CATT2, disponível em Wylen et al. (2003), com as expressões matemáticas do capítulo anterior e as propriedades termodinâmicas da Tabela 1, são obtidos os valores dos fluxos exergéticos do sistema de vapor, mostrados na Tabela 2.

Na Tabela 2, as exergias com valores negativos ($Y_{2,4}$, $Y_{3,1}$, $Y_{4,1}$ e $Y_{6,1}$) indicam que, nesses casos, o sentido adotado para o fluxo exergético é contrário ao da transferência de calor (SZARGUT et al., 1988; TSATSARONIS, 1993).

Na Tabela 1, a exergia específica dos gases de exaustão é calculada pela Equação (46).

$$ex_{ge} = cp_{ge} \cdot \left[(T_{ge} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{ge}}{T_0} \right) \right] \quad (46)$$

onde: $cp_{ge} = 1,225 \text{ kJ/kg.K}$.

A exergia específica do ar é calculada pela Equação (47).

$$ex_{ar} = cp_{ar} \cdot \left[(T_{ar} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{ar}}{T_0} \right) \right] \quad (47)$$

Onde: $cp_{ar} = 1,005 \text{ kJ/kg.K}$.

Tabela 1 – Propriedades termodinâmicas do sistema de produção de vapor

Ponto	Fluido	Vazão (kg/s)	Pressão absoluta (MPa)	Temperatura (K)	Entalpia Específica (kJ/kg)	Entropia Específica (kJ/kg.K)	Exergia Específica (kJ/kg)
0	Água	-	0,101	298,15	105	0,3673	-
1	Água bruta	0,2911	0,401	298,15	105,2	0,3672	-
2	Água abrandada	0,2772	0,401	298,95	108,6	0,3784	-
3	Vapor	0,8333	1,001	453,15	2.778	6,586	-
4	Vapor condensado	0,8333	0,301	393,15	503,8	1,528	-
5	Condensado bombeado	0,8333	0,401	393,15	503,8	1,528	-
6	Condensado bombeado	0,8333	0,202	363,15	377,0	1,192	-
7	Condensado bombeado	0,5563	1,301	363,15	377,9	1,192	-
8	Efluente de regeneração	0,0139	0,401	299,35	110,2	0,384	-
9	Ar	1,1568	0,106	303,15	-	-	-
10	<i>Blowdown</i> (purga)	0,0002	1,001	453,15	2.778	6,586	-
11	Gases de exaustão	0,9032	0,101	453,15	-	-	33,02
12	Calor	-	-	-	-	-	-
13	Vapor (<i>vent</i> do tanque)	0,00001	0,101	378,15	2.666	7,383	-
14	Gás natural	0,0458	0,103	293,15	-	-	51.378
15 ⁽¹⁾	Água - alimentação da caldeira	0,8335	1,301	341,45	286,9	0,933	-

⁽¹⁾ O ponto 15 representa a combinação dos pontos 2 e 7, que alimentam a caldeira com água abrandada e condensado.

A exergia específica do gás natural é seu próprio PCI. A Equação (48) ilustra a conversão do valor do PCI fornecido no Rio de Janeiro (CEG-RIO, 2009) em kcal/m³ para kJ/kg.

$$PCI_{gn} = \left(9.400 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \cdot 4,1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \right) \cdot \frac{\text{m}^3}{0,766\text{kg}} = 51.378\text{kJ} / \text{kg} \quad (48)$$

Os custos do sistema de produção de vapor para aquecimento de reator químico, sistema PVAR, podem ser representados pelo diagrama ilustrado na Figura 12 e pelas Equações (49) a (53).

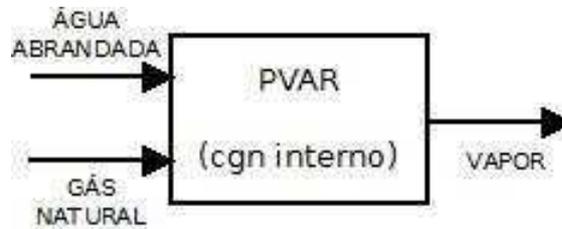


Figura 12 – Diagrama de custos do sistema de produção de vapor para aquecimento de reator químico (PVAR)

As Equações (49) a (53) representam o desenvolvimento das equações dos custos associados ao sistema PVAR.

$$C_{M_{ex}} = C_v + C_{ab} \quad (49)$$

$$C_{ab} = \frac{I_{ab} \cdot f}{H \cdot Y_{1,2}} + C_{OM_{ab}} \quad (50)$$

$$C_v = \frac{I_{cal} \cdot f}{H \cdot Y_{2,3}} + C_{OM_{cal}} + C_{gn} \cdot \frac{Y_{2,2}}{Y_{2,3}} \quad (51)$$

$$f = \frac{q^k \cdot (q-1)}{(q^k - 1)} \quad (52)$$

onde:

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (53)$$

para $k = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18$ e 20 anos e $r = 4, 8, 12, 16\%$ a.a.

5.1. CÁLCULO DOS CUSTOS ASSOCIADOS AO SISTEMA PVAR

Todos os valores informados em dólares (US\$) no presente trabalho foram convertidos com base na cotação do dólar comercial de 17 de outubro de 2009, data em que US\$1,00 correspondia a R\$1,7304 (BCB, 2009).

De acordo com Tuna (1999) é possível expressar o custo do gás natural em US\$/kWh. Considerando a tarifa da CEG-Rio de 1,2998 R\$/m³, conforme estabelecido em 1 de agosto de 2009 para consumidor industrial de 10.001 a 50.000 m³/mês, o valor do poder calorífico superior do gás natural comercializado por essa companhia como 9.400 kcal/m³ (CEG-RIO, 2009) e a já citada cotação do dólar comercial (BCB, 2009), obtem-se a Equação (54) e o valor de 0,0687 US\$/kWh para o preço do gás natural.

$$C_{gn} = \frac{1,2998 \frac{\text{R\$}}{\text{m}^3}}{\left(9.400 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \cdot 4,1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kcal}} \right) \cdot \frac{1\text{h}}{3.600\text{s}}} \cdot \frac{1}{1,7304 \frac{\text{R\$}}{\text{US\$}}} = 0,0687 \frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \quad (54)$$

Para o cálculo dos custos associados ao sistema de produção de vapor, foram estimados valores para operação e manutenção anual da caldeira e do sistema de abrandamento, mostrados respectivamente nas Tabelas 3 e 4, além de outros valores de referência para custos e investimentos (PWB CALDEIRAS, 2009), mostrados na Tabela 5.

Para o valor total de I_{cal} considerou-se o seguinte:

- Investimento: US\$85.000,00;

- Instalação (material + mão de obra): US\$42.500,00;
- Frete: US\$2.500,00.

A partir da vazão mássica de 0,0458 kg/s citada na Tabela 1, na massa específica do gás natural (0,766 kg/Nm³) (COMGAS, 2009) e no número de horas de operação por ano (Tabela 6), chega-se ao consumo anual do combustível, que servirá como base para o cálculo do consumo total de energia com a Equação (55).

$$Q_{gn} = \frac{0,0458 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,766 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}} \cdot \frac{3.600\text{s}}{1\text{h}} \cdot \frac{8.200\text{h}}{\text{ano}} \cdot \text{PCI}_{gn} \quad (55)$$

$$Q_{gn} = \frac{0,0458 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,766 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}} \cdot \frac{3.600\text{s}}{1\text{h}} \cdot \frac{8200\text{h}}{\text{ano}} \cdot 10,932 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} = 19.295.351 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}}$$

Assim, o valor (c_{OMcal}), tendo o custo de operação e manutenção da caldeira informado na Tabela 3, é obtido por meio da Equação (56), que representa sua conversão de US\$/ano em US\$/kWh.

$$c_{OMcal} = \frac{c_{OMcal}}{Q_{gn}} \cdot \frac{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{ano}}\right)}{\left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}\right)} \quad (56)$$

$$c_{OMcal} = \frac{99.601}{19.295.351} \cdot \frac{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{ano}}\right)}{\left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}\right)} = 0,0052 \cdot \frac{\text{US\$}}{\text{kWh}}$$

O valor de c_{OMab} , tendo o custo de operação e manutenção do abrandamento informado na Tabela 4, é obtido por meio da Equação (56).

$$C_{OMab} = \frac{C_{OMab}}{Q_{gn}} \cdot \frac{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{ano}}\right)}{\left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}\right)} \quad (56)$$

$$C_{OMcal} = \frac{49.418}{19.295.351} \cdot \frac{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{ano}}\right)}{\left(\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}\right)} = 0,0026 \cdot \frac{\text{US\$}}{\text{kWh}}$$

Tabela 3 – Valores estimados para operação e manutenção anual da caldeira

Item	Custo (US\$)/ano
Mão de obra para operação	66.574,00
Tratamento químico	24.272,00
Inspeção anual	4.623,00
Peças reposição	4.132,00
Total	99.601,00

Para o cálculo do custo de mão de obra, Equação (57), para operação anual da caldeira considerou-se o custo dos operários dedicados exclusivamente à operação do sistema, incluindo tratamento de água e manutenção preventiva (L'ÓREAL DE PARIS, 2006; CETESB & ABIHPEC, 2009). Ou seja:

- Quatro operadores;
- Salário médio com todos os encargos: R\$ 3.000,00.

$$C_{MO} = 4 \cdot 3.000,00 \frac{\text{R\$}}{\text{operador}} \cdot 12 \text{ meses} = 144.000,00 \frac{\text{R\$}}{\text{ano}} \quad (57)$$

$$C_{MO} = 144.000,00 \frac{\text{R\$}}{\text{ano}} \cdot \frac{1}{1,7304 \frac{\text{R\$}}{\text{US\$}}} = 83.218,00 \frac{\text{US\$}}{\text{ano}}$$

O custo de mão de obra (C_{MO}) calculado foi proporcionalmente distribuído entre os sistemas cobertos pelos quatro operadores: caldeira e abrandamento de água, conforme item “mão de obra para operação” citado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 4 – Valores estimados para operação e manutenção anual do sistema de abrandamento

Item	Custo (US\$/ano)
Mão de obra para operação	16.644,00
Insumos	5.201,00
Peças de reposição	2.167,00
Água bruta	25.406,00
Total	49.418,00

Observa-se que o custo de operação e manutenção do sistema de abrandamento é significativamente afetado pelo custo da água bruta: 5,1167 US\$/m³ (CEDAE, 2009).

Tabela 5 – Valores tomados como referência para o cálculo dos custos do sistema PVAR

Variável	Valor
N (h/ano)	8.200
C _{OMcal} (US\$/kWh)	0,0052
C _{gn} (US\$/kWh)	0,0687
C _{OMab} (US\$/kWh)	0,0026
I _{cal} (US\$)	130.000,00
I _{ab} (US\$)	34.674,00
C _{ab} (US\$/m ³)	5,1167

As Equações (49) a (53) são empregadas para o cálculo dos custos associados ao sistema PVAR. A Tabela 6 mostra os valores calculados para uma taxa de juros de 12% ao ano. O resultado do cálculo para as demais taxas de juros empregadas está descrito no Apêndice A.

Tabela 6 – Valores dos custos para o sistema PVAR com taxa de 12% a.a

r	k	q	f	C_v (US\$/kWh)	C_{ab} (US\$/kWh)	C_{Mex} (US\$/kWh)
12%a.a	2	1,12	0,59	0,0875	0,0447	0,1322
12%a.a	4	1,12	0,33	0,0855	0,0260	0,1116
12%a.a	6	1,12	0,24	0,0849	0,0199	0,1048
12%a.a	8	1,12	0,20	0,0846	0,0169	0,1015
12%a.a	10	1,12	0,18	0,0844	0,0152	0,0996
12%a.a	12	1,12	0,16	0,0842	0,0141	0,0983
12%a.a	14	1,12	0,15	0,0842	0,0133	0,0975
12%a.a	16	1,12	0,14	0,0841	0,0128	0,0969
12%a.a	18	1,12	0,14	0,0841	0,0124	0,0965
12%a.a	20	1,12	0,13	0,0840	0,0121	0,0962

As Figuras 13 e 14 ilustram as curvas de desempenho dos valores obtidos para os custos do vapor, da água abrandada.

