

FÁBIO ANTÔNIO FILIPINI

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS COMPLEXOS COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. George Stanescu

Co-orientadores:

Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera

CURITIBA

2002



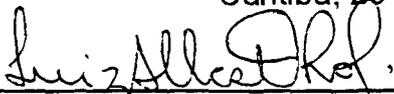
RELATÓRIO DE DEFESA DE MESTRADO

Aos vinte e cinco dias do mês de novembro de 2002, no Auditório do CESEC no Centro Politécnico – UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. David Alexander Mitchell, coordenador do PIPE – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, a Banca Examinadora para a trigésima oitava dissertação de Mestrado área de concentração: Energia e Ciências Térmicas. Estiveram presentes no Ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes.

A Banca Examinadora, atendendo determinação do Colegiado do Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, ficou constituída pelos professores doutores (a) **Luiz Alberto Oliveira Rocha** (FURG), **Sandro Amico**, (UFPR), **José Viriato Coelho Vargas** (UFPR), **Marcelo Risso Errera** (UFPR), **George Stanescu**. Às 13:30 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o(a) candidato(a) **Fábio Antonio Filipini** a fazer a apresentação da dissertação intitulada “Modelagem, Simulação e Otimização de Sistemas Complexos com Células de Combustíveis). Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes.

Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca atribuiu as seguintes notas: Prof. Dr. **Luiz Alberto Oliveira Rocha** Nota: 96 (noventa e seis), Prof. Dr. **Sandro Amico**, Nota: 90 (noventa). A média obtida: 93 (noventa e três), resulta na APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos Artigos 61,62,63,64 da Resolução 38/96 de 14.06.96), e corresponde ao conceito A/B/C/D.

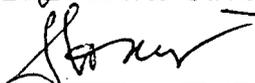
Curitiba, 25 de novembro de 2002.



Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha



Prof. Dr. Sandro Amico



Prof. Dr. George Stanescu



Prof. Dr. José Viriato C Vargas



Prof. Dr. Marcelo Risso Errera

Aos meus filhos, Iohanna e Johann.

A minha esposa, Adenil.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. George Stanescu, pelo exemplo como profissional e pela orientação desta dissertação.

Aos Profs. Drs. José Viriato Coelho Vargas e Marcelo Risso Errera, pelo fundamental acompanhamento e co-orientação.

Ao Prof. M.Sc. Marcos Carvalho de Campos e a Prof^a. Dr.^a Maria José Jeronimo de Santana Ponte pelo apoio e discussões sobre o tema.

À UFPR, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica, pela oportunidade a mim concedida.

Ao CNPq pelo suporte financeiro e ao projeto Agrogás (Finep/CTPETRO n.º 0660/01)

Aos colegas, professores e funcionários do Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE, pela colaboração na realização deste trabalho.

Qualquer caminho é apenas um caminho e não constitui insulto algum – para si mesmo ou para os outros – abandoná-lo quando assim ordena o seu coração. (...) Olhe cada caminho com cuidado e atenção. Tentem-no tantas vezes quantas julgar necessárias... Então, faça a si mesmo e apenas a si mesmo uma pergunta: possui esse caminho um coração? Em caso afirmativo, o caminho é bom. Caso contrário, esse caminho não possui importância alguma.

Carlos Castañeda, *Os ensinamentos de Dom Juan*

A essência do conhecimento é saber usá-lo.

Confúcio

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE GRÁFICOS	XVIII
RESUMO.....	XIX
<i>ABSTRACT</i>.....	XX
INTRODUÇÃO	21
CAPÍTULO 1 - UMA AVALIAÇÃO ESTRATÉGICA DA NECESSIDADE DE DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL	
1.1 Motivação	24
1.2 Razões para a diversificação da matriz energética nacional	26
1.2.1 Aspectos estratégicos	26
1.2.2 Serviços de energia	28
1.2.3 Otimização de sistema energético complexo.....	29
CAPÍTULO 2 - TECNOLOGIAS ATUAIS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E/OU TÉRMICA	
2.1 Aspectos de tecnologias aplicadas na geração de energia.....	33
2.2 Usina hidrelétrica.....	35
2.3 Motores térmicos	35
2.3.1 Usina termelétricas (ciclo Rankine, ciclo Brayton).....	35
2.3.2 Motores de combustão interna (ciclo Otto, ciclo Diesel)	36
2.3.3 Motores de combustão externa (ciclo Stirling).....	36
2.4 Centrais eólicas.....	36
2.5 Células de combustível.....	36
2.5.1 Histórico.....	36

2.5.2 Esquema básico da célula de combustível	39
2.5.3 Vantagens e limitações	41
2.5.4 Tipos de células de combustível	43
2.5.4.1 Célula de ácido fosfórico	43
2.5.4.2 Célula de eletrólito polimérico sólido	44
2.5.4.3 Célula alcalina	44
2.5.4.4 Célula de carbonato fundido.....	45
2.5.4.5 Célula de óxido sólido	45
2.5.5 Termodinâmica básica de célula de combustível	46
2.5.6 Cálculo da eficiência.....	48
2.5.6.1 Cálculo da eficiência ideal.....	48
2.5.6.2 Cálculo da eficiência real	49

CAPÍTULO 3 - ANEX – UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DE SISTEMAS COMPLEXOS

3.1 Metodologia da análise exergética e termoeconômica.....	54
3.2 Síntese da teoria do custo exergético.....	58
3.3 <i>ANEX</i> – um <i>software</i> para análise exergética e termoeconômica	62

CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE CO-GERAÇÃO OU TRIGERAÇÃO COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEIS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS

4.1 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25 TM C para o regime nominal de funcionamento (GEX-0).....	66
4.2 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25 TM C em regime de co-geração de energia elétrica e térmica (COGEX-Q).....	69
4.3 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25 TM C em regime de co-geração de energia elétrica e frio (COGEX-F).....	73
4.4 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25 TM C em regime de trigerção de energia elétrica, térmica (calor) e frio (TRIGEX-FQ).....	75
4.5 Resultados e conclusões da análise energética e exergética da célula de combustível PC25 TM C	79

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMONECONOMICA DE SISTEMAS AGRO-INDUSTRIAIS COMPLEXOS COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

5.1 Análise exergética e termoeconômica da planta de secagem de grãos de soja	85
---	----

5.1.1 Modelagem e simulação da planta de secagem de grãos de soja.....	85
5.1.2 Análise termoeconômica da planta de secagem.....	94
5.2 Análise exergetica e termoeconômica de sistemas complexos	106
5.2.1 Co-geração com uso direto de efluentes com microturbinas	106
5.2.2 Trigerção com uso indireto de efluentes com célula de combustível	114
 CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	
6.1 Considerações finais	124
6.2 Questões em aberto.....	125
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
 APÊNDICE A – ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA DE EQUIPAMENTOS E PROCESSOS INDUSTRIAIS – ANEX	
129	
A. Análise Exergetica e Termoeconômica de Equipamentos e Processos Industriais – ANEX	130
 APÊNDICE B – PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM	
134	
 ANEXO 1 – PLANILHA DE CAMPO PARA AVALIAÇÃO GLOBAL DE PLANTA INDUSTRIAL COM USO DO SOFTWARE ANEX.....	
146	
 ANEXO 2 – CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC - ONSI CORPORATION	
150	
 ANEXO 3 – DADOS TÉCNICOS DE EQUIPAMENTO FRIGORÍFICO WFC	
153	
 ANEXO 4 – PREMISSAS DE CUSTOS ECONÔMICOS PARA PC25TMC	
157	
 ANEXO 5 – DADOS TÉCNICOS DE SECADORES DE GRÃOS DE SOJA DE FLUXO CONTÍNUO	
159	
 ANEXO 6 – DADOS TÉCNICOS DE MICROTURBINAS – CAPSTONE CP-330	
163	

LISTA DE SÍMBOLOS

E	energia [J]
t	tempo [s]
\dot{Q}	taxa de transferência de calor [W]
\dot{W}	taxa de realização de trabalho ou potência (energia mecânica) [W]
\dot{m}	fluxo de massa, vazão de massa [kg/s]
\dot{n}	número de moles [kmol/s]
h	entalpia específica [J/kg]
V	volume [m ³]
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
z	altura [m]
u	energia interna específica [J/kg]
p	pressão [N/m ²]
v	volume específico [m ³ /kg]
W	trabalho [J]
Q	calor [J]
m	massa [kg]
U	energia interna [J]
H	entalpia [J]
\dot{S}_{gen}	taxa de geração de entropia [W/K]
S_{gen}	entropia gerada [J/K]
S	entropia [J/K]
s	entropia específica [J/kg.K]
T	temperatura [K]
h^0	meta entalpia [J/kg]
ΔG	energia livre de Gibbs [J]
ΔH	variação de entalpia [J]
ΔS	variação de entropia [J]

ΔG	variação da energia livre de Gibbs [J]
E_0	força eletromotriz ideal [V]
E_r	força eletromotriz da célula [V]
n_e	número de elétrons por uma molécula ou íon
F	constante de Faraday [C/mol]
e	carga elétrica [C]
n	número de sistemas
m	número de fluxos do sistema
\mathbf{A}	matriz de incidência de um sistema ($n \times m$)
\mathbf{A}	matriz de custos de um sistema ($m \times m$)
\mathbf{B}	vetor exergia de fluxo do sistema ($m \times 1$) [kW]
\mathbf{B}^*	vetor custo exergetico de fluxo do sistema ($m \times 1$) [kW]
α	submatriz de produtos de um sistema [$(m-m) \times m$]
ω	vetor numérico associado a matriz α em quilowatts ($(m-n) \times 1$) [kW]
\mathbf{Y}^*	vetor de custo da amortização exergetica dos equipamentos ($n \times 1$) [kW]
\mathbf{Y}^*	vetor de custo da amortização exergetica de um sistema ($m \times 1$) [kW]
k^*	custo exergetico unitário [US\$/GJ]
c^*	custo termoeconômico unitário [US\$/GJ]
c	custo exergeticoeconômico unitário [US\$/GJ]
Π	custo termoeconômico ($m \times 1$) [US\$/s]
Z	vetor de amortização exergeticoeconômica dos equipamentos ($n \times 1$) [US\$/s]
Z	vetor de amortização exergeticoeconômica de um sistema ($m \times 1$) [US\$/s]
ω_z	vetor de valoração externa ($(m-n) \times 1$) [US\$/s]
Δp	perda de carga [N/m^2]
ρ	densidade [kg/m^3]
λ_f	excesso de ar
φ	umidade relativa
η_r	rendimento da câmara de resfriamento

η_m	rendimento da câmara de mistura
η_s	rendimento da câmara de secagem
η_e	rendimento energético global da planta
Ψ	custo termoeconômico da secagem de grãos de soja [US\$/t _{soja seca}]
e_x	exergia específica (kJ/kg)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CASCATA TÉRMICA CONVENCIONAL (MÁXIMA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA).....	27
FIGURA 2 – CASCATA TÉRMICA IDEAL (MÁXIMA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA).....	27
FIGURA 3 – EFICIÊNCIA DO USO FINAL EM SISTEMA DE BOMBEAMENTO	29
FIGURA 4 – ALGUNS PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA	30
FIGURA 5 – ESQUEMA ORIENTATIVO DA FUNÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO	34
FIGURA 6 – CONFIGURAÇÃO BÁSICA DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL ALCALINA.....	39
FIGURA 7 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL COM REFORMADOR.....	40
FIGURA 8 – AVALIAÇÃO GLOBAL DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.....	47
FIGURA 9 – CURVA TEÓRICA DE DIFERENTES CONTRIBUIÇÕES DA POLARIZAÇÃO	50
FIGURA 10 – CUSTOS PELA TEORIA DO CUSTO EXERGÉTICO	61
FIGURA 11 – ESTRUTURA FÍSICA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25 TM C.....	67
FIGURA 12 – ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25 TM C.....	68
FIGURA 13 – ESTRUTURA FÍSICA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	71

FIGURA 14 – PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL (TROCADOR DE CALOR HEX880).....	73
FIGURA 15 – ESTRUTURA FÍSICA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	74
FIGURA 16 - ESTRUTURA FÍSICA DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	77
FIGURA 17 – CENÁRIO DE OPERAÇÃO DA PC25 TM C	81
FIGURA 18 – EFICIÊNCIA DA ENERGIA DO GÁS NATURAL PARA DIVERSAS CONFIGURAÇÕES PARA A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C.....	82
FIGURA 19 – ESTRUTURA FÍSICA DO SISTEMA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA DE GRÃOS DE SOJA.....	86
FIGURA 20 – ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA DE GRÃOS DE SOJA PARA MODELAGEM.....	87
FIGURA 21 – ENTRADAS E SAÍDAS DO VOLUME DE CONTROLE 4 (CÂMARA DE RESFRIAMENTO).....	89
FIGURA 22 – ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA.....	95
FIGURA 23 – DIAGRAMA DE GRASSMANN PARA CONDIÇÃO DE PROJETO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM	98
FIGURA 24 – ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINAS.....	107
FIGURA 25 – ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA (AUTO-SUFICIÊNCIA EM ELETRICIDADE).....	109
FIGURA 26 – DIAGRAMA DE GRASSMANN PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA	111

FIGURA 27 – CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	115
FIGURA 28 – ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA.....	118
FIGURA 29 – DIAGRAMA DE GRASSMANN PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	120
FIGURA A.1 – TELA DE ENTRADA DE DADOS DO <i>ANEX</i>	130
FIGURA A.2 – PLANILHA DO MICROSOFT EXCEL PARA IMPORTAR RESULTADOS DO ARQUIVO “OUTPUT.TXT”.....	131
FIGURA A.3 – EXEMPLO COMPARATIVO DOS CUSTOS EXERGÉTICOS PARA A FORMAÇÃO DAS CORRENTES NOS NÍVEIS DE EXERGIA OBSERVADOS NUMA TERMELÉTRICA ATRAVÉS DO <i>ANEX</i>	132
FIGURA A.4 – EXEMPLO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA RACIONAL DE UMA TERMELÉTRICA DIVIDIDA NUMA SÉRIE DE TRÊS SUBSISTEMAS (CALDEIRA, CICLO E ALTERNADOR).....	133

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ECONÔMICA DAS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	33
TABELA 2 – IMPACTO AMBIENTAL DAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	42
TABELA 3 – TIPOS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL	43
TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO GÁS NATURAL UTILIZADO NA PC25 TM C.....	68
TABELA 5 – EQUIPAMENTOS E FLUXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA PC25 TM C.....	69
TABELA 6 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25 TM C	69
TABELA 7 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25 TM C	69
TABELA 8 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	70
TABELA 9 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	70
TABELA 10 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	72
TABELA 11 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	74
TABELA 12 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	75
TABELA 13 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	75

TABELA 14 - DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C 76	
TABELA 15 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	78
TABELA 16 - PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25 TM C	78
TABELA 17 – CUSTOS EXERGÉTICOS UNITÁRIOS PARA PC25 TM C.....	79
TABELA 18 – CUSTOS ECONÔMICOS UNITÁRIOS PARA PC25 TM C.....	79
TABELA 19 – EFEITOS ENERGÉTICOS ANUAIS PARA PC25 TM C.....	80
TABELA 20 – RECEITA ANUAL PARA PC25 TM C	80
TABELA 21 – CUSTO TOTAL ANUAL PARA PC25 TM C.....	80
TABELA 22 – CUSTOS LÍQUIDOS ESTIMADOS PARA PC25 TM C.....	80
TABELA 23 – EFEITOS ENERGÉTICOS ANUAIS PARA CENÁRIO DE OPERAÇÃO DA PC25 TM C	81
TABELA 24 – CUSTOS E RECEITAS PARA CENÁRIO DE OPERAÇÃO DA PC25 TM C.....	82
TABELA 25 – TEMPERATURA DE GASES DE COMBUSTÃO DO SISTEMA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA DE GRÃOS DE SOJA PARA MODELAGEM	88
TABELA 26 – DESEMPENHO DE VÁRIOS MODELOS DE SECADORES DE SOJA OBTIDOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM (CONDIÇÃO DE PROJETO).....	92
TABELA 27 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM	95
TABELA 28 – VAZÃO MÁSSICA E FLUXO DE ENERGIA E EXERGIA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM.....	96
TABELA 29 – RENDIMENTO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM	97

TABELA 30 – ANUALIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM	99
TABELA 31 – COMPARAÇÃO RACIONAL NO CUSTO DE SECAGEM DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM NA CONDIÇÃO DE PROJETO	105
TABELA 32 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA (AUTO-SUFICIÊNCIA EM ELETRICIDADE)	108
TABELA 33 – VAZÃO MASSICA, FLUXO DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA	110
TABELA 34 – RENDIMENTO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA	110
TABELA 35 – VALORES DA SIMULAÇÃO COM MÓDULOS DE EQUIPAMENTOS FRIGORÍFICOS WFC-10.....	116
TABELA 36 - DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA (AUTO-SUFICIÊNCIA EM ELETRICIDADE).....	118
TABELA 37 - VAZÃO MASSICA, FLUXO DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL	118
TABELA 38 – RENDIMENTO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS CÉLULA DE COMBUSTÍVEL.....	119
TABELA A.1 – EXEMPLO DO ARQUIVO DE SAÍDA DO ANEX (“OUTPUT.TXT”)FIGURA A.3.....	132

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – CONSUMO ESPECÍFICO COM A DIMINUIÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CÂMARA DE RESFRIAMENTO	94
GRÁFICO 2 – EXERGIA DESTRUÍDA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM.....	97
GRÁFICO 3 – EXERGIA E CUSTO EXERGÉTICO NA CONDIÇÃO DE PROJETO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM	101
GRÁFICO 4 – CUSTO EXERGÉTICO UNITÁRIO PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM ...	101
GRÁFICO 5 – CUSTO TERMOECONÔMICO PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM ...	102
GRÁFICO 6 – CUSTO TERMOECONÔMICO DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM FUNÇÃO DA EFICIÊNCIA GLOBAL DA PLANTA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NA CONDIÇÃO DE PROJETO	103
GRÁFICO 7 – COMPARATIVO RACIONAL DE CUSTO ESPECÍFICO DE SECAGEM DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NA CONDIÇÃO DE PROJETO....	105
GRÁFICO 8 – EXERGIA E CUSTO EXERGÉTICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA	113
GRÁFICO 9 – CUSTO TERMOECONÔMICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA	113
GRÁFICO 10 – EXERGIA E CUSTO EXERGÉTICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	122
GRÁFICO 11 – CUSTO TERMOECONÔMICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL.....	122

RESUMO

Durante um longo período de tempo, entre a revolução industrial e os meados do século XX, em termos tecnológicos e energéticos a civilização humana evoluiu baseado em sistemas (econômico, energético, industrial) relativamente simples. A partir dos anos 50, os avanços tecnológicos foram tão significativos que deixaram esses sistemas num nível de complexidade sem precedente até então. Esta dissertação apresenta uma metodologia completa de planejamento energético e de análise termoeconômica de plantas industriais (planilha de levantamentos de dados, modelagem da estrutura física para conversão em estrutura produtiva, definição da valoração econômica), junto com o desenvolvimento da ferramenta computacional (*ANEX*) para otimização de sistemas energéticos complexos. No trabalho são apresentados resultados da avaliação da viabilidade técnica e econômica de co-geração ou trigeração com células de combustíveis e uma análise exergetica e termoeconômica de sistemas agro-industriais com co-geração ou trigeração com células de combustíveis. As soluções apresentadas indicam ao consumidor final as melhores opções econômicas e técnicas para a compra e o uso de várias formas de energia e fornecem para as companhias de energia as melhores soluções de geração e venda.

ABSTRACT

For a long time, throughout the industrial revolution until the middle of the XX century, the humankind evolved in terms of technology and energy supply, based on relatively simple systems. Starting from the fifties, technological progress became so significant that left those systems in a level of an unprecedented complexity. This dissertation presents a complete methodology of energy planning and of thermoeconomic analysis for industrial plants (data sheets, conversion of the physical structure into a productive structure, definition of the economical value), and a software (*ANEX*) for optimization of complex energy systems. Results of the technical and economical evaluation of cogeneration or trigeneration (conversion is of a single fuel source into three useful energy products: electricity, steam or hot water, and chilled water) with fuels cells and of the exergetic and thermoeconomic analysis of agriculture-industrial systems with fuels cells are also presented. Solutions indicate to the final consumer the best economical and technical options for the purchase and the use of energy and they supply for the energy companies better solutions for generation and sale.

INTRODUÇÃO

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma ferramenta computacional (*ANEX*) para a otimização de sistemas energéticos complexos, baseada na Teoria de Custo Exergético. A ferramenta irá possibilitar o planejamento energético completo, de uma matriz energética englobando a necessidade não só de energia elétrica, mas também de energia térmica (calor e/ou frio). Essa nova metodologia de planejamento energético integra uma completa consideração das necessidades em termos de energia e ao mesmo tempo pode incluir custos ambientais e sociais, dentro da avaliação e da seleção de várias alternativas técnicas.