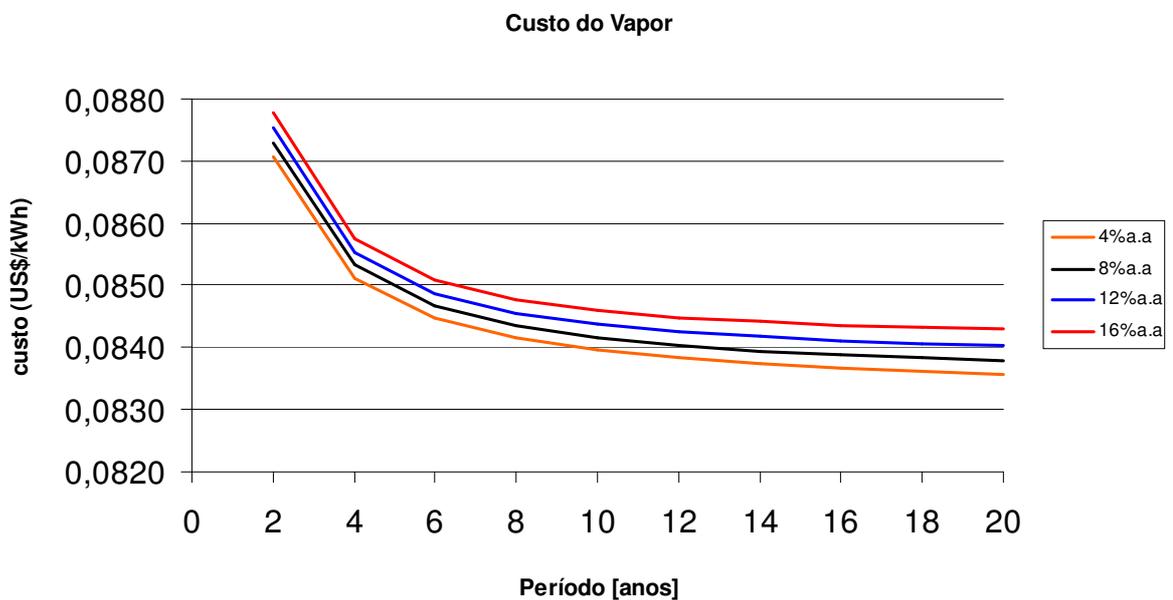


Figura 13 – Custos para produção de vapor do sistema PVAR

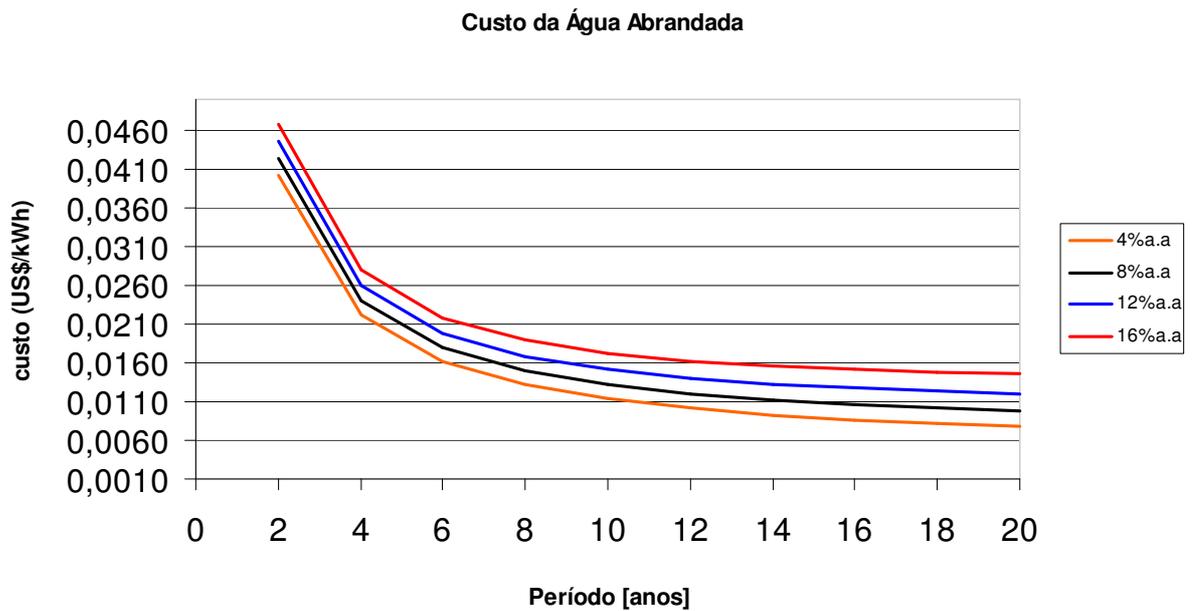


Figura 14 – Custos da água abrandada do sistema PVAR

Esses gráficos possibilitam observar, para cada produto associado, o período de retorno do capital investido no sistema PVAR. Na Figura 15 observa-se o custo de manufatura exergetica do sistema estudado.

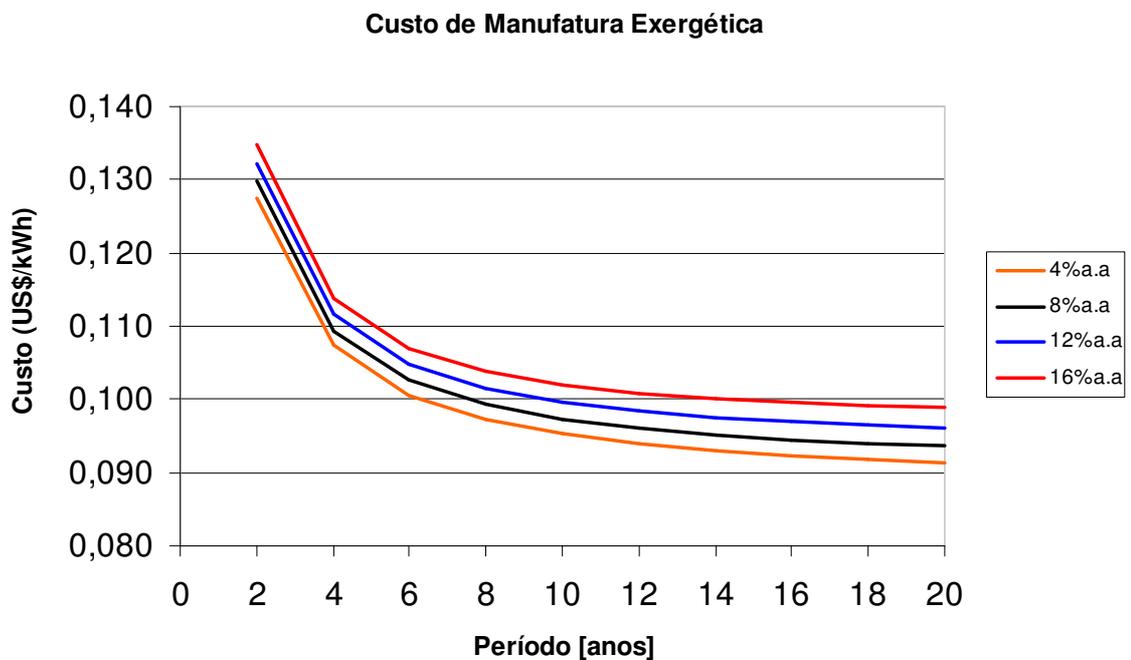


Figura 15 – Custos de manufatura exergetica do sistema PVAR

5.2. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Uma vez que não foram identificados valores praticados para o serviço de fornecimento de vapor, convencionou-se no presente trabalho o seguinte para estabelecimento de um valor de custo de vapor que pudesse ser empregado para uma avaliação de viabilidade econômica do sistema de produção de vapor em estudo:

- Investimento idêntico ao levantado no presente trabalho;
- Custos operacionais de um ano de operação;
- Definição de taxa de cobrança considerando cobertura de todas as despesas operacionais e investimento total recuperado em um ano.

Assim, a Equação (58) define, a partir do convencionado, o valor da taxa de fornecimento de vapor (P_v).

$$P_v = \frac{I_{cal} + I_{ab}}{Q_{gn}} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right] + (c_{OMcal} + c_{OMaa} + c_{gn}) \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right] \quad (58)$$

O valor de energia total produzida adotado foi o de um ano de operação (19.295.351 kWh). Assim, o cálculo para a taxa de fornecimento de vapor (P_v) resulta no valor a seguir, sendo esse o valor suficiente para cobrir as despesas operacionais do primeiro ano de operação e os investimentos, ambos necessários a uma hipotética instalação fornecedora de vapor para a unidade industrial em estudo:

$$P_v = 0,084967848 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right]$$

A viabilidade econômica é então obtida a partir da Equação (59), que apresenta a relação entre os custos para aquisição e produção de vapor.

$$R \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right] = \{ [(P_v - c_v) \cdot E_v] \cdot N \} \quad (59)$$

A Tabela 7 ilustra os valores os valores calculados para uma taxa de juros de 12% ao ano e os diferentes períodos de retorno são mostrados na Figura 16. O resultado do cálculo para as demais taxas de juros empregadas está descrito no Apêndice B.

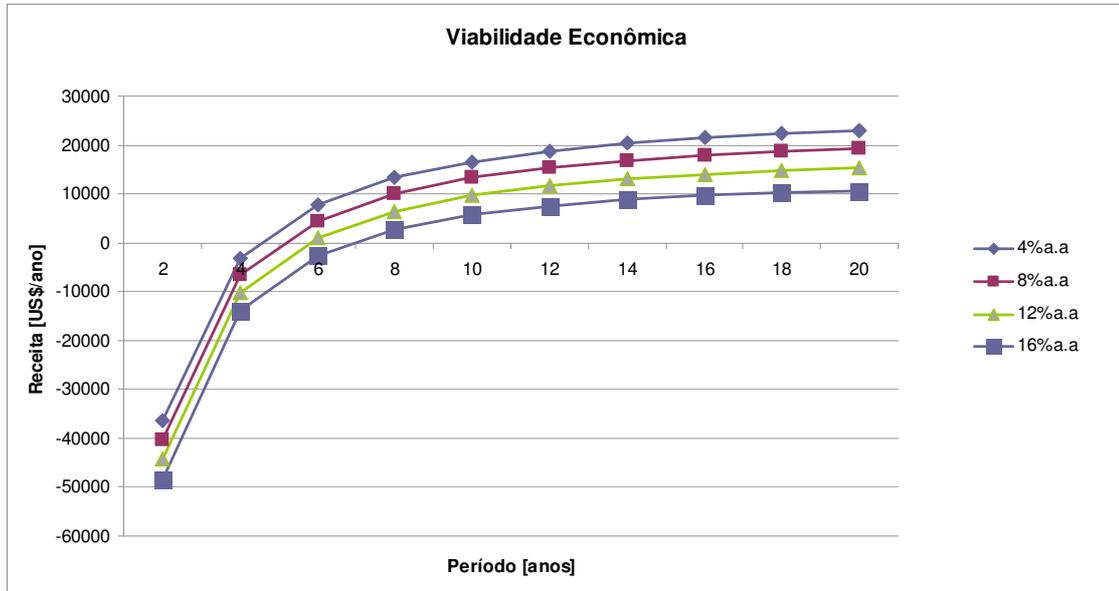


Figura 16 – Receita anual do sistema para os períodos observados

Tabela 7 – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados, com uma taxa de juros de 12% a.a

r	k	N (h/ano)	E _v (kW)	c _v (US\$/kWh)	P _v (US\$/kWh)	R (US\$/ano)
12%a.a	2	8.200	2.076	0,0876	0,084967858	-44.280,48
12%a.a	4	8.200	2.076	0,0856	0,084967858	-10.160,20
12%a.a	6	8.200	2.076	0,0849	0,084967858	1.020,93
12%a.a	8	8.200	2.076	0,0846	0,084967858	6.470,90
12%a.a	10	8.200	2.076	0,0844	0,084967858	9.632,33
12%a.a	12	8.200	2.076	0,0843	0,084967858	11.653,49
12%a.a	14	8.200	2.076	0,0842	0,084967858	13.027,01
12%a.a	16	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	13.999,57
12%a.a	18	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	14.708,42
12%a.a	20	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	15.236,03

CAPÍTULO 6 – IMPACTO AMBIENTAL ASSOCIADO AO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE VAPOR EM ESTUDO

A norma NBR ISO 14001 (2004, p.2) define aspecto ambiental como sendo o

“elemento das atividades ou produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente”

e impacto ambiental como sendo

“qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, dos aspectos ambientais da organização”.