No primeiro capítulo dessa dissertação é discutida a necessidade de uma matriz energética nacional diversificada para produção de várias formas de energia e estratégias a serem consideradas futuramente no planejamento da matriz energética brasileira.

O segundo capítulo trata de tecnologias atuais para a geração de energia elétrica e/ou térmica, apresentando também diversos tipos de células de combustíveis, para melhor avaliação econômica e técnica da questão energética (conversão eficiente de formas de energia disponíveis na natureza em energia elétrica e/ou térmica), tanto do ponto de vista dos consumidores finais como das empresas de energia. Os resultados obtidos através da ferramenta computacional desenvolvida definem para o consumidor final as melhores opções econômicas e técnicas para a compra e o uso de várias formas de energia e fornecem para as companhias de energia as melhores soluções de geração e venda.

O terceiro capítulo apresenta a ferramenta computacional *ANEX* junto com uma metodologia completa de análise termoeconômica de plantas industriais (planilha de levantamentos de dados, modelagem da estrutura física para conversão em estrutura produtiva, definição da valoração econômica).

O quarto capítulo trata da avaliação da viabilidade técnica e econômica de co-geração ou trigeração com células a combustíveis comercialmente disponíveis. Este

capítulo apresenta os resultados da análise da tecnologia de células a combustíveis, obtidos através do *ANEX*, e a avaliação quantitativa do potencial de uso dessa tecnologia para co-geração ou trigeração.

No quinto capítulo desenvolve-se uma análise exérgica e termoeconômica de sistemas agro-industriais. O sistema estudado é uma planta de secagem de grãos de soja em fluxo contínuo, com capacidade de 100 t/h de soja seca (18% de umidade na entrada e 13% de umidade na saída), utilizando aproximadamente 4.000.000 kcal/h de energia térmica (calor) e 66 kW de energia elétrica, caracterizando a grande maioria das instalações deste tipo existente no Estado do Paraná. A utilização da ferramenta computacional permite avaliar os efeitos da introdução de novas tecnologias, objetivando aumentar tanto a eficiência energética/exérgica como a eficiência econômica de sistemas que usam simultaneamente mais de uma forma de energia. A viabilidade econômica das soluções propostas é analisada conforme as quatro estratégias de geração e comercialização de várias formas de energia: (1) auto-suficiência térmica (calor e/ou frio) ou elétrica, (2) co-geração para auto-suficiência térmica e geração parcial de energia elétrica, (3) co-geração ou trigeração para auto-suficiência térmica e elétrica e (4) co-geração ou trigeração para auto-suficiência térmica e geração excedente de energia elétrica.

No último capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho e algumas questões em aberto, relacionadas ao uso estratégico da metodologia proposta, para a diversificação da matriz energética e o gerenciamento da mesma com base em novos critérios de decisão (custo termoeconômico).

CAPÍTULO 1

UMA AVALIAÇÃO ESTRATÉGICA DA NECESSIDADE DE DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL

1.1 Motivação

Segundo o Banco Mundial, em 1987 o consumo de energia proveniente de fontes não-renováveis (petróleo, carvão, gás natural e nuclear) correspondeu a aproximadamente 91% do total nos países desenvolvidos e a 59% nos países em desenvolvimento. Como os primeiros são responsáveis por cerca de 73% da energia total consumida no mundo, conclui-se que cerca de 80% da energia hoje utilizada não é renovável. No balanço energético mundial de 1996, considerando-se a oferta de energia por fonte, pode-se verificar que 86% das fontes de energia são não-renováveis [1, 2].

Essa enorme dependência de fontes não-renováveis de energia tem acarretado, além de preocupação permanente com o esgotamento das fontes, a emissão de 5,8 bilhões de toneladas de carbono na atmosfera (dados de 1989), o que corresponde a aproximadamente 21 bilhões de toneladas de CO₂ (gás carbônico) e representa quase o dobro da quantidade emitida em 1965. Como consequência, o teor de gás de carbono (CO₂) na atmosfera tem aumentado progressivamente, levando muitos profissionais a acreditarem que o aumento da temperatura média da biosfera terrestre, observado já há algumas décadas, seja devido a um “efeito estufa” provocado por esse acréscimo de CO₂ e de outros gases, já denominados genericamente de “gases de efeito estufa”.

Estudos realizados em âmbito mundial para reduzir a taxa de crescimento da emissão de CO₂ na atmosfera têm apontado para uma série de procedimentos de curto, médio e longo prazo, que vão desde a substituição de combustível (muitos países estão implementando a estratégia de substituir o carvão e/ou derivados de petróleo pelo gás natural, procurando reduzir também a emissão dos demais poluentes associados a esses energéticos), passando pela introdução de medidas que tornam mais eficiente o uso da energia e pela criação progressiva de medidas legislativas de contenção de emissões nas grandes cidades, até investimentos pesados no desenvolvimento de fontes renováveis e na produção de combustíveis denominados “limpos”.

É forçoso admitir que a redução (ou diminuição do crescimento) dos

problemas ambientais causados pelo uso intensivo das fontes não-renováveis de energia pode ser feita através do aumento percentual da participação das fontes renováveis. Entretanto, um fator que precisa ser bem resolvido para que se obtenha êxito no incremento do uso das fontes renováveis é a impossibilidade de armazenamento da energia elétrica produzida. Por isso, a geração distribuída de energia é a opção prática para superar a dificuldade de armazenamento, além de ser, no futuro, a principal alternativa para a solução do planejamento energético.

Dentro deste contexto, as células de combustível são um interessante sistema que convertem a energia química de um combustível (e.g. H_2) e um oxidante (e.g. O_2) diretamente em energia elétrica, apresentando inúmeras vantagens, tais como: alta eficiência, modularidade, operação limpa e silenciosa, resposta rápida de carga, confiabilidade, manutenção reduzida e flexibilidade quanto ao uso do combustível usado para a produção do H_2 .

O combustível (H_2) usado nas células pode ser produzido “in situ”, através da reforma de metanol, etanol, biomassa e outros combustíveis, ou utilizando a energia secundária fora do pico (energia produzida e geralmente não aproveitada) para a produção de hidrogênio através da eletrólise. A célula faz a reconversão da energia do H_2 em energia elétrica, produzindo água como único produto. Após o êxito dos programas espaciais americanos, existe grande interesse em promover aplicações terrestres das células de combustível como sistemas autônomos de geração de energia elétrica. Em particular, sistemas de pequeno porte (1-20 kW), funcionando com hidrogênio reformado e ar, encontram aplicação na geração de eletricidade em localidades remotas, em veículos elétricos híbridos, em que tais células se associam a baterias secundárias, em veículos pequenos, como fonte única, e em veículos elétricos de grande porte (ônibus) ou no fornecimento de energia elétrica doméstica para conjuntos integrados (hospitais, *shopping centers*, etc.) [2].

1.2 Razões para a diversificação da matriz energética nacional

1.2.1 Aspectos estratégicos

O planejamento energético deve ser uma atividade multidisciplinar em que sejam envolvidas áreas de sistemas tecnológicos e ecológicos, questões sociais e até política econômica.

A energia apresenta-se sob múltiplas formas, como a térmica, a mecânica, a química e a solar. No século passado, o planejamento energético considerava só a questão do abastecimento com energia elétrica, sem se preocupar com a eficiência total do uso das fontes de energia disponíveis (combustíveis fósseis ou energia hidráulica). Naquela época, as questões ambientais e as alterações climáticas globais ainda não precisavam ser abordadas [3].

Metodologias mais modernas, como o planejamento integrado de recursos energéticos, envolvem modelos de sistemas que fornecem serviços de energia considerando tanto a oferta quanto a alternativa de uso final (demanda) e os custos dessas alternativas. Dessa forma, a energia elétrica deixa de ser simplesmente uma mercadoria, transformando-se num “ingrediente” para o bem-estar da sociedade. Essa visão ampla considera o setor energético convencional incluindo também a oferta de energia. Assim, questões como eficiência energética e gerenciamento da demanda são extremamente importantes na busca de melhoria no planejamento energético [1].

A contribuição da metodologia apresentada neste trabalho é que a energia elétrica e a energia térmica (calor e/ou frio) são consideradas cada uma no nível de valoração conforme definido pelo mercado. A matriz energética é analisada à vista da necessidade de energia elétrica e térmica, com o objetivo de se definir a melhor solução do ponto de vista técnico-econômico, levando em consideração na avaliação e na seleção das alternativas tecnológicas uma ampla faixa dos componentes de custos, incluindo os ambientais e sociais. A figura 1 ilustra a cascata térmica convencional tendo como objetivo a máxima eficiência energética individual (simplicidade técnica e econômica isoladamente), enquanto que a figura 2 mostra uma cascata térmica ideal, otimizada do ponto de vista termoeconômico (visão integrada e redução dos custos).

FIGURA 1 – CASCATA TÉRMICA CONVENCIONAL (MÁXIMA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA)

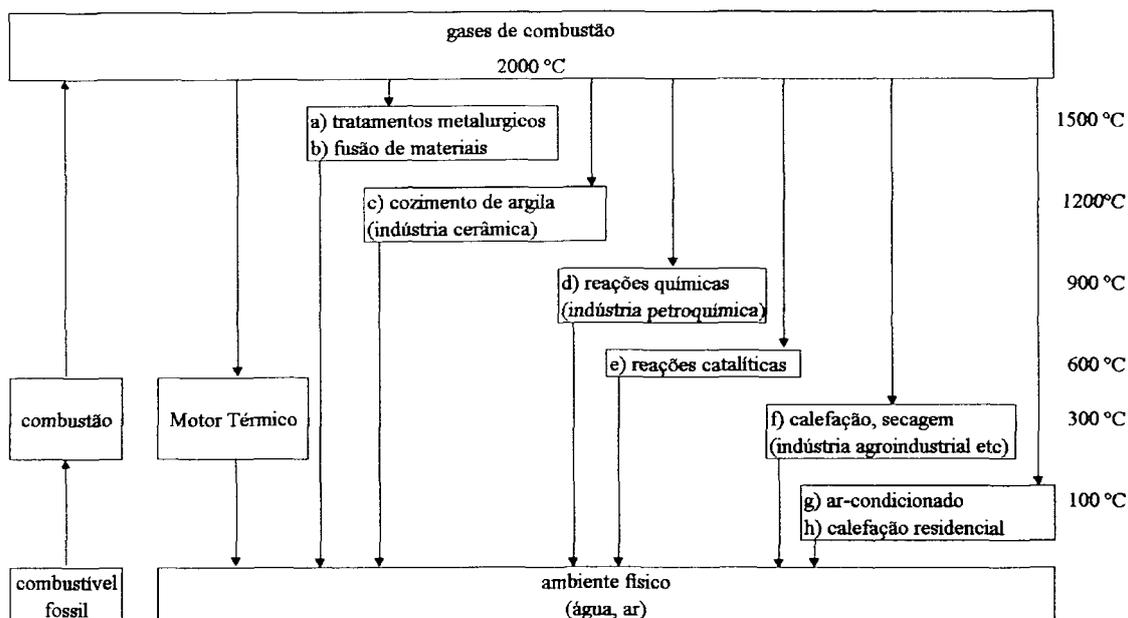
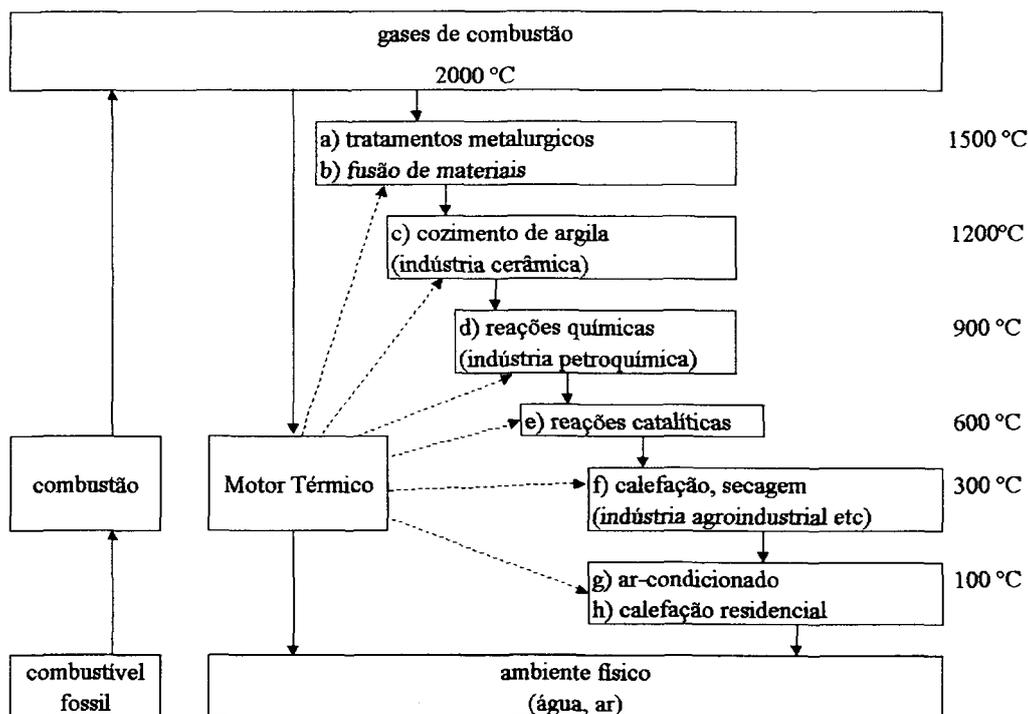


FIGURA 2 – CASCATA TÉRMICA IDEAL (MÁXIMA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA)



Ao longo deste século, a tendência mundial foi centralizar os sistemas elétricos, devido ao caráter determinante do fator de escala sobre os custos de geração. Isso acarretou problemas estratégicos, como o racionamento de energia elétrica no Brasil em 2001, pois na região sul do país havia energia elétrica que não podia ser transmitida para a região sudeste, por falta de sistemas de transmissão. O novo cenário mundial é que há necessidade de descentralização da geração de energia, de maior aplicação de fontes renováveis, de autoprodução energética e de geração distribuída. Nesse novo cenário, o aspecto geográfico é fundamental para a definição de estratégias energéticas, a fim de serem determinadas as formas de energia que são necessárias e que podem ser utilizadas na região.

1.2.2 Serviços de energia

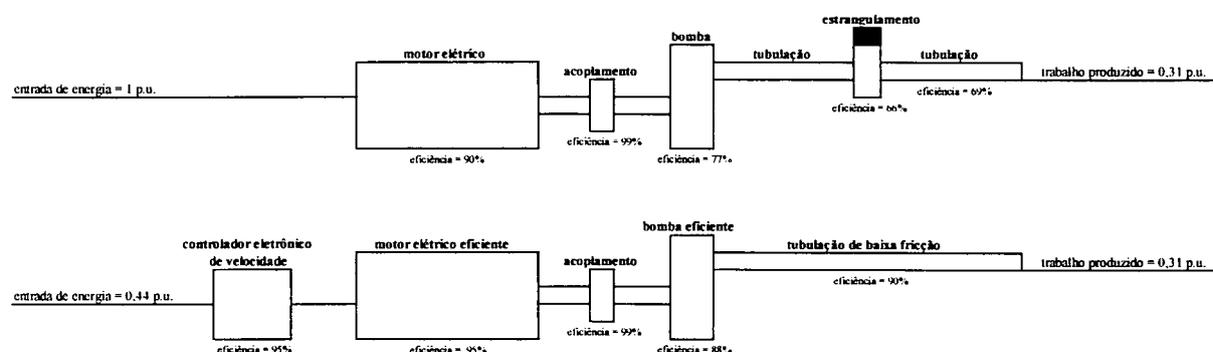
As fontes de energia podem ser classificadas como primárias e secundárias, ou como renováveis e não-renováveis. As fontes primárias têm origem em processos naturais (petróleo, carvão, gás natural, etc.), e as secundárias são a transformação destes (gasolina, eletricidade, etc.). Para efeito deste trabalho, entender-se-ão como fontes renováveis aquelas cuja utilização não causa variação significativa de seus potenciais e cujas reposições ocorrem a curto prazo. Como exemplo pode ser citada a energia eólica. Fontes não-renováveis são aquelas que possuem um tempo de reposição natural, cuja ocorrência pode demandar muitos séculos ou milênios, sob condições particulares.

O consumo final de energia é um dos três níveis que se pode ter para um sistema energético, sendo os outros níveis a produção e a conversão de fontes em combustíveis energéticos (considerando-se o armazenamento e a distribuição dos combustíveis).

As formas úteis de energia e os serviços de energia são obtidos após uma seqüência de eventos de transformação de várias formas de energia que ocorrem naturalmente com perdas. É de responsabilidade do planejamento energético projetar um sistema que procure reduzir, de maneira economicamente viável e ambientalmente segura, as perdas existentes.

A otimização dos serviços de energia pode ser obtida por melhoria técnica, que muitas vezes decorre de programas de combate ao desperdício de energia. A seguir, apresenta-se um exemplo de otimização do uso final da energia pela melhoria tecnológica.

FIGURA 3 – EFICIÊNCIA DO USO FINAL EM SISTEMA DE BOMBEAMENTO



Fonte: *Scientific American*, 1990.

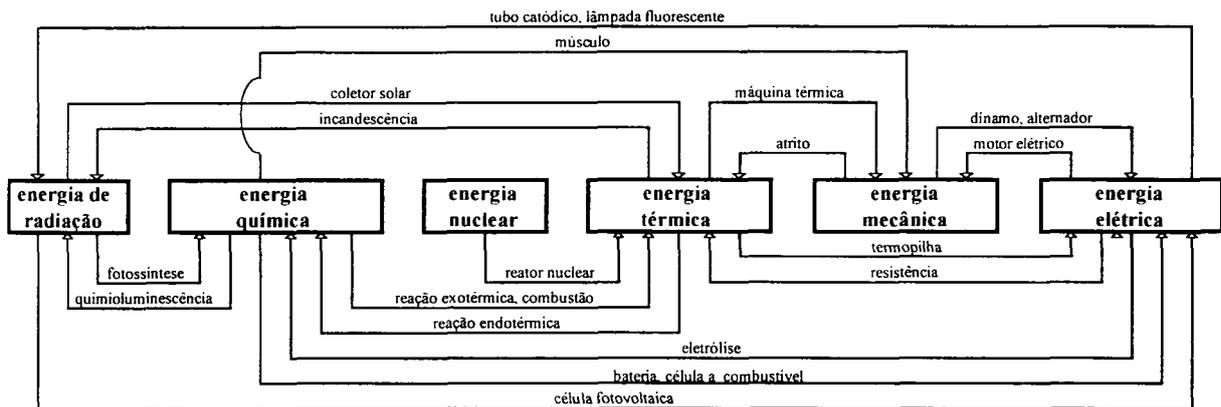
Num primeiro momento, conforme a figura 3, a eficiência energética é de 31%, porém, com a adoção de melhoria tecnológica, pode-se obter eficiência de 70%.

A melhoria tecnológica é apenas uma parte da otimização propriamente dita, pois se deve tratar a questão de forma mais abrangente. Por exemplo, um sistema de iluminação relativamente eficiente pode reduzir a demanda de energia elétrica de um prédio comercial, mas uma construção bem projetada poderia promover o mesmo serviço de energia (iluminação) com aproveitamento de iluminação natural, reduzindo ao mínimo a necessidade de energia elétrica.

1.2.3 Otimização de sistema energético complexo

Existem diversos processos de conversão de energia, sendo que muitos são processos naturais e outros somente podem ser realizados pelo homem. As conversões podem ocorrer de modo simples quando considerado um subsistema individual, e tornar-se complexa para um sistema completo onde se deseja atender as necessidades energéticas. A figura 4 apresenta as principais formas de conversão de energia [7].

FIGURA 4 – ALGUNS PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA



A otimização de sistema energético complexo tem como produto final o correto dimensionamento das necessidades de energia, considerando as formas disponíveis de energia e sua valoração (atribuição de custos).

A análise para a otimização de sistemas energéticos complexos é efetuada através dos seguintes métodos:

- minimização de geração de entropia;
- minimização da destruição de exergia (teorema de Gouy-Stodola);
- otimização termoeconômica.

O enfoque maior deste trabalho é a análise termoeconômica aplicada para a otimização de sistemas complexos, sendo que, para isso, não há como desagregar os diferentes métodos.