Portanto, com base na definição da NBR ISO 14001, os principais aspectos e impactos ambientais diretamente associados à operação contínua do sistema de produção de vapor em estudo são aqueles relacionados às entradas e saídas do sistema, destacando-se na entrada os seguintes impactos:

- O consumo do recurso natural água devido à necessidade de introduzir uma corrente de reposição das perdas de água do sistema, que tem como impacto ambiental potencial a contribuição para escassez desse recurso natural renovável;
- O consumo de combustível fóssil gás natural para queima nas caldeiras, que tem como impacto ambiental potencial a contribuição para escassez desse recurso natural não renovável.

Na saída do sistema destacam-se os seguintes impactos:

- A geração de efluentes líquidos provocada pelas purgas (*blowdown*) da caldeira, que tem como impacto ambiental potencial a possibilidade de alteração da qualidade da água do corpo receptor (manancial que recebe o lançamento de efluentes); e
- A emissão atmosférica pela chaminé da caldeira. Trata-se do resultado da combustão do gás natural que tem como impactos ambientais potenciais a alteração da qualidade do ar devido à emissão de material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), além da contribuição

para intensificação do efeito estufa devido à emissão de dióxido de carbono (CO₂).

Nesse contexto, o presente trabalho se dedica exclusivamente aos aspectos relacionados ao consumo de gás natural e, conseqüentemente, à emissão de CO₂.

6.1. ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE)

A estimativa de emissão de gases de efeitos estufa nesse caso em estudo depende, basicamente, do consumo de combustível fóssil, o gás natural. A partir do resultado do consumo anual de energia (19.295.351 kWh/ano) obtido pela Equação (32), tem-se a informação necessária para o cálculo de emissão de GEE, conforme.

Portanto, para uma fácil obtenção da estimativa de emissão de gases de efeito estufa, de acordo com o definido pelo *International Panel on Climate Change – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006), é disponibilizado pela fundação *The Greenhouse Gas Protocol Initiative* o protocolo intitulado *GHG Protocol tool for stationary combustion*, na versão 4.0, que, para a instalação estacionária de produção de vapor em estudo, resulta nos valores citados na Tabela 8.

CAPÍTULO 7 – PROPOSTA DE REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GEE

Um dos principais objetivos do presente trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica de promover o pré-aquecimento da água para produção de vapor por meio de sistema baseado em painéis solares, possibilitando o aumento da temperatura da água abrandada que alimenta uma caldeira – corrente 2 da Figura 10. Todavia, antes do aprofundamento nessa possível alternativa, é indispensável avaliar uma das correntes com grande potencial para aproveitamento: a emissão de gases (corrente 11 da Figura 10). O aproveitamento do potencial do calor produzido pelos gases de emissão é comumente feito por um equipamento denominado economizador.

7.1. PRÉ-AQUECIMENTO COM ECONOMIZADOR PARA CALDEIRAS

Os economizadores são trocadores de calor gás-água que se destinam a aquecer a água de alimentação antes de sua introdução na caldeira. Esse pré-aquecimento é feito por meio da troca de calor entre os gases de combustão saindo da caldeira e a água, conforme ilustra o esquema da Figura 17 (Martinelli, 1998).

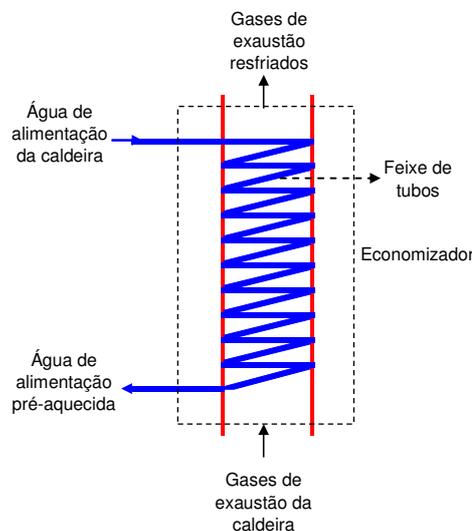


Figura 17 – Princípio de funcionamento do economizador para caldeiras

Os economizadores são geralmente constituídos por tubos “aletados” de aço carbono, aço inoxidável ou ferro fundido. A água a ser pré-aquecida circula no interior dos tubos e por fora circulam os gases de emissão gerados durante a combustão. De acordo com o fabricante de caldeiras Aalborg (2010), o emprego de economizador pode gerar uma economia de no mínimo 5% em relação ao combustível gasto. As Figuras 18 e 19 apresentam o aspecto construtivo interno e externo de dois economizadores distintos.



Figura 18 – Foto de um modelo de economizador para uso em caldeiras, fabricado pela Aalborg Industries (AALBORG, 2010)



Figura 19 – Foto de um modelo de economizador para uso em caldeiras, fabricado pela Heatmec Indústria Metalúrgica Ltda (HEATMEC, 2010)

7.2. PRÉ-AQUECIMENTO COM ENERGIA SOLAR TÉRMICA

Segundo CEPEL (2010), embora possua a sétima maior área de coletores solares instalados no mundo, o Brasil possui apenas 1,72 m² de área coletora instalada para cada 100 mil habitantes, muito atrás de Chipre (84,4), Barbados (26,9) e Turquia (13,5). Adicionalmente, a taxa média de crescimento anual da área coletora instalada no Brasil é de 14%, enquanto no Canadá é de 50%, na Alemanha 39% e na França e na Grécia, 34%. Portanto, devido ao grande potencial solarimétrico brasileiro, há muitas oportunidades para otimização do consumo de energia elétrica e de gás natural, além do abastecimento de áreas remotas.

Assim, neste estudo, a proposta de inserir o aquecimento solar objetiva aproveitar o potencial solar disponível na cidade do Rio de Janeiro que, segundo Tiba (2003), conta com uma média anual de radiação solar global diária de aproximadamente 16 MJ/m².dia. A proposta consiste, basicamente, em uma instalação por circulação forçada, conforme ilustra a Figura 20.

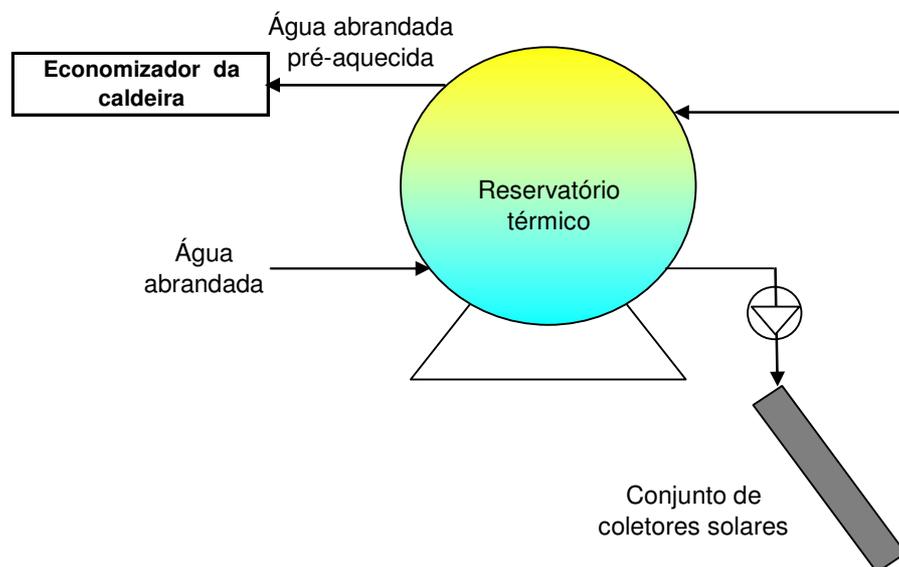


Figura 20 – Fluxograma da instalação proposta para pré-aquecimento por sistema solar

De acordo com a NBR 15569 (ABNT, 2008), um sistema de aquecimento solar é composto por um conjunto de equipamentos, acessórios e suas interligações hidráulicas que funciona por circulação natural ou forçada. A circulação natural ocorre devido ao fenômeno da termofissão, ou seja, na movimentação de um fluido produzida pela diferença de densidade decorrente da variação de sua temperatura.

Na Figura 20 está ilustrado um sistema por circulação forçada, normalmente aplicável a instalações de grande porte, cuja circulação no sistema é forçada por uma pressão produzida externamente, geralmente através de uma bomba, o que permite maior flexibilidade no posicionamento do reservatório térmico.

Desta forma, conjugando o aproveitamento do calor produzido pela energia solar disponível e pela emissão de gases lançada na atmosfera, o sistema em estudo passaria a contar com a configuração mostrada na Figura 21.

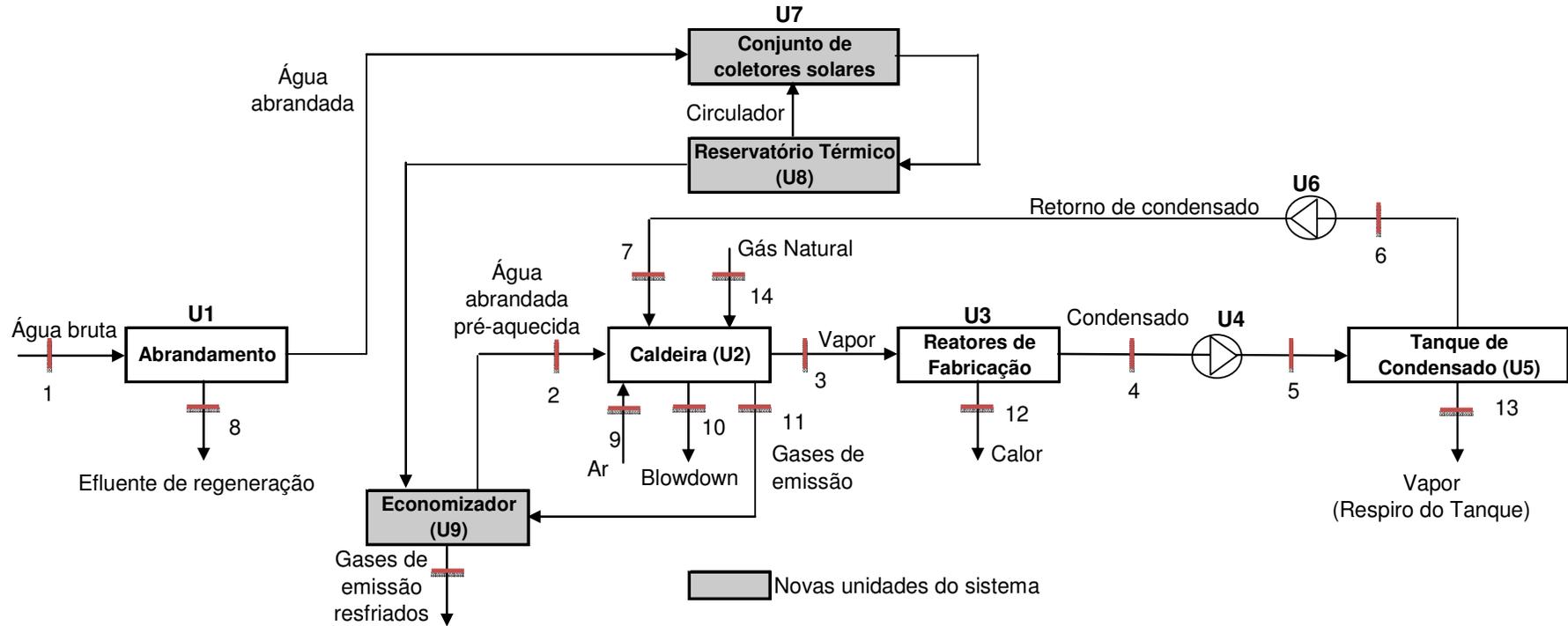


Figura 21 – Fluxograma do processo de produção de vapor e aquecimento de reatores contendo as unidades propostas

CAPÍTULO 8 – RESULTADOS ESPERADOS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS E EMISSÃO DE GEE

A estimativa de redução de gases de efeito estufa depende da estimativa das reduções de combustíveis fósseis empregados, neste caso o gás natural. Para estimativa dessas reduções serão utilizadas informações oriundas basicamente das seguintes fontes:

- Bogdanic et al. (2000), que apresenta um rendimento para economizador empregado em caldeiras;
- A ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração Ar condicionado Ventilação e Aquecimento (2010) que apresenta dados sobre aplicação de aquecimento solar no setor industrial brasileiro; e
- O CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (2010), vinculado ao Ministério de Minas e Energia, que por meio do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito), disponibiliza, entre outras, informações sobre investimentos e custos de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos.