No primeiro momento, é necessária a identificação explícita do problema, com a definição de estratégias de desenvolvimento e planejamento. A solução do problema primário implica a formação de equipes que especifiquem a necessidade do sistema elaborando um plano de projeto. A questão é saber se a situação atual representa o ótimo do ponto de vista termoeconômico. O pré-diagnóstico sobre o problema primário tem que verificar o princípio de aumento de entropia quando consideradas as entradas e saídas no sistema, juntamente com as interações com o meio ambiente. A disponibilidade e a irreversibilidade do sistema devem ficar totalmente explícitas para a real identificação das alternativas para atender às necessidades.

A avaliação do plano de projeto define critérios e conceitos gerais a serem

utilizados para síntese, análise e otimização do sistema. É vital estabelecer como serão atendidas as necessidades do sistema, através de conceitos básicos e conceitos de análise exergetica e termoeconômica. Inclui-se nesse momento a integração de novas tecnologias ao sistema.

A avaliação do projeto leva ao detalhamento dos processos e equipamentos, com análise, dimensionamento, redução de custos e otimização do uso de energia. A implementação do projeto através da compra de equipamentos e montagem da infraestrutura, com a interação com o sistema, permite consolidar o projeto.

Após serem esclarecidas e atendidas as necessidades do sistema, através de *start-up* e operação, é necessária a avaliação da versão final do projeto, para consolidar o atendimento às necessidades [4, 5, 6].

Assim, a abordagem técnica para a otimização termoeconômica de sistemas complexos deve observar a seguinte metodologia básica:

1. desenvolvimento de um modelo físico-matemático para a definição do projeto;
2. simulação numérica e análise termoeconômica detalhada, baseada no modelo físico-matemático definido, com o objetivo de identificar as necessidades do sistema;
3. otimização individual e global (integrativa) dos componentes com custos significativos;
4. alteração do projeto, para otimizar a eficiência exergetica do sistema, aumentando a disponibilidade e reduzindo a irreversibilidade do sistema;
5. definição de novo projeto, com a incorporação das oportunidades de melhoria, sendo que a função objetivo deve ser avaliada até que o ponto ótimo do sistema seja atingido;
6. otimização das variáveis que apresentam alteração significativa no custo, mantendo-se a eficiência exergetica e a disponibilidade.
7. estudo paramétrico, para visualizar os efeitos sobre o regime de operação e validar o modelo adotado.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIAS ATUAIS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E/OU TÉRMICA

2.1 Aspectos de tecnologias aplicadas na geração de energia

Antes de iniciar as abordagens para algumas das diferentes tecnologias de produção de energia, cabe lembrar alguns aspectos históricos. Somente 50 anos depois das experiências de Michael Faraday e Joseph Henry é que foram obtidos geradores de energia elétrica comercialmente aproveitáveis. Em 1870, Thomas Edison inventou a lâmpada, e em 1872 ocorreu a construção da primeira central de energia elétrica com sistema de distribuição, contribuindo para a implantação da indústria do setor elétrico no final do século XIX.

Naquela época, dois pesquisadores divergiam sobre como se deveria proceder para a geração de energia elétrica: (1) Thomas Edison defendia a geração em usinas de pequeno porte, hoje dita geração distribuída, voltadas para o atendimento de mercados regionais; (2) George Westinghouse era a favor da construção de centrais de grande porte e o transporte da energia elétrica até os mercados consumidores através de redes de distribuição.

A tabela 1 compara economicamente algumas tecnologias de geração distribuída.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ECONÔMICA DAS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

	Motor a diesel	Motor a gás	Turbina a gás (ciclo simples)	Microturbinas	Célula de combustível
disponibilidade do produto	comercial	comercial	comercial	1999-2000	1996-2010
faixa de potência (kW)	20-10.000	50-50.000	1.000+	30-200	50-1.000+
eficiência energética (%)	36-43	28-37	21-41	25-33	35-63
custo do equipamento (US\$/kW)	125-300	250-600	300-600	350-750	1500-3000
custo total sem recuperação de calor (US\$/kW)	350-500	600-1.000	650-900	600-1100	1900-3500
custo de recuperação de calor (US\$/kW)	-	75-150	100-200	75-350	-
custo de operação e manutenção (US\$/kWh)	0,005-0,010	0,007-0,015	0,003-0,008	0,005-0,010	0,005-0,010

Fonte: *Gas Research Institute*, 1999. [8, 9]

A partir da década de 40, a geração em usinas de grande porte ficou mais acessível, reduzindo ainda mais o interesse dos consumidores pela geração local.

Como consequência, estagnou o desenvolvimento tecnológico desse tipo de geração.

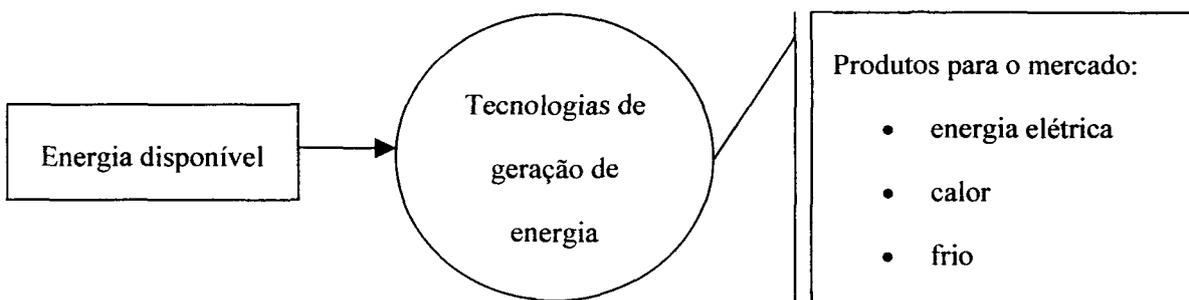
No Brasil, com o início da supressão do monopólio da geração de energia elétrica, em meados dos anos 80, o desenvolvimento de tecnologias voltou a ser incentivado, com resultados palpáveis na redução de custos.

Atualmente, prevalece a geração em usinas de grande porte, com redes de transmissão e distribuição que conduzem a energia elétrica aos mercados consumidores. A geração da energia térmica fica a cargo dos consumidores, ou seja, se uma indústria tem necessidade de vapor ela deve produzir em sua própria planta.

O perfeito entendimento das diversas tecnologias de produção de energia, aliado a uma metodologia que lhes possibilite atender às necessidades de mercado, pode gerar resultados otimizados, com maior valorização da geração distribuída na matriz energética existente. Quando se alia a tecnologia com todos os seus possíveis produtos, a necessidade de mercado (energia elétrica, frio, calor) propicia valores reduzidos para a energia elétrica gerada, principalmente quando ela for local, através da geração distribuída, além de outros produtos que representam mercadorias a serem comercializadas.

Algumas tecnologias de produção de energia apresentam como produto somente energia elétrica, e outras tecnologias (ou a otimização de uma tecnologia) fornecem também outros produtos, como calor e frio (energia térmica). Entre a energia disponível e os produtos necessários ao mercado temos quais tecnologias de geração de energia devem melhor ser apropriadas, e para isto é necessário ferramentas adequadas de otimização (figura 5).

FIGURA 5 – ESQUEMA ORIENTATIVO DA FUNÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO



2.2 Usina hidrelétrica

A energia elétrica de origem hidráulica é obtida através da transformação da energia disponível na energia potencial da água em energia elétrica, sendo somente esse o seu produto. O Brasil é um dos líderes mundiais em construções de usinas e está entre os 20 países que têm 95% de sua matriz energética baseada na hidreletricidade. O potencial do país é de 260 GW, dos quais cerca de 25% estão sendo utilizados na produção de energia elétrica em usinas de médio e grande porte e nas pequenas centrais hidrelétricas (PCH's). A região norte do país tem a maior reserva para geração (114 GW ou 44%), enquanto a região nordeste tem apenas 10% deste total (26 GW). Os custos do potencial hídrico não-utilizado ainda são competitivos, mesmo incluindo-se os custos de transmissão e distribuição. O Brasil possui uma tarifa atual média industrial de energia elétrica de US\$ 39,00/MWh.

2.3 Motores térmicos

2.3.1 Usina termelétrica (ciclo Rankine, ciclo Brayton)

Utiliza a energia química de combustíveis disponíveis (lenha, carvão, petróleo, gás natural, etc.) para a produção, principalmente, de energia elétrica. A energia térmica, que é resultado da combustão, pode ser convertida em energia mecânica que passa a produzir energia elétrica através de geradores.

Dentre os tipos de usinas termelétricas, tem-se as microturbinas a gás. Sua eficiência, relativo ao uso da energia do combustível, varia de 17% a 30%, dependendo da sua configuração. Quando se usa um recuperador de calor do gás de exaustão, esses valores ficam na faixa de 25% a 30%. No caso de aplicações em co-geração, a eficiência pode alcançar valores acima de 80%. A maior eficiência só pode ser alcançada por meio do aumento significativo da temperatura em que a máquina opera.

2.3.2 Motores de combustão interna (ciclo Otto, ciclo Diesel)

Utilizam a energia química de combustíveis (petróleo, gás natural, etc.) para, através de energia mecânica, produzir energia elétrica, ou até mesmo somente a energia mecânica (veículos automotivos). São tecnologias convencionais dominantes, principalmente no mercado de energia emergencial, devido ao baixo custo de investimento inicial e à grande disponibilidade do óleo combustível.

2.3.3 Motores de combustão externa (ciclo Stirling)

Pode utilizar a energia química de energéticos alternativos (lixo urbano, resíduos agrícolas, etc.) para a produção de energia elétrica através de combustão externa. Na referência bibliográfica [10], apresenta-se em detalhes o ciclo Stirling, bem como sua associação com o ciclo Rankine e outros.

2.4 Centrais eólicas

A energia eólica é abundante, renovável, limpa e disponível. A sua utilização para a geração de eletricidade em escala comercial começou nos anos 70, quando se acentuou a crise do petróleo no mundo. Os Estados Unidos e alguns países da Europa se interessaram pelo desenvolvimento de fontes alternativas para produção de energia elétrica, buscando diminuir a dependência do petróleo e do carvão.

Existem mais de 30 mil turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. O Comitê Internacional de Mudanças Climáticas projeta a instalação de 30.000 MW até o ano 2.030 [11].

2.5 Células de combustível

2.5.1 Histórico

As células de combustível são dispositivos que convertem parte da energia química liberada pela reação eletroquímica entre um combustível e um oxidante diretamente em energia elétrica. Esses dispositivos apresentam inúmeras vantagens em relação à tecnologia convencional [2].