Para dimensionar um sistema de aquecimento por energia solar térmica necessitariam ser levantadas inúmeras variáveis, dentre elas a média de irradiação solar diária, rendimento do coletor solar empregado, o tipo e o volume do reservatório térmico a ser adotado, área total dos coletores, temperatura da água aquecida, entre outros. Portanto, tal dimensionamento deve ser objetivo de estudo distinto. Todavia, algumas informações são indispensáveis para identificação de valores essenciais para que este trabalho atinja o objetivo.

Um dos pontos primordiais a definir é a temperatura final da água que o sistema deverá atingir. Como, de acordo com ABRAVA (2010), o mercado brasileiro conta com novos coletores adequados a aplicações de calor solar para processo industrial na gama de temperaturas de 80 a 250°C, a dotando o início dessa faixa, para esse sistema será convencionada a temperatura máxima de 80°C. Assim, com os dados informados na Tabela 1 é possível estimar a potência necessária para elevar a temperatura de 25°C até 80°C, por meio da Equação (60).

$$Q = \dot{m}_2 \cdot cp_{\text{água}} \cdot (T_s - T_e) \quad (60)$$

Sendo o $cp_{\text{água}}$ (calor específico da água) de 4,18 kJ/kg.°C, então:

$$Q = 0,2772 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 86.400 \frac{\text{s}}{\text{dia}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})} \cdot (80^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 5.506.123 \frac{\text{kJ}}{\text{dia}}$$

$$Q = 5.506.123 \frac{\text{kJ}}{\text{dia}} \cdot \frac{1}{3.600} \frac{\text{kWh}}{\text{kJ}} = 1.529 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$$

Assim, a potência instalada, considerando a operação do sistema em 24 horas, é obtida pela Equação (61).

$$P = \frac{1.529 \text{ kWh}}{24 \text{ h}} = 63,7 \text{ kW} \quad (61)$$

Os dados levantados até este momento permitirão, na sequência, a estimativa de investimento para o sistema solar térmico.

8.1. REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Os cálculos mostrados pelas Equações (60) e (61), baseados em uma situação intitulada cenário 2, conforme mostrado na Figura 21, mas considerando somente a redução do consumo de energia produzido pelo sistema de aquecimento solar com temperatura de saída de 80°C. Portanto, para obtenção da energia total economizada com o esquema proposto na Figura 21 é preciso estimar os ganhos com o emprego do economizador da caldeira.

Bogdanic et al. (2000), em estudo de caso empregando economizador para caldeiras, adota uma eficiência de 85% para esse equipamento. Fazendo uso dessa mesma eficiência para estimar o aproveitamento, via instalação de economizador de energia, do calor produzido pela corrente de gases de exaustão da caldeira ($Y_{2.1}$)

mostrada na Tabela 2, tem-se, a partir das Equações (62) e (63), a temperatura na saída do economizador (T_{SEC}).

$$Q_{EC} = Y_{2,1} \cdot \eta_{EC} \quad (62)$$

$$Q_{EC} = 30kW \cdot 0,85 = 25,5kW = 25,5 \frac{kJ}{s}$$

$$Q_{EC} = \dot{m}_2 \cdot cp_{\text{água}} \cdot (T_{SEC} - T_{EEC}) \quad (63)$$

$$25,5 \frac{kJ}{s} = 0,2772 \frac{kg}{s} \cdot 4,18 \frac{kJ}{(kg \cdot ^\circ C)} \cdot (T_{SEC} \text{ } ^\circ C - 80^\circ C)$$

$$T_{SEC} = 102^\circ C$$

Assim, aplicando-se a Equação (64), chega-se à energia total reduzida na forma de calor com o emprego da energia solar térmica e economizador de energia, que possibilitam a elevação da água de reposição (*make-up*) da caldeira de $25^\circ C$ para $102^\circ C$.

$$Q_{\text{cen2}} = \dot{m}_2 \cdot cp_{\text{água}} \cdot (T_{SEC} - T_s) \quad (64)$$

$$Q_{\text{cen2}} = 0,2772 \frac{kg}{s} \cdot 8.200 \frac{h}{\text{ano}} \cdot \frac{3.600s}{h} \cdot 4,18 \frac{kJ}{(kg \cdot ^\circ C)} \cdot (102^\circ C - 25^\circ C) = 2.633.762.356 \frac{kJ}{\text{ano}}$$

$$Q_{\text{cen2}} = 2.633.762.356 \frac{kJ}{\text{ano}} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3.600 \text{ kJ}} = 731.600 \frac{kWh}{\text{ano}}$$

8.2. REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GEE

Empregando no novo cenário o *GHG Protocol tool for stationary combustion*, versão 4.0, obtem-se os resultados citados na Tabela 9.

$$Q_{gn2} = Q_{gn} - Q_{cen2} = 19.295.351 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} - 731.600 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} = 18.563.751 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}}$$

Portanto, de acordo com resultados mostrados nas Tabelas 8 e 9, a redução total de GEE em tCO₂e/ano é estimada pela Equação (65).

$$R_{CO_2e} = 3.900tCO_2e - 3.752tCO_2e = 148tCO_2e \quad (65)$$

8.3. REDUÇÃO DE CUSTOS

O cenário 2 representa uma situação de idêntica demanda energética em relação à situação inicial, mas com reduzido consumo de gás natural, possibilitando a redução do custo desse combustível por kWh produzido no sistema que aproveita a disponibilidade de calor presente na energia solar térmica e nos gases de emissão. Assim, a partir das Equações (66) e (67), chega-se ao seguinte consumo de gás natural, em termos de vazão mássica:

$$\dot{Q}_{gn2} = 18.563.751 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right]$$

$$\dot{m}_{gn2} = 18.563.751 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right] \cdot \frac{1}{10,932} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kWh}} \right] = 1.698.111 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{ano}} \right] \quad (66)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gn2} &= 1.698.111 \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{ano}} \right] \cdot \frac{1}{8.200} \left[\frac{\text{ano}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{1}{3.600} \left[\frac{\text{h}}{\text{s}} \right] \cdot 0,766 \left[\frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \right] = \\ &= 0,04406 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \end{aligned} \quad (67)$$

A substituição do resultado encontrado na Equação (67) na Equação (31) implica em nova resultado para o fluxo $Y_{2,2}$, que influencia diretamente no consumo de gás natural e nos custos do sistema..

Então, como a citada mudança de consumo de gás natural é a única mudança significativa em relação ao consumo de energia do cenário 1 para o cenário 2, é possível simular as condições de custo no cenário 2 com os dados que são mostrados na sequência, na Equação (68).

$$e_{\text{anual-gn}} = (Q_{gn} - Q_{gn2}) \cdot \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right] \cdot 0,0687 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right] \quad (68)$$

$$e_{\text{anual-gn}} = (19.295.351 - 18.563.751) \cdot \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right] \cdot 0,0687 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right]$$

$$e_{\text{anual-gn}} = 731.600 \cdot \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \right] \cdot 0,0687 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{kWh}} \right] = 50.260 \left[\frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right]$$

Na Tabela 10 são mostrados os valores de referência para o cálculo do investimento e nas Tabelas 11 a 14 os valores calculados para o cenário 2, sendo que na Tabela 14 são destacados os resultados custos para o sistema PVAR no cenário 2, empregando uma taxa de juros de 12% ao ano. Os resultados do cálculo para as demais taxas de juros estão ilustrados no Apêndice C.

Facilitando os cálculos, os valores a serem investidos no economizador e no sistema solar térmico foram adicionados ao valor I_{cal2} , mostrado na Tabela 13.

Tabela 10 – Valores de referência para o cálculo de investimentos no cenário 2

Variável	Valor de referência
Potência instalada – solar térmica	63,70 [kW]
Investimento - solar térmica	982,00 [US\$/kW]
Investimento - solar térmica	63.570,00 [US\$]
Investimento - economizador	17.337,00 [US\$]
Reposição anual de peças	5% do investimento

Tabela 11 – Valores estimados para operação e manutenção anual da caldeira no cenário 2

Item	Custo (US\$)
Mão de Obra para operação	66.574,00
Tratamento químico	24.272,00
Inspeção anual	4.623,00
Peças reposição	8.304,00
Energia elétrica ⁽¹⁾	948,00
Total	104.721,00

⁽¹⁾ Energia elétrica consumida pelas bombas de recirculação do sistema de energia solar térmica.

Tabela 12 – Valores estimados para operação e manutenção anual do sistema de abrandamento no cenário 2

Item	Custo (US\$)
Mão de Obra para operação	16.644,00
Insumos	5.201,00
Peças de reposição	2.167,00
Água bruta	25.406,00
Total	49.418,00

Tabela 13 – Valores tomados como referência para o cálculo dos custos do sistema PVAR no cenário 2

Variável	Valor
N [h/ano]	8.200
C_{OMcal2} [US\$/kWh]	0,0056
C_{gn2} [US\$/kWh]	0,0687
C_{OMab2} [US\$/kWh]	0,0027
I_{cal2} [US\$]	210.907,00
I_{ab2} [US\$]	34.674,00
C_{ab2} [US\$/m ³]	5,1167

Tabela 14 – Valores dos custos para o sistema PVAR no cenário 2, com taxa de juros de 12% a.a

r	k	q	f	C_v (US\$/kWh)	C_{ab} (US\$/kWh)	C_{Mex} (US\$/kWh)
12%a.a	2	1,12	0,59	0,0850	0,0448	0,1324
12%a.a	4	1,12	0,33	0,0817	0,0261	0,1104
12%a.a	6	1,12	0,24	0,0806	0,0200	0,1032
12%a.a	8	1,12	0,20	0,0801	0,0170	0,0997
12%a.a	10	1,12	0,18	0,0798	0,0153	0,0977
12%a.a	12	1,12	0,16	0,0796	0,0142	0,0964
12%a.a	14	1,12	0,15	0,0795	0,0134	0,0955
12%a.a	16	1,12	0,14	0,0794	0,0129	0,0949
12%a.a	18	1,12	0,14	0,0793	0,0125	0,0944
12%a.a	20	1,12	0,13	0,0793	0,0122	0,0941

As Figuras 22, 23 e 24 ilustram as curvas de desempenho dos valores obtidos para os custos do vapor, da água abrandada e manufatura exergética do sistema estudado no cenário 2.