A idéia das células de combustível vem de longa data, sendo que um gerador desse tipo foi concebido em 1801, na Inglaterra [12]. Nessa ocasião, foi construída, para gerar eletricidade, uma célula (pilha) de zinco e oxigênio que gera zincato de sódio. Somente no século XX foram dados alguns passos significativos no estudo e desenvolvimento dessas células.

Em 1839, William Grove observou que, quando o hidrogênio e o oxigênio eram fornecidos separadamente a dois eletrodos de platina imersos em solução de ácido sulfúrico, uma corrente elétrica era produzida em um circuito externo conectado aos eletrodos [13].

Siegl [14] foi o primeiro a produzir eletrodos com platina dispersa sobre partículas de carbono, e com essa experiência surgiram os eletrodos de difusão de gás, que são utilizados até hoje no desenvolvimento das células de combustível.

Eletrólitos fundidos foram utilizados pela primeira vez nesses dispositivos no século XIX. Ostwald teve a idéia de substituir motores térmicos por células eletroquímicas, nas quais se oxidaria o carbono a CO_2 e se reduziria o oxigênio [2].

No início do século passado, Nernst registrou uma patente para a construção de uma célula com eletrólito sólido [2].

Em consequência do grande sucesso dos geradores eletromecânicos, diminuíram os investimentos em pesquisas relativas a células de combustível, até a Segunda Guerra Mundial, quando se procurou desenvolver fontes de energia para a tecnologia de satélites. Davtyan publicou artigos sobre células de eletrólito sólido para alta temperatura, descrevendo pesquisas em que foi utilizado carbonato fundido e células de eletrólito alcalino de alta e baixa temperaturas [2].

Os estudos sobre células de combustível continuaram, porém, em nível científico, com contribuições de Nernst, Haber, Bauer e outros [2]. Enquanto a maioria dos trabalhos considerava a utilização do carvão como combustível, Bauer, em 1933, propôs a utilização do gás hidrogênio e gás oxigênio em uma célula que opera em meio alcalino. Nessa época, Francis T. Bacon, engenheiro inglês, interessou-se pelo assunto e resolveu executar um projeto que levasse as células de combustível a alguma utilização prática. Seu trabalho começou a obter sucesso na década de 50, com o

desenvolvimento dos eletrodos porosos de níquel, que proporcionavam bom rendimento às células alcalinas de alta pressão.

Kordesch e Marko, nessa época, desenvolveram na Universidade de Viena (Áustria) estudos semelhantes com eletrodos porosos de carbono e confirmaram a previsão de Bauer, viabilizando a operação das células alcalinas de baixa temperatura e pressão. Enquanto isso, na Holanda, G. H. Broens, baseando-se no trabalho do russo O. K. Davtyan, lançou as bases para o desenvolvimento de células de alta temperatura, usando carbonatos fundidos como eletrólito [2].

As décadas de 50 e 60 foram aquelas em que se observaram melhores condições para o desenvolvimento de novas tecnologias, à vista dos programas espaciais dos países desenvolvidos. Com isso, os estudos das células de combustível foram especialmente beneficiados.

Essa fase da tecnologia propiciou a primeira utilização prática destes conversores de energia, em naves espaciais, com uma célula de combustível construída a partir do modelo desenvolvido por Bacon. Essa célula foi responsável pela geração de toda a energia elétrica das naves do projeto Apollo. Essas foram as primeiras demonstrações dos princípios de funcionamento das células de combustível, que até 1930 ainda eram consideradas como mera curiosidade de laboratório.

Na década de 70, um impulso maior foi dado em decorrência do agravamento do problema energético mundial, em particular da crise do petróleo. Essa crise mobilizou a comunidade internacional, preocupada com os níveis alarmantes de poluição ambiental, que trouxeram à tona a necessidade de conversão eletroquímica da energia. Com isso, as células de combustível, que tinham tido excelente desempenho nas missões espaciais, mas cujo alto custo desestimulava qualquer tentativa de aplicação terrestre, começaram a ser estudadas e vistas como um sistema viável para aplicações em larga escala, por suas vantagens e características.

Para minimizar o problema do custo dessas células, têm sido levados em conta outros enfoques tecnológicos, bem como estudos de novos materiais. Nos EUA, órgãos como a NASA, o Exército, a Força Aérea e a Marinha investiram muito em estudos e desenvolvimento de projetos para a defesa do país ao longo dos anos da

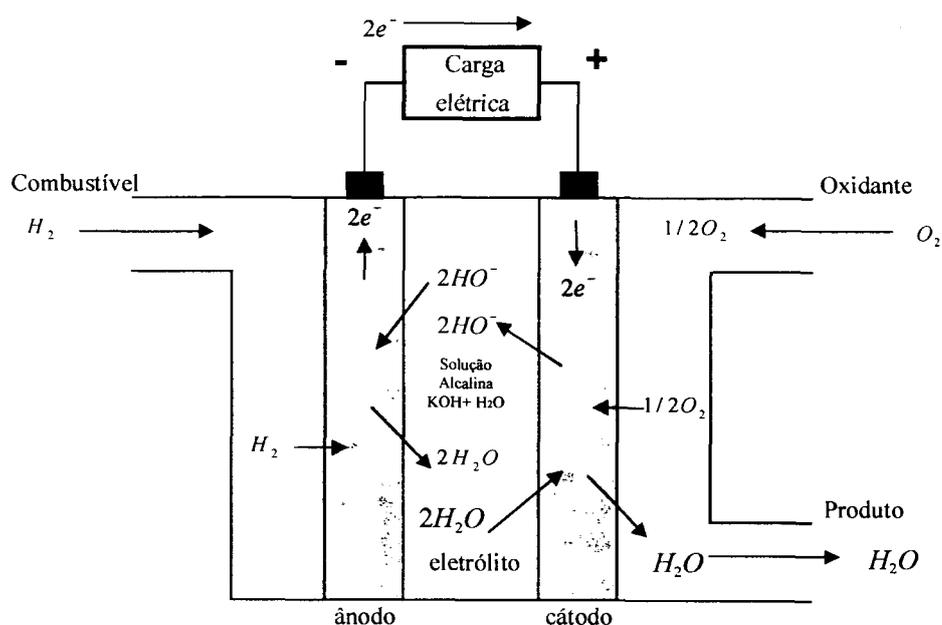
chamada Guerra Fria. Nesses projetos foi priorizada a Engenharia e Ciência de Materiais. Com o término da Guerra Fria, esses materiais, chamados de materiais avançados, foram direcionados para outras aplicações. Assim, alguns deles têm sido testados para uso em células de combustível.

Após o êxito dos programas espaciais norte-americanos, existe grande interesse em promover aplicações terrestres para as células de combustível, como sistemas autônomos de geração de energia elétrica.

2.5.2 Esquema básico da célula de combustível

A célula de combustível é composta de dois eletrodos (figura 6), separados por um eletrólito, que transporta os íons. À medida que os eletrodos são supridos com os gases reagentes (hidrogênio para o ânodo e oxigênio ou ar atmosférico para o cátodo), ocorre uma diferença de potencial entre eles, em circuito aberto, na ordem de 1,0 V [16, 17].

FIGURA 6 – CONFIGURAÇÃO BÁSICA DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL ALCALINA

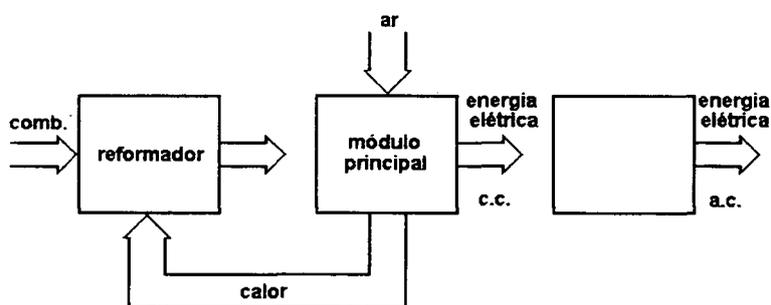


As reações de redução do oxigênio (RRO) e de oxidação do hidrogênio

(ROH) ocorrem em potenciais diferentes¹, o que permite a realização de um trabalho útil pelos elétrons envolvidos, desde que a configuração seja adequada. Na prática, essa configuração depende de vários fatores, tais como os reagentes usados, a temperatura de operação e o eletrólito empregado.

O hidrogênio utilizado para a alimentação das células pode ser produzido “in situ”, através da reforma do combustível. A figura 7 representa um diagrama de blocos de uma célula de combustível ácida. O combustível injetado para a reforma pode ser gás natural, metano, propano, nafta, metanol, etanol, etc.

FIGURA 7 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL COM REFORMADOR



O oxidante utilizado é o oxigênio puro ou o do próprio ar atmosférico. Além do reformador, uma configuração operacional básica de célula de combustível apresenta um módulo principal, onde ocorre a conversão de energia, bem como, dependendo do caso, um inversor, que transforma a energia elétrica de corrente contínua em corrente alternada, com a tensão e a frequência desejadas.

Um novo enfoque foi dado a esta tecnologia, e sistemas dos mais variados tipos e tamanhos têm sido estudados para aplicação em eletrificação de áreas remotas, sistemas de emergência, apoio ao sistema público em horários de pico de demanda, veículos elétricos, telecomunicações, sistemas industriais, etc.

¹ Por exemplo, para a célula de combustível alcalina tem-se RRO (ânodo): $\frac{1}{2}O_2 + 2.H_2O + 2e^- \rightarrow 2.OH^- + H_2O$ e ROH (cátodo): $H_2 + 2.OH^- \rightarrow 2.H_2O + 2e^-$.

As pesquisas relativas a células de combustível têm sido voltadas para o desempenho de módulos e protótipos, visando a uma variedade muito grande de aplicações, tais como:

- geração de eletricidade em alta escala;
- geração de eletricidade em estações remotas;
- utilização de subprodutos em indústrias (cloro, soda);
- aplicações em transportes (veículos);
- aplicações espaciais.

2.5.3 Vantagens e limitações

Apesar das inúmeras vantagens que as células apresentam, ainda são encontradas algumas limitações para a sua aplicação. Uma delas é a dificuldade armazenamento do combustível, por exemplo o hidrogênio, que apresenta o maior rendimento. Esta limitação tem sido contornada usando-se um processador de combustível que, através de um processo de reforma já bem conhecido [15], fornece um gás rico em hidrogênio para o funcionamento eficiente do sistema.

A vantagens básicas comuns a todos os sistema de células de combustível são sintetizadas a seguir:

1. Potencial para alta eficiência (50 a 70%);
2. “Quasi-zero” emissões;
3. Ausência de perdas móveis (exceto sistemas auxiliares);
4. Multi-combustíveis;
5. Recarga “quase-instantânea”.

Antes de haver a introdução bem sucedida no mercado, as seguintes limitações comuns a todos os sistemas de células de combustível devem ser superadas:

1. Materiais alternativos;
2. Custo de energia elétrica gerada para aplicações estacionárias;
3. Distribuição de combustível (hidrogênio);
4. Reforma de combustível;
5. Tempo de vida útil (degradação de catalizador e eletrólito), sendo que

para as células serem competitivas é preciso atingir no mínimo para aplicações automotivas 4000h e para aplicações estacionárias 40.000h;

Dentre os sistemas eletroquímicos existentes, as células de combustível são os únicos que não apresentam limitações de energia, pois funcionam enquanto houver disponibilidade de gases reagentes. Com isso, elas têm sido usadas em veículos elétricos, sanando o principal problema por estes apresentado: a baixa autonomia. Na maioria dos casos, a densidade de potência das células de combustível encontra-se abaixo da requerida para esta aplicação, à vista dos valores apresentados pelos motores de combustão interna. Para se contornar essa deficiência, têm sido realizados vários estudos voltados para a utilização de sistemas híbridos (células de combustível/baterias). Neste caso, as baterias seriam responsáveis pela potência nas acelerações e em rampas acentuadas.

Entretanto, desenvolvimentos recentes de células de eletrólito polimérico sólido estão permitindo chegar a uma adequada razão peso/potência.

No estágio atual de desenvolvimento, a classificação e a caracterização das células de combustível é bastante complexa, devido a grande variedade de sistemas existentes. A tabela 2 pode-se ser observadas as vantagens e desvantagens de cada tipo, e na tabela 3 mostra os cinco diferentes tipos de células. Estas dependem da aplicação proposta, do combustível a ser utilizado, dos materiais disponíveis e da infra-estrutura existente [13, 16,17,18,19].

TABELA 2 – IMPACTO AMBIENTAL DAS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

		Padrão norte americano		
	Combustão a gás (kg/MWh)	Combustão a óleo (kg/MWh)	Combustão a carvão (kg/MWh)	Célula de combustível (kg/MWh)
particulados	0,2	0,2	0,2	0,0000045
NOx	0,3	0,5	1,1	0,020-0,028
SOx	-	1,2	1,9	0,00036
fumaça	opacidade 20%	opacidade 20%	opacidade 20%	desprezível

Fonte: [11]

TABELA 3 – TIPOS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Tipo de célula	Eletrólito	Temperatura de operação (°C)	Reagentes
ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	180-200	H ₂ de reforma/O ₂ /Ar
eletrólito polimérico sólido	Nafion ^R	70-100	H ₂ de reforma/O ₂ /Ar
alcalina	KOH (25-50%)	25-100	H ₂ /O ₂ puros
carbonatos fundidos	K ₂ CO ₃ /Li ₂ CO ₃	657-700	Gás natural/Carvão
óxido sólido	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃	900-1000	Gás natural/Carvão

Fonte: [11]

2.5.4 Tipos de células de combustível

2.5.4.1 Célula de ácido fosfórico

Neste tipo de célula, utiliza-se ácido fosfórico concentrado (95-98%) como eletrólito, e a temperatura de operação situa-se entre 180 e 200°C. O eletrólito não é afetado por CO₂ ou CO, mas este último contamina o catalisador e sua concentração não pode ultrapassar 1%. Portanto, a célula pode operar utilizando diretamente ar atmosférico como agente oxidante ou o hidrogênio impuro produzido, por exemplo, a partir da reforma de outros combustíveis, tais como metano, nafta e metanol. O dióxido de carbono (CO₂) que é formado como subproduto do processo de reforma passa através da célula sem afetar o seu funcionamento. O catalisador mais eficiente para as reações de redução do oxigênio e oxidação do hidrogênio neste meio é a platina. Esses materiais são depositados através de método de filtragem ou rolagem sobre um substrato hidrofóbico de grafite poroso (tecido de grafite ou papel de grafite).

É possível comprar nos EUA unidades de várias potências de células de ácido fosfórico, mas a preços que refletem as condições artesanais de construção, porém na atualidade são os tipos comercialmente disponíveis.

2.5.4.2 Célula de eletrólito polimérico sólido

Neste tipo de célula, o eletrólito consiste em uma membrana condutora de prótons umedecida com água (Nafion[®]), e a temperatura de operação é de cerca de 80°C. Para evitar a contaminação dos eletrodos de difusão de gás, deve-se utilizar hidrogênio com teor de CO inferior a 0,1% como combustível. O ar atmosférico pode ser perfeitamente utilizado como agente oxidante. Com o uso dessa membrana, pode-se manter uma pequena distância entre os eletrodos (inferior a 0,2 mm), diminuindo-se assim a resistência interna. Além disso, a reação de redução de oxigênio neste meio apresenta boa velocidade na presença de platina. Por suas características, as células de eletrólito polimérico sólido podem atingir elevadas densidades de potência e, por esse motivo, são as mais indicadas para utilização em veículos elétricos. As desvantagens deste tipo de células ainda são o alto custo das membranas e a necessidade de balanços de água para manter a umidade corrigida da membrana em temperaturas próximas de 100°C. Há dois tipos principais de células de eletrólito polimérico sólido em desenvolvimento atualmente, de hidrogênio e de metanol direto, dependendo do tipo de combustível utilizado.

2.5.4.3 Célula alcalina

Neste tipo de célula utiliza-se uma solução aquosa de hidróxido de potássio (30%) como eletrólito, e a temperatura de operação é de cerca de 70°C. O hidrogênio utilizado como combustível e o agente oxidante devem possuir elevada pureza, pois o eletrólito pode reagir com gases ácidos, tais como CO₂, CO e SO₂, e formar produtos insolúveis que acabam provocando danos irreversíveis ao sistema. Esse tipo foi o primeiro a ser desenvolvido a partir do trabalho de Bacon. Existem, porém, algumas limitações quanto à sua utilização. Os reagentes H₂ e O₂ têm que ser ultrapuros, pois o eletrólito alcalino pode reagir com gases ácidos (CO₂, CO) e formar carbonatos que prejudicam irreversivelmente o funcionamento do sistema. Uma desvantagem dele é que o monóxido de carbono (CO) a baixa temperatura absorvido nos sítios ativos dos eletrodos, bloqueando a ação do catalisador. Outra desvantagem é a geração de água

na fase líquida (como subproduto da reação), a qual se incorpora ao eletrólito, causando sua diluição. Isso torna necessária a circulação do eletrólito, para manter a concentração. O resultado é o aumento da complexidade do sistema e também da distância entre os eletrodos, para permitir a passagem do eletrólito sem grande perda de carga, o que provoca grande resistência interna. A célula alcalina equipou as naves do Projeto Apollo e da *Space Shuttle*, ambos da NASA.

2.5.4.4 Célula de carbonato fundido

Neste tipo de célula utilizam-se misturas de carbonatos de sódio, lítio e potássio como eletrólito, e a temperatura de operação, dependendo das proporções utilizadas na mistura de carbonatos, fica entre 600 e 750° C. As principais vantagens destas células são: (1) o CO₂ e o CO são reagentes combustíveis; (2) a alta temperatura de operação dispensa o uso de catalisadores com metais nobres para as reações eletroquímicas; (3) a temperatura de operação permite que a reforma de combustível seja feita dentro da célula. Também é possível o uso de combustíveis de reforma mais difícil, como o carvão. A desvantagem fundamental relaciona-se com a pouca estabilidade química dos materiais empregados, com a confecção dos módulos e com a elevada temperatura de operação, à vista dos ciclos térmicos. Este tipo de célula apresenta ainda vantagens sobre as células ácidas e alcalinas por permitir a alimentação direta de hidrocarbonetos e de gás de carvão para a geração eficiente e limpa de eletricidade. Porém o gás obtido de carvão contém impurezas, como compostos de enxofre, além de halogenetos, amônia, etc. Mesmo em baixas concentrações, na faixa de algumas ppm, o enxofre pode ser prejudicial sobre ânodos de Ni-Co e produzir corrosão sobre os coletores de corrente, reduzindo a eficiência e a duração da célula.

2.5.4.5 Célula de óxido sólido

Neste tipo de célula, os eletrólitos utilizados são óxidos refratários, que apresentam, mesmo no estado sólido, considerável condutividade iônica em

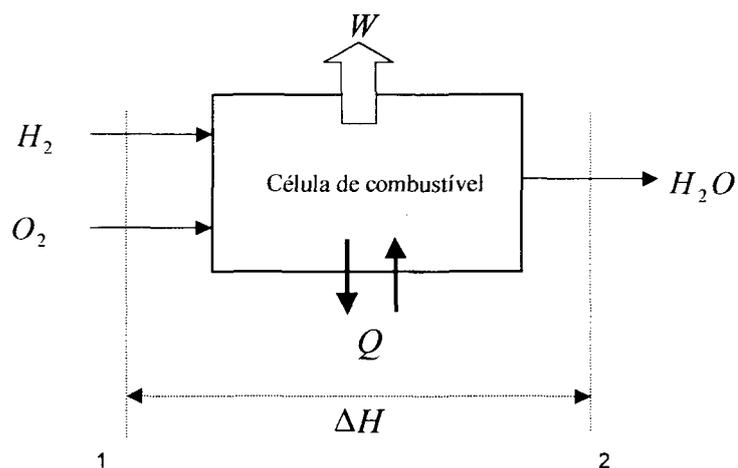
temperaturas superiores a 900°C. Uma das vantagens destas células é que seus próprios eletrodos podem atuar como reformadores de outros combustíveis, gerando o hidrogênio necessário para a alimentação. As células de combustível com eletrólito de óxido sólido estão ainda em estágio de pesquisa e desenvolvimento. O eletrólito de óxido de zircônia estabilizada com óxido de ítrio é muito estável e não migra nas condições de operação. Como eletrodo de ar é usada a manganita de lantânio ativada com estrôncio, e como eletrodo do combustível uma liga de cobalto ou níquel com óxido de zircônia estabilizada. Este tipo de célula apresenta ainda muitas dificuldades, principalmente quanto à tecnologia dos materiais utilizados. Eletroquimicamente, são células eficientes, pois naquela temperatura a cinética das reações de oxidação de vários combustíveis é favorável, o mesmo acontecendo com a redução do oxigênio, mesmo na ausência de catalisadores com metais nobres. Também é possível o uso direto de combustíveis, como metanol, etanol, gás natural e outros, pois sua reforma se processa no próprio interior da célula, como visto acima. Pela própria temperatura de funcionamento destas células, é natural que elas sejam utilizadas apenas em aplicações que requerem funcionamento contínuo, e o intercâmbio de energia térmica é uma vantagem delas no uso em sistemas integrados de geração de energia.