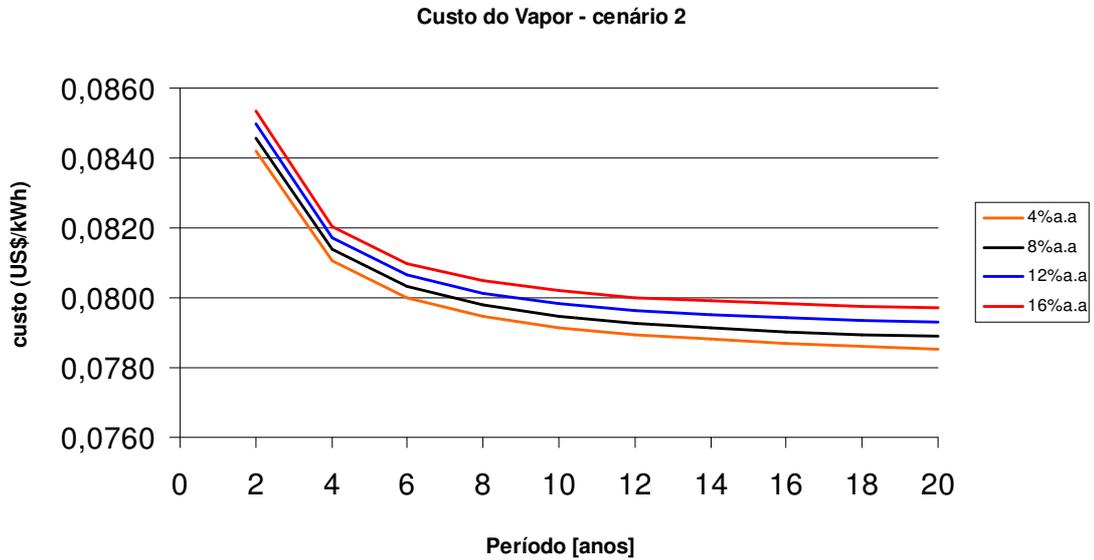


Figura 22 – Custos para produção de vapor do sistema PVAR no cenário 2

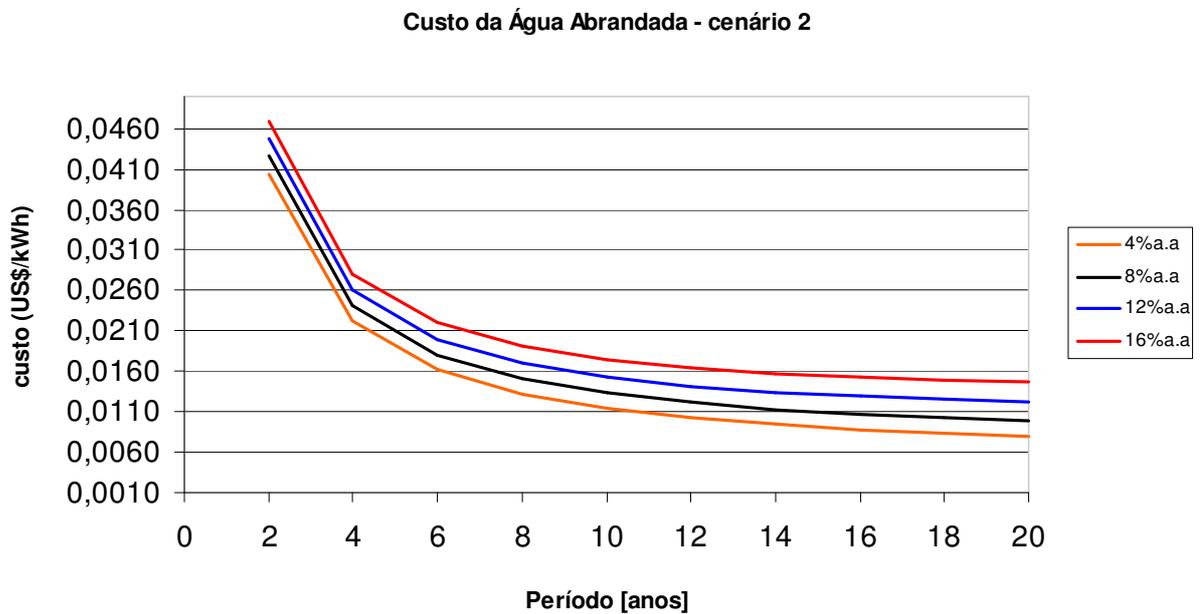


Figura 23 – Custos da água abrandada do sistema PVAR no cenário 2

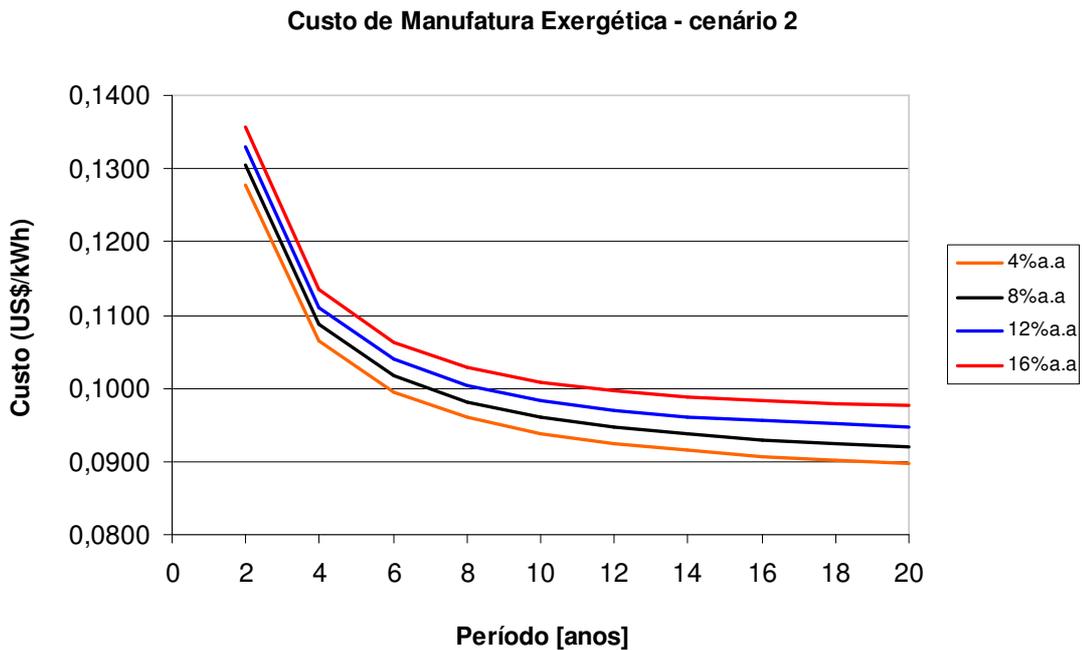


Figura 24 – Custos de manufatura exergético do sistema PVAR no Cenário 2

Analisando os gráficos de custos das Figuras 22, 23 e 24, verifica-se uma tendência muito similar para estabilização dos custos do vapor, da água abrandada e da manufatura exergética, situando esta estabilização em períodos de cerca de 8 anos. Esses gráficos possibilitam a comparação com a situação inicial, o que é analisado na sequência.

8.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS CENÁRIOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a implantação do sistema proposto, pode-se verificar que os custos de produção de vapor, US\$/kWh, decrescem em relação ao primeiro cenário, sem economizador e pré-aquecimento solar, conforme demonstra os gráficos de custo de vapor e de manufatura exergética apresentados nas Figuras 25, 26 e 27, sendo que a última tem como objetivo facilitar a visualização da diferença entre os dois cenários estudados ilustrando o custo de manufatura exergética em US\$/kWh.

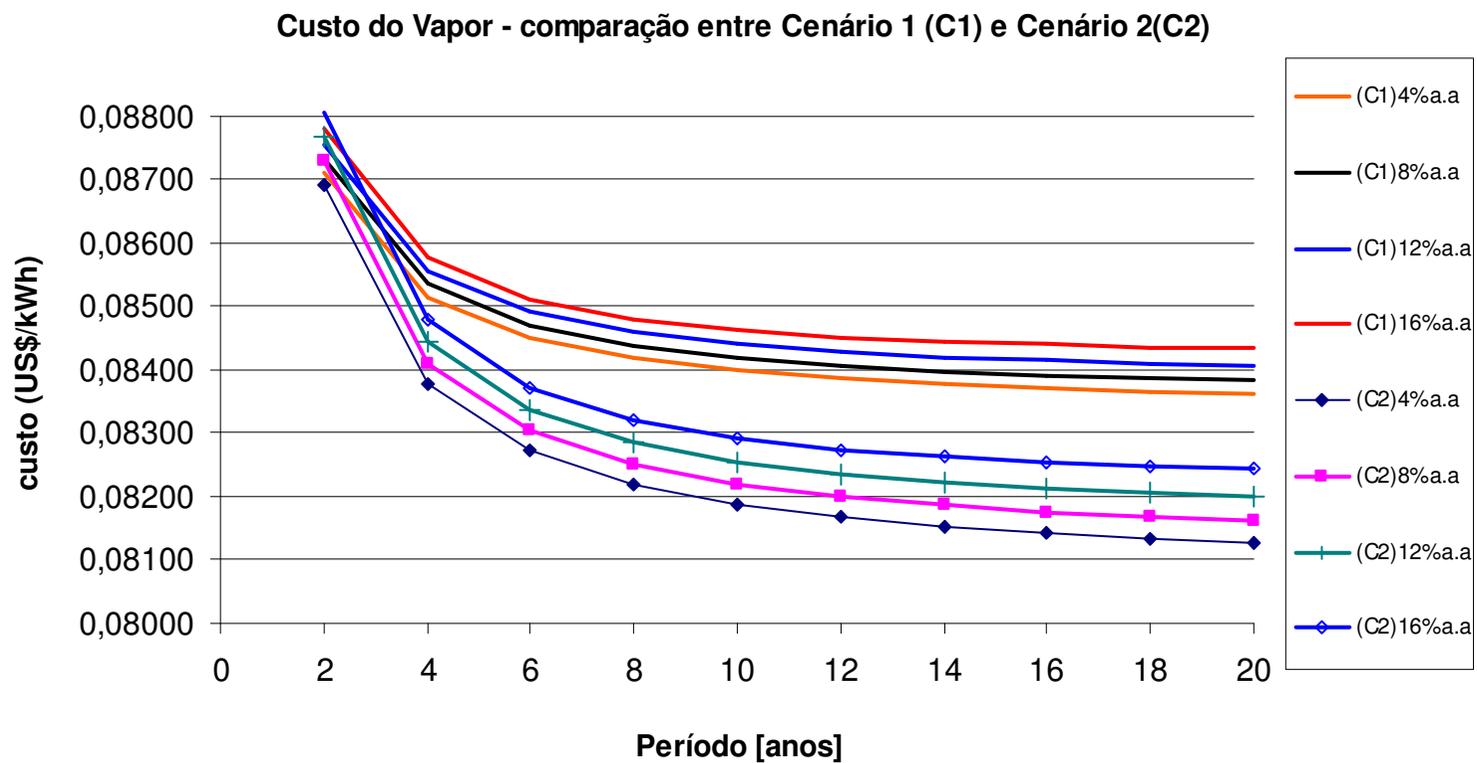


Figura 25 – Comparação de custos para produção de vapor do sistema PVAR nos dois cenários (C1 e C2)