2.5.5 Termodinâmica básica de célula de combustível

Neste trabalho, para descrever um processo de regime permanente e em equilíbrio, representa-se a célula de combustível como um modelo de dois eletrodos em contato com um eletrólito, conectados eletricamente por um circuito externo. O terminal de tensão é definido pela diferença de potencial entre os terminais dos eletrodos feitos do mesmo material [20, 21].

Considera-se a célula de combustível como um único volume de controle, onde, com o fornecimento de hidrogênio e oxigênio, são obtidos trabalho elétrico, calor e água, como mostra a figura 8.

FIGURA 8 – AVALIAÇÃO GLOBAL DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL



Considerando o caso ideal, o sistema irá operar de modo reversível, isotermicamente e a pressão constante.

Dadas essas considerações, o máximo trabalho elétrico (W) é igual à variação da energia livre de Gibbs (G) da reação eletroquímica.

$$W = -\Delta G \quad (1)$$

A energia livre de Gibbs é uma função termodinâmica do sistema, isto é:

$$G = H - T.S \quad (2)$$

onde H é a entalpia.

Quando a pressão e a temperatura são constantes,

$$\Delta G = \Delta H - T.\Delta S \quad (3)$$

onde ΔH representa a variação de entalpia e onde a quantidade ΔS pode ser definida por

$$\Delta S = \left[\frac{\partial(\Delta G)}{\partial T} \right]_p \quad (4)$$

Então, obtém-se:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \left[\frac{\partial(\Delta G)}{\partial T} \right]_p = -W \quad (5)$$

A quantidade ΔG é relacionada com a força eletromotriz (fem), E_0 , pela simples relação, desenvolvida pela Lei de Faraday.

$$\Delta G = -n_e \cdot F \cdot E_0 = -W \quad (6)$$

onde n_e é o número de elétrons por uma molécula ou íon, e F é a constante de Faraday [20], que é calculada como o produto do Número de Avogrado, N_0 , pela carga elétrica, ou seja:

$$F = N_0 \cdot e = 6,02214 \cdot 10^{23} \cdot 1,60218 \cdot 10^{-19} = 96485,52 \frac{C}{mol}$$

2.5.6 Cálculo da eficiência

2.5.6.1 Cálculo da eficiência ideal

A eficiência energética de uma célula de combustível ideal é dada pela relação do máximo trabalho pelo efeito térmico da reação:

$$\eta_T = \frac{\text{energia disponível para realizar trabalho}}{\text{energia total}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = -\frac{n_e \cdot F \cdot E_0}{\Delta H} \quad (7)$$

onde, $\eta_T < 1$, uma vez que $\Delta G < \Delta H$.

2.5.6.2 Cálculo da eficiência real

A eficiência real da célula de combustível é menor que a eficiência ideal, e a tensão real nos terminais é menor que a tensão ideal, se a célula operar reversivelmente. As limitações físicas para a eficiência real são:

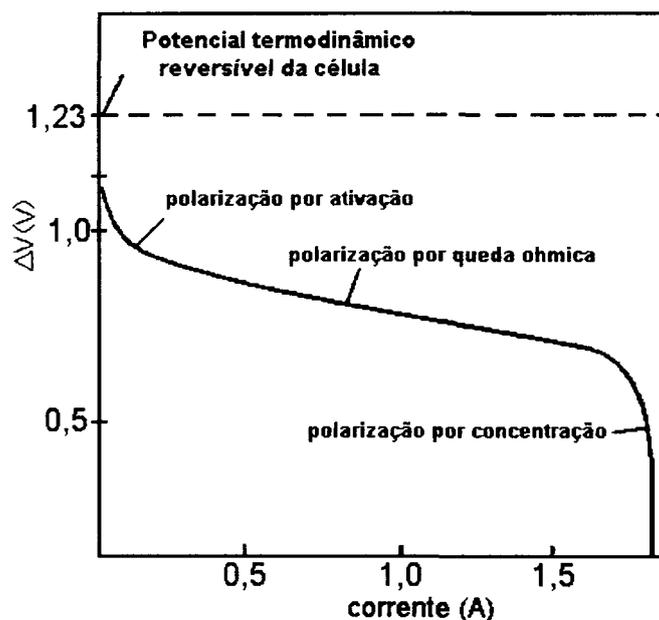
- (i) podem ocorrer reações não-desejadas no ânodo e no cátodo;
- (ii) podem não ocorrer reações normais no ânodo e no cátodo;
- (iii) o eletrólito pode tornar-se não-homogêneo devido ao gradiente de concentração;
- (iv) aquecimento por efeito Joule ($R.I^2$) no eletrólito (resistência do eletrólito);
- (v) incompleta utilização do combustível e do oxidante.

No funcionamento de uma célula de combustível, à medida que dela se exige mais corrente, a diferença de potencial entre seus terminais diminui, descrevendo uma curva característica, chamada *curva de polarização*.

A polarização é a queda na diferença de potencial nos terminais da célula em relação ao ideal, que pode ser decorrente de várias causas, sendo as mais importantes a polarização por ativação, a polarização ôhmica e a polarização por concentração (figura 9).

Polarização por ativação: É a limitação imposta pelo fato de as velocidades das reações responsáveis pelo fornecimento e consumo de elétrons serem finitas. Se a concentração do reagente é elevada e/ou a corrente é baixa, a reação de transferência do elétron do eletrodo para a espécie ou vice-versa pode ser a etapa determinante da velocidade, e ocorrer, como consequência, o fenômeno da polarização por ativação. Essa concentração reflete o desempenho dos eletrodos e dos catalisadores a eles incorporados, aumentando a velocidade de reação e, conseqüentemente, reduzindo a polarização.

FIGURA 9 – CURVA TEÓRICA DE DIFERENTES CONTRIBUIÇÕES DA POLARIZAÇÃO



Fonte: [2]

Polarização ôhmica: Ocorre devido às resistências internas das células, tais como resistência de contato, resistência do eletrólito ao transporte dos íons e resistência intrínseca dos materiais que compõem a célula. Se a concentração dos íons responsáveis pelo transporte de carga for pequena (baixa condutividade do eletrólito) ou se a corrente for muito elevada, pode haver dificuldades na manutenção da eletroneutralidade da solução e, conseqüentemente, retardamento do processo eletroquímico global. Esse fenômeno é governado pelas leis da condutância eletrolítica (lei de Ohm) e provocam o afastamento do potencial medido do eletrodo de seu valor de equilíbrio. Para tentar contornar esse problema, tem-se atacado cada tipo de resistência com soluções específicas: minimização do espaço entre eletrodos para diminuir o caminho dos íons, minimização do número de componentes para reduzir maus contatos e otimização dos materiais usados na fabricação dos componentes.

Polarização por concentração: Decorre, principalmente, da falta de reagentes nos sítios ativos quando a taxa de conversão de energia é elevada (alta densidade de corrente). Isso ocorre nos casos em que o transporte do reagente aos sítios ativos é feito numa velocidade inferior à das etapas subseqüentes, ou seja, do seu consumo na reação em curso. Em um sistema eletroquímico convencional normalmente se utilizam

concentrações elevadas das espécies eletroativas e, simultaneamente, concentrações elevadas de um eletrólito suporte, para garantir condutividade eletrolítica elevada. Nas altas correntes ocorrem os três efeitos, especialmente quando os reagentes estão no estado gasoso e se usam eletrodos porosos, como os eletrodos de difusão de gás, empregados nas células de combustível.

O efeito da polarização nos três diferentes casos em uma célula de combustível pode ser observado na figura 9. A queda de potencial em função da corrente provoca um desvio da potência da célula em relação à potência obtida em condições ideais, diminuindo a eficiência do sistema. Este fator pode ser chamado de *eficiência eletroquímica da célula* (η_E) e ser definido como:

$$\eta_E = \frac{E_r}{E_0} \quad (8)$$

onde E_r é a força eletromotriz da célula (em função da corrente) e E_0 é a força eletromotriz nas condições ideais.

Pelo exposto, fica bem definido que a diferença de potencial na célula de combustível depende da corrente exigida do sistema. Também a eficiência eletroquímica depende das condições em que a célula for operada.

A eficiência de corrente ou eficiência de Faraday η_F , que reflete a utilização completa dos reagentes, é dada por:

$$\eta_F = \frac{(n_e \cdot F)_{real}}{n_e \cdot F} \quad (9)$$

Os três fatores vistos – eficiência energética (η_T), eficiência eletroquímica (η_E) e eficiência de corrente (η_F) – compõem o que se pode chamar de *eficiência de conversão* (η_C) de uma célula galvânica, obtendo-se:

$$\eta_C = \eta_T \cdot \eta_E \cdot \eta_F \quad (10)$$

Neste trabalho, nos capítulos 4 e 5, a energia elétrica gerada em uma célula de combustível será obtida, a partir da eficiência de conversão (η_c), de acordo com a equação (10).

CAPÍTULO 3

ANEX – UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DE SISTEMAS COMPLEXOS

3.1 Metodologia da análise exergetica e termoeconômica

Haywood, em 1974, no seu estudo crítico do desenvolvimento histórico do conceito de exergia, cita a contribuição de cientistas de destaque: Maxwell (1871), Gibbs (1873), Kelvin (1879), Tait (1889), Gouy (1889) e Stodola (1898) [22].

Considera-se Gibbs o primeiro a promover uma base analítica para a determinação da exergia de um fluxo, em artigo publicado em 1873. Keenan, em 1932, apresentou os resultados de Gibbs com um formalismo mais simples e prático, ampliando o conceito de exergia.

Obert, em 1948, dá uma grande contribuição para a aceitação do conceito com a realização de uma análise exergetica de processos de combustão. Um ano mais tarde, Birnie quantifica a irreversibilidade em equipamentos individuais de uma central termelétrica.

Gaggioli, em 1963, introduz o conceito de exergia e generaliza sua aplicação ao estudar processos energéticos, sendo seguido por Hapsopoulos e Keenan, em 1965, com uma abordagem mais teórica [22].

Gouy, em 1889, segundo a comunidade científica