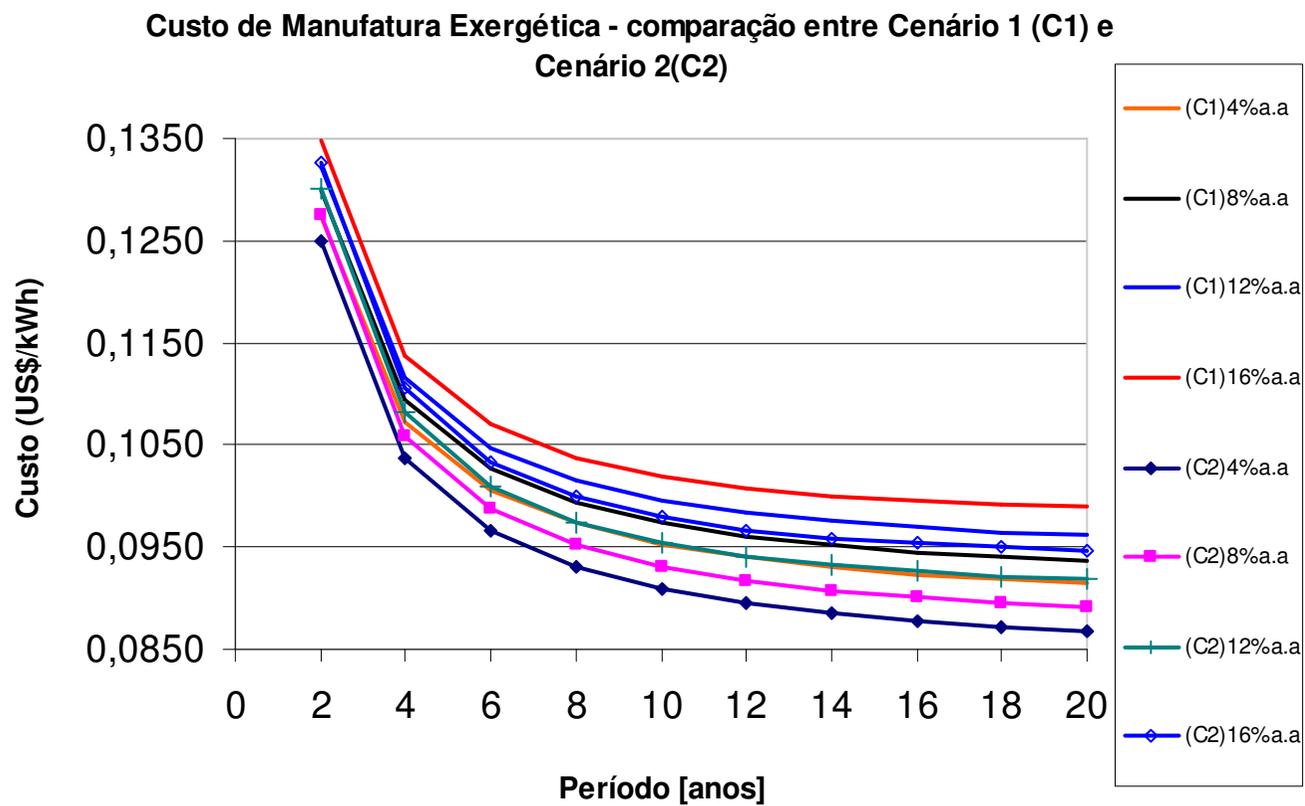


Figura 26 – Comparação de custos de manufatura exergética do sistema PVAR nos dois cenários (C1 e C2), em US\$/kWh

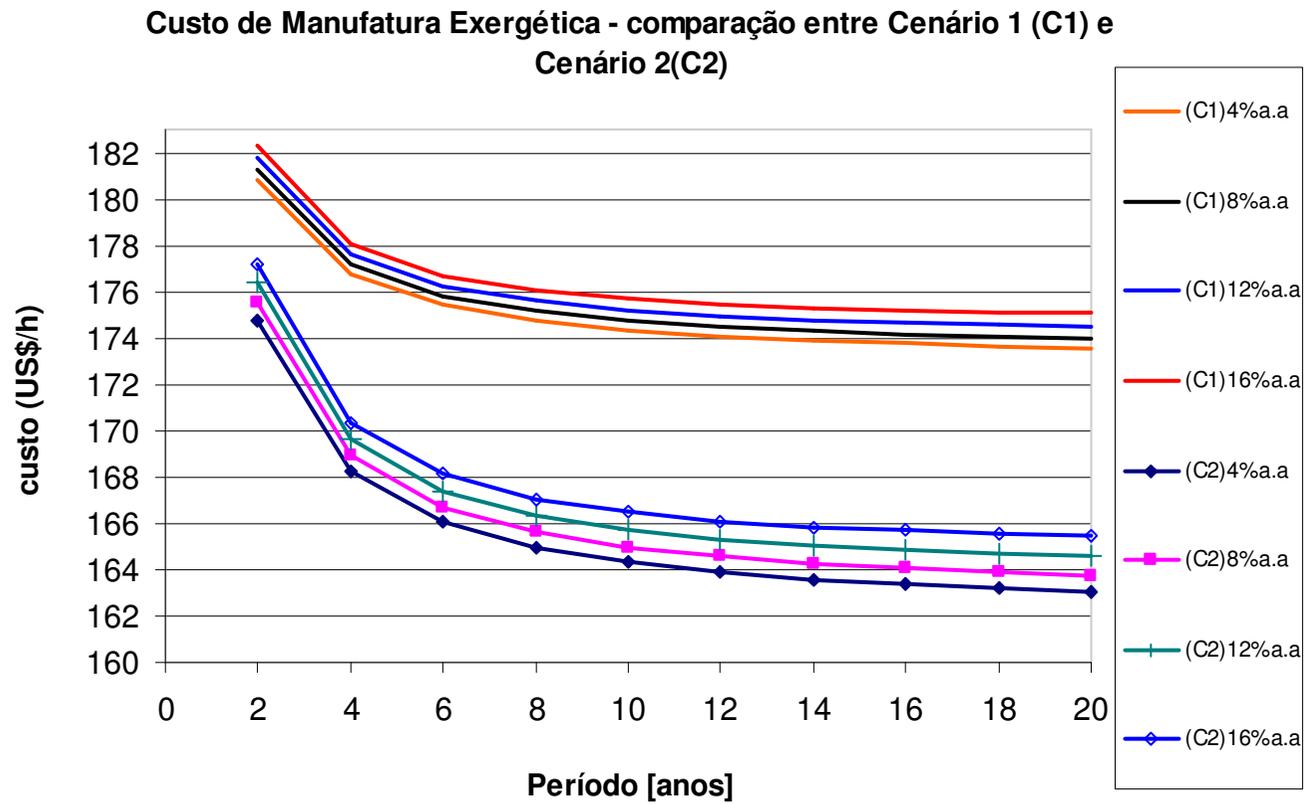


Figura 27 – Comparação de custos de manufatura exergético do sistema PVAR nos dois cenários (C1 e C2), em US\$/h

Uma vez que o sistema proposto para redução do consumo de energia não interfere nas condições do sistema de abrandamento, não há qualquer interferência no custo da água abrandada, prevalecendo para o cenário 2 (Figura 23) o mostrado na Figura 14.

Analisando os gráficos de custos das Figuras 25, 26 e 27, verifica-se novamente uma tendência muito similar para estabilização dos custos do vapor e da manufatura exergética em ambos os cenários, situando estas estabilizações em períodos superiores a 8 anos. Todavia, uma vez que se trata de um sistema em operação e investimento pago, deve-se também analisar o *payback* relativo ao investimento para redução do consumo de gás natural.

Aplicando as Equações (49) a (59) no Cenário 2, com $k = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5$ e 5 e $r = 4, 8, 12, 16\%$ a.a. obtêm-se os valores da Tabela 15, que resultam nos *paybacks* mostrados no gráfico da Figura 28. O complemento da Tabela 15, com o resultado do cálculo para as demais taxas de juros empregadas, pode ser observado no Apêndice D.

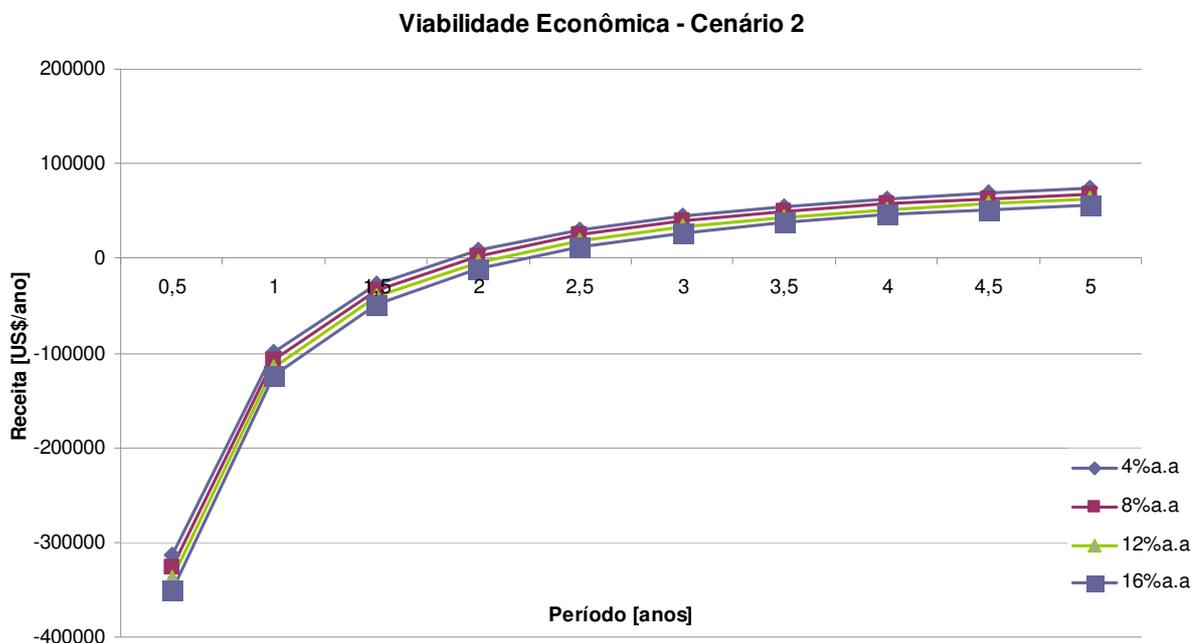


Figura 28 – Demonstração do retorno sobre o investimento para a redução do consumo de gás natural (cenário 2 em comparação ao cenário 1)

Tabela 15 – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados (cenário 2), com taxa de juros de 12% a.a

r	N (h/ano)	E _v (kW)	c _v (US\$/kWh)	P _v (US\$/kWh)	R (US\$/ano)
12%a.a	8.200	2.076	0,1049	0,0850	-338.477,18
12%a.a	8.200	2.076	0,0917	0,0850	-115.274,19
12%a.a	8.200	2.076	0,0874	0,0850	-40.952,76
12%a.a	8.200	2.076	0,0852	0,0850	-3.851,63
12%a.a	8.200	2.076	0,0839	0,0850	18.361,50
12%a.a	8.200	2.076	0,0830	0,0850	33.130,73
12%a.a	8.200	2.076	0,0824	0,0850	43.646,43
12%a.a	8.200	2.076	0,0819	0,0850	51.503,80
12%a.a	8.200	2.076	0,0816	0,0850	57.589,07
12%a.a	8.200	2.076	0,0813	0,0850	62.433,99

Contudo, uma vez que se trata de um sistema em operação e investimento pago, deve-se também analisar o *payback* relativo ao investimento para redução do consumo de gás natural.

Os valores de investimento no economizador e sistema solar térmico (Tabela 13), juntamente com a economia anual com gás natural, Equação (69), resultam em um *payback* de 19 meses, Equação (69). O resultado é mostrado no gráfico da Figura 29.

$$\text{payback} = \frac{(I_{\text{cal2}} - I_{\text{cal}})}{e_{\text{anual-gn}}} \left[\frac{\text{US\$}}{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right)} \right] \quad (69)$$

$$\text{payback} = \frac{(210.907,00 - 130.000,00)}{50.260,00} \left[\frac{\text{US\$}}{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{ano}} \right)} \right] = 1,6 \text{ ano} = 19 \text{ meses}$$

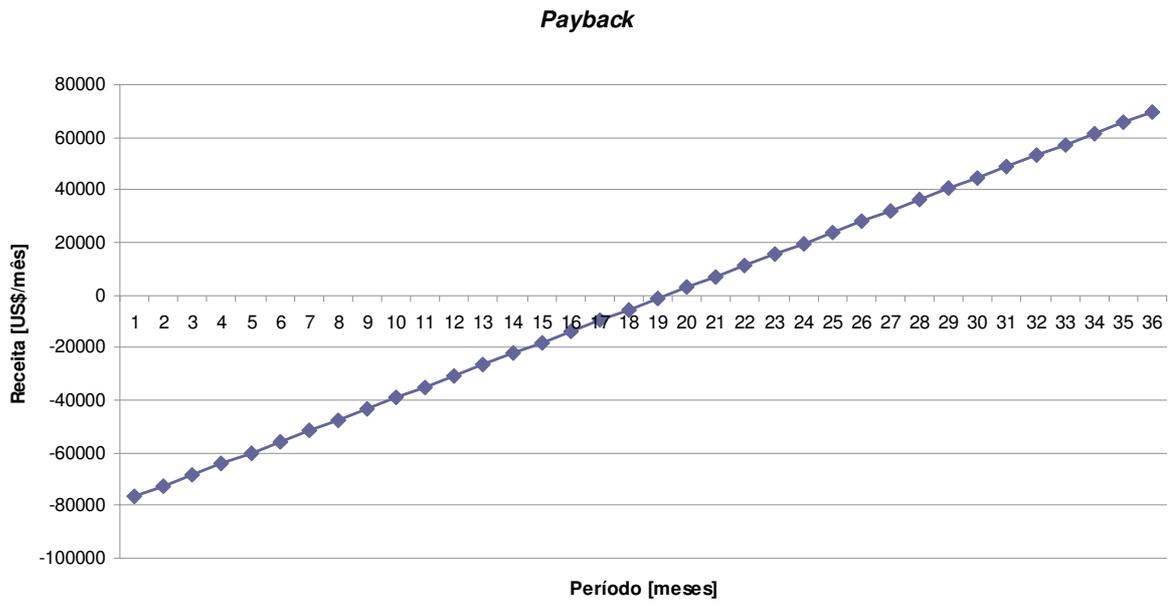


Figura 29 – Demonstração do retorno sobre o investimento para a redução do consumo de gás natural, considerando os demais investimentos pagos

CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES

Em função dos investimentos necessários e dos resultados esperados para economia de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, de gases de efeito estufa, além do prazo de retorno sobre o investimento, a solução estudada mostra-se atraente.

O presente estudo permite agora o acesso a uma metodologia para avaliar as diversas condições de custo e operação desse sistema. Adicionalmente, o método de análise aplicado mostrou que ao aproveitar a disponibilidade de energia presente na radiação solar e nos gases da caldeira é possível reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o consumo de energia. Tal redução permitirá uma recuperação do investimento em um período inferior a dois anos, sendo que não estão considerados nessa estimativa de *payback* os possíveis ganhos financeiros com créditos de carbono, o que pode fazer com que o retorno seja no mínimo mais rápido. Portanto, os ganhos podem ser resumidos em:

- Redução de cerca de 4% no consumo de gás natural, representado pela redução anual de 731.600 kWh de energia e, conseqüentemente, proporcionando uma economia de US\$50.260,00 no mesmo período;
- Redução da emissão anual de gases de efeito estufa em cerca de 150 tCO₂e.

Assim sendo, conclui-se que o presente trabalho contribui para a análise da viabilidade de emprego em processos industriais de uma fonte energia com grande disponibilidade, especialmente no Brasil e no processo especificamente estudado, e das vantagens competitivas ambientais representadas pela atuação sobre uma fonte com significativa contribuição para emissão de gases de efeito estufa e fortemente presente na matriz energética brasileira.

9.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Primeiramente, por ter se adotado para alguns parâmetros do sistema estudado cálculos baseados no desempenho de equipamentos, recomenda-se para trabalhos futuros que o sistema ora estudado seja analisado com dados de desempenho coletados diretamente na fonte.

Outro importante tema a ser estudado é a validação dos ganhos proporcionados pelos trocadores de calor conhecidos como economizadores de caldeira, estimados nesse estudo, e a avaliação da possibilidade de aproveitamento de outras correntes do sistema como as purgas de fundo (*blowdown*) e as perdas pelo *vent* do tanque de condensado. Outra recomendação de significativa contribuição é o estudo da viabilidade de substituição do sistema de produção de vapor estudado por sistemas solares industriais que operam sob elevadas temperaturas.

Por fim, outra análise relevante é análise financeira com base no comércio de créditos de carbono e sua adequação ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

REFERÊNCIAS

- AALBORG INDUSTRIES. **Catálogo de economizadores**. Disponível em <<http://www.aalborg-industries.com.br/general.php?ix=23>>. Acesso em 11 jan. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001: Sistemas da gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso**: Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação**: Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO AR CONDICIONADO VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **Dimensionamento de sistemas de aquecimento solar**. Disponível em <<http://www.abrava.com.br>>. Acesso em 10 jan. 2010.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Conversão de moedas**. Disponível em <<http://www.bcb.gov.br>>. Acesso em 17 out. 2009.
- BALESTIERI, J. A. P. **Notas de aula do curso Otimização de Sistemas Energéticos** – Programa Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP – FEG, 2007.
- BOGDANIC, A. M.; BUDIN, R.; SUTLOVIC, I. **Solar Energy System And Waste Heat Recovery in Industrial Process**. Worm Renewable Energy Congress VI (WREC2000), p. 1094-1097, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 28 mai. 2010.
- BRIZI, F. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: comparison between natural gas and biogas**. Università degli Studi di Perugia and São Paulo State University, São Paulo, 2002, 74 p.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – CEDAE. **Estrutura tarifária de agosto de 2009**. Disponível em: <<http://www.cedae.com.br/>>. Acesso em 17 out. 2009.
- COMPANHIA ESTADUAL DE GÁS – CEG-RIO. **Tarifa gás natural – consumidor industrial 10.001 a 50.000 m³/mês**. Disponível em:

- <http://portal.gasnatural.com/servlet/ContentServer?gnpage=4-60-2¢ralassetname=4-60-1-1-7-0>>. Acesso em 17 out. 2009.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL. **Energias Solar e Eólica: Estado Atual e Perspectivas no Brasil**. Energias Alternativas – BNDES. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em www.cresesb.cepel.br>. Acesso em 11 jan. 2010.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO e ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS. **Guia técnico ambiental da indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos**. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/producao_limpa/documentos/higiene.pdf>. Acesso em: 7 Jun. 2009.
- COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO - COMGAS. **Tarifas do gás natural canalizado**. Disponível em <http://www.comgas.com.br>>. Acesso em 10 jan. 2010.
- GLOBAL REPORTING INITIATIVE (GRI). **Guidelines on Sustainability Performance Reporting, Version 3.0**, 2006. Disponível em <http://www.globalreporting.org>>. Acesso em 20 abr. 2010.
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>>. Acesso em 09 jan. 2010.
- LAMAS, W. Q.; SILVEIRA, J. L.; GIACAGLIA, G. E. O.; REIS, L. O. M. Development of a methodology for cost determination of wastewater treatment based on functional diagram. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 10, p. 2061-2071, 2009.
- L'ORÉAL DE PARIS: **2005 Sustainable Development Report**. Disponível em www.loreal.fr>. Acesso em 20 dez. 2006.
- L'ORÉAL DE PARIS: **2008 Sustainable Development Report**. Disponível em www.loreal.fr>. Acesso em 30 jul. 2009.
- MARTINELLI JR, L.C. **Introdução às Máquinas Térmicas – Caldeiras**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 1998. Disponível em: <http://www.martinelli.eng.br/> >. Acesso em 09 jan. 2010.

- PELLEGRINI, L.F., COSTA, R.P., OLIVEIRA JUNIOR, S. **A Atribuição de Custos em Sistemas Energéticos: A Termoeconomia como base de cálculo.** In: XXV ENEGEP - Encontro Nacional de Engenheiros de Produção. Porto Alegre, 2005.
- PWB CALDEIRAS. **Tabela de preços.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <sergio.alencar@vivax.com.br>. Terça-feira, 8 de dezembro de 2009, 16:07.
- SÃO PAULO (Município). Lei Municipal Nº 14.459, de 3 de julho de 2007. **Diário Oficial [da] Cidade São Paulo.** São Paulo, 04 de julho de 2007.
- SILVEIRA, J.L; TUNA, C. E. **Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power system. Part 1. Progress in Energy and Combustion Science,** v. 29, n. 3, p. 479-485, 2003.
- SILVEIRA, J.L. **Uma contribuição para a modelagem termoeconômica: otimização da operação e do projeto de sistemas energéticos.** 1998. 60 f. Tese (Livre Docência em Termodinâmica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 1998.
- SZARGUT, J; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes.** New York: Hemisphere Publishing Co., 1988. 332 p.
- TIBA, C, Fraidenaich N, Moskowicz M, Cavalcanti ESC, Lyra FJM, Nogueira AMB. **Atlas Solarimétrico do Brasil,** CD-ROM, Editora Universitária da UFPE, ISBN 85-7315-188-9, 2003.
- TSATSARONIS, G. **Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. Progress in Energy and Combustion Science,** v. 19, n. 3, p. 227-257, 1993.
- TUNA, C. E. **Um método de análise exergoeconômica para otimização de sistemas energéticos.** 1999. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.
- WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica.** São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 577p.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE. **GHG Protocol toll for stationary combustion. Version 4.0.** Disponível em: <<http://www.ghgprotocol.org/calculation-tools/all-tools/>>. Acesso em 09 jan. 2010.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AALBORG INDUSTRIES. ECONOM.GIF. Altura: 221 pixels. Largura: 250 pixels. 33502 bytes. Formato GIFF. Disponível em <<http://www.aalborg-industries.com.br/img/econom.gif>>. Acesso em 10 jan. 2010.

HEATMEC INDÚSTRIA METALÚRGICA LTDA. 54.JPG. Altura: 212 pixels. Largura: 287 pixels. 34328 bytes. Formato JPG. Disponível em <<http://www.heatmec.com.br/images/equipamentos/54.jpg>>. Acesso em 10 jan. 2010.

STELLA RESINAS EQUIPAMENTOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA. NOT8.JPG. Altura: 536 pixels. Largura: 402 pixels. 268617 bytes. Formato JPG. Disponível em <<http://www.stellaresinas.com.br/noticias/images/NOT8.jpg>>. Acesso em 10 jan. 2010.

APÊNDICE A – Valores dos custos para o sistema PVAR

r	k	q	f	C_v (US\$/kWh)	C_{ab} (US\$/kWh)	C_{Mex} (US\$/kWh)
4%a.a	2	1,04	0,53	0,0871	0,0403	0,1274
4%a.a	4	1,04	0,28	0,0851	0,0222	0,1073
4%a.a	6	1,04	0,19	0,0845	0,0161	0,1006
4%a.a	8	1,04	0,15	0,0842	0,0131	0,0973
4%a.a	10	1,04	0,12	0,0840	0,0113	0,0953
4%a.a	12	1,04	0,11	0,0838	0,0101	0,0940
4%a.a	14	1,04	0,09	0,0837	0,0093	0,0931
4%a.a	16	1,04	0,09	0,0837	0,0087	0,0924
4%a.a	18	1,04	0,08	0,0836	0,0082	0,0918
4%a.a	20	1,04	0,07	0,0836	0,0078	0,0914
8%a.a	2	1,08	0,56	0,0873	0,0425	0,1298
8%a.a	4	1,08	0,30	0,0853	0,0240	0,1094
8%a.a	6	1,08	0,22	0,0847	0,0180	0,1027
8%a.a	8	1,08	0,17	0,0843	0,0149	0,0993
8%a.a	10	1,08	0,15	0,0842	0,0132	0,0974
8%a.a	12	1,08	0,13	0,0840	0,0120	0,0961
8%a.a	14	1,08	0,12	0,0839	0,0112	0,0952
8%a.a	16	1,08	0,11	0,0839	0,0106	0,0945
8%a.a	18	1,08	0,11	0,0838	0,0102	0,0940
8%a.a	20	1,08	0,10	0,0838	0,0098	0,0936

APÊNDICE A (PARTE 2) – Valores dos custos para o sistema PVAR

r	k	q	f	C_v (US\$/kWh)	C_{ab} (US\$/kWh)	C_{Mex} (US\$/kWh)
12%a.a	2	1,12	0,59	0,0875	0,0447	0,1322
12%a.a	4	1,12	0,33	0,0855	0,0260	0,1116
12%a.a	6	1,12	0,24	0,0849	0,0199	0,1048
12%a.a	8	1,12	0,20	0,0846	0,0169	0,1015
12%a.a	10	1,12	0,18	0,0844	0,0152	0,0996
12%a.a	12	1,12	0,16	0,0842	0,0141	0,0983
12%a.a	14	1,12	0,15	0,0842	0,0133	0,0975
12%a.a	16	1,12	0,14	0,0841	0,0128	0,0969
12%a.a	18	1,12	0,14	0,0841	0,0124	0,0965
12%a.a	20	1,12	0,13	0,0840	0,0121	0,0962
16%a.a	2	1,16	0,62	0,0878	0,0469	0,1347
16%a.a	4	1,16	0,36	0,0857	0,0280	0,1138
16%a.a	6	1,16	0,27	0,0851	0,0219	0,1070
16%a.a	8	1,16	0,23	0,0848	0,0189	0,1038
16%a.a	10	1,16	0,21	0,0846	0,0173	0,1019
16%a.a	12	1,16	0,19	0,0845	0,0163	0,1008
16%a.a	14	1,16	0,18	0,0844	0,0156	0,1000
16%a.a	16	1,16	0,18	0,0844	0,0151	0,0995
16%a.a	18	1,16	0,17	0,0843	0,0148	0,0992
16%a.a	20	1,16	0,17	0,0843	0,0146	0,0989

APÊNDICE B – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados

r	k	N (h/ano)	E _v (kW)	C _v (US\$/kWh)	P _v (US\$/kWh)	R (US\$/ano)
4%a.a	2	8.200	2.076	0,0871	0,084967858	-36.285,22
4%a.a	4	8.200	2.076	0,0852	0,084967858	-3.173,43
4%a.a	6	8.200	2.076	0,0845	0,084967858	7.841,23
4%a.a	8	8.200	2.076	0,0842	0,084967858	13.331,66
4%a.a	10	8.200	2.076	0,0840	0,084967858	16.612,45
4%a.a	12	8.200	2.076	0,0839	0,084967858	18.788,49
4%a.a	14	8.200	2.076	0,0838	0,084967858	20.333,31
4%a.a	16	8.200	2.076	0,0837	0,084967858	21.483,67
4%a.a	18	8.200	2.076	0,0837	0,084967858	22.371,14
4%a.a	20	8.200	2.076	0,0836	0,084967858	23.074,65
8%a.a	2	8.200	2.076	0,0873	0,084967858	-40.259,73
8%a.a	4	8.200	2.076	0,0854	0,084967858	-6.609,43
8%a.a	6	8.200	2.076	0,0847	0,084967858	4.519,27
8%a.a	8	8.200	2.076	0,0844	0,084967858	10.018,35
8%a.a	10	8.200	2.076	0,0842	0,084967858	13.266,44
8%a.a	12	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	15.389,92
8%a.a	14	8.200	2.076	0,0840	0,084967858	16.871,68
8%a.a	16	8.200	2.076	0,0839	0,084967858	17.953,28
8%a.a	18	8.200	2.076	0,0839	0,084967858	18.769,00
8%a.a	20	8.200	2.076	0,0838	0,084967858	19.399,49

APÊNDICE B (PARTE 2) – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados

r	k	N (h/ano)	E_v (kW)	c_v (US\$/kWh)	P_v (US\$/kWh)	R (US\$/ano)
12%a.a	2	8.200	2.076	0,0876	0,084967858	-44.280,48
12%a.a	4	8.200	2.076	0,0856	0,084967858	-10.160,20
12%a.a	6	8.200	2.076	0,0849	0,084967858	1.020,93
12%a.a	8	8.200	2.076	0,0846	0,084967858	6.470,90
12%a.a	10	8.200	2.076	0,0844	0,084967858	9.632,33
12%a.a	12	8.200	2.076	0,0843	0,084967858	11.653,49
12%a.a	14	8.200	2.076	0,0842	0,084967858	13.027,01
12%a.a	16	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	13.999,57
12%a.a	18	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	14.708,42
12%a.a	20	8.200	2.076	0,0841	0,084967858	15.236,03
16%a.a	2	8.200	2.076	0,0878	0,084967858	-48.344,91
16%a.a	4	8.200	2.076	0,0858	0,084967858	-13.818,49
16%a.a	6	8.200	2.076	0,0851	0,084967858	-2.640,41
16%a.a	8	8.200	2.076	0,0848	0,084967858	2.711,12
16%a.a	10	8.200	2.076	0,0846	0,084967858	5.743,13
16%a.a	12	8.200	2.076	0,0845	0,084967858	7.626,36
16%a.a	14	8.200	2.076	0,0844	0,084967858	8.863,54
16%a.a	16	8.200	2.076	0,0844	0,084967858	9.706,50
16%a.a	18	8.200	2.076	0,0844	0,084967858	10.295,24
16%a.a	20	8.200	2.076	0,0843	0,084967858	10.713,56

APÊNDICE C – Valores dos custos para o sistema PVAR no cenário 2

r	k	q	f	C _v (US\$/kWh)	C _{ab} (US\$/kWh)	C _{Mex} (US\$/kWh)
4%a.a	2	1,04	0,53	0,0842	0,0404	0,1272
4%a.a	4	1,04	0,28	0,0810	0,0223	0,1059
4%a.a	6	1,04	0,19	0,0800	0,0162	0,0989
4%a.a	8	1,04	0,15	0,0795	0,0132	0,0953
4%a.a	10	1,04	0,12	0,0792	0,0114	0,0932
4%a.a	12	1,04	0,11	0,0790	0,0102	0,0918
4%a.a	14	1,04	0,09	0,0788	0,0094	0,0908
4%a.a	16	1,04	0,09	0,0787	0,0088	0,0901
4%a.a	18	1,04	0,08	0,0786	0,0083	0,0895
4%a.a	20	1,04	0,07	0,0785	0,0079	0,0891
8%a.a	2	1,08	0,56	0,0846	0,0426	0,1298
8%a.a	4	1,08	0,30	0,0814	0,0242	0,1081
8%a.a	6	1,08	0,22	0,0803	0,0181	0,1010
8%a.a	8	1,08	0,17	0,0798	0,0150	0,0975
8%a.a	10	1,08	0,15	0,0795	0,0133	0,0954
8%a.a	12	1,08	0,13	0,0793	0,0121	0,0940
8%a.a	14	1,08	0,12	0,0791	0,0113	0,0931
8%a.a	16	1,08	0,11	0,0790	0,0107	0,0924
8%a.a	18	1,08	0,11	0,0790	0,0103	0,0918
8%a.a	20	1,08	0,10	0,0789	0,0099	0,0914

APÊNDICE C (PARTE 2) – Valores dos custos para o sistema PVAR no cenário 2

r	k	q	f	C _v (US\$/kWh)	C _{ab} (US\$/kWh)	C _{Mex} (US\$/kWh)
12%a.a	2	1,12	0,59	0,0850	0,0448	0,1324
12%a.a	4	1,12	0,33	0,0817	0,0261	0,1104
12%a.a	6	1,12	0,24	0,0806	0,0200	0,1032
12%a.a	8	1,12	0,20	0,0801	0,0170	0,0997
12%a.a	10	1,12	0,18	0,0798	0,0153	0,0977
12%a.a	12	1,12	0,16	0,0796	0,0142	0,0964
12%a.a	14	1,12	0,15	0,0795	0,0134	0,0955
12%a.a	16	1,12	0,14	0,0794	0,0129	0,0949
12%a.a	18	1,12	0,14	0,0793	0,0125	0,0944
12%a.a	20	1,12	0,13	0,0793	0,0122	0,0941
16%a.a	2	1,16	0,62	0,0854	0,0470	0,1350
16%a.a	4	1,16	0,36	0,0821	0,0281	0,1128
16%a.a	6	1,16	0,27	0,0810	0,0220	0,1056
16%a.a	8	1,16	0,23	0,0805	0,0190	0,1022
16%a.a	10	1,16	0,21	0,0802	0,0174	0,1002
16%a.a	12	1,16	0,19	0,0800	0,0164	0,0990
16%a.a	14	1,16	0,18	0,0799	0,0157	0,0982
16%a.a	16	1,16	0,18	0,0798	0,0152	0,0977
16%a.a	18	1,16	0,17	0,0798	0,0149	0,0973
16%a.a	20	1,16	0,17	0,0797	0,0147	0,0970

APÊNDICE D – Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados (cenário 2)

r	N (h/ano)	E_v (kW)	c_v (US\$/kWh)	P_v (US\$/kWh)	R (US\$/ano)
4%a.a	8.200	2.076	0,1034	0,0850	-31.3485,41
4%a.a	8.200	2.076	0,0907	0,0850	-98.401,63
4%a.a	8.200	2.076	0,0865	0,0850	-26.716,23
4%a.a	8.200	2.076	0,0844	0,0850	9.119,58
4%a.a	8.200	2.076	0,0832	0,0850	30.615,56
4%a.a	8.200	2.076	0,0823	0,0850	44.941,62
4%a.a	8.200	2.076	0,0817	0,0850	55.170,58
4%a.a	8.200	2.076	0,0813	0,0850	62.838,87
4%a.a	8.200	2.076	0,0809	0,0850	68.800,03
4%a.a	8.200	2.076	0,0806	0,0850	73.566,22
8%a.a	8.200	2.076	0,1041	0,0850	-326.018,90
8%a.a	8.200	2.076	0,0912	0,0850	-106.837,91
8%a.a	8.200	2.076	0,0870	0,0850	-33.813,63
8%a.a	8.200	2.076	0,0848	0,0850	2.671,49
8%a.a	8.200	2.076	0,0835	0,0850	24.540,97
8%a.a	8.200	2.076	0,0827	0,0850	39.102,66
8%a.a	8.200	2.076	0,0821	0,0850	49.488,49
8%a.a	8.200	2.076	0,0816	0,0850	57.264,44
8%a.a	8.200	2.076	0,0812	0,0850	63.300,48
8%a.a	8.200	2.076	0,0810	0,0850	68.118,63

APÊNDICE D (PARTE 2)– Valores de receita do sistema PVAR para os períodos avaliados (cenário 2)

r	N (h/ano)	E_v (kW)	c_v (US\$/kWh)	P_v (US\$/kWh)	R (US\$/ano)
12%a.a	8.200	2.076	0,1049	0,0850	-338.477,18
12%a.a	8.200	2.076	0,0917	0,0850	-115.274,19
12%a.a	8.200	2.076	0,0874	0,0850	-40.952,76
12%a.a	8.200	2.076	0,0852	0,0850	-3.851,63
12%a.a	8.200	2.076	0,0839	0,0850	18.361,50
12%a.a	8.200	2.076	0,0830	0,0850	33.130,73
12%a.a	8.200	2.076	0,0824	0,0850	43.646,43
12%a.a	8.200	2.076	0,0819	0,0850	51.503,80
12%a.a	8.200	2.076	0,0816	0,0850	57.589,07
12%a.a	8.200	2.076	0,0813	0,0850	62.433,99
16%a.a	8.200	2.076	0,1056	0,0850	-350.864,26
16%a.a	8.200	2.076	0,0922	0,0850	-123.710,47
16%a.a	8.200	2.076	0,0878	0,0850	-48.131,35
16%a.a	8.200	2.076	0,0856	0,0850	-10.445,60
16%a.a	8.200	2.076	0,0843	0,0850	12.083,11
16%a.a	8.200	2.076	0,0834	0,0850	27.033,64
16%a.a	8.200	2.076	0,0828	0,0850	37.654,15
16%a.a	8.200	2.076	0,0823	0,0850	45.568,74
16%a.a	8.200	2.076	0,0819	0,0850	51.679,77
16%a.a	8.200	2.076	0,0816	0,0850	56.528,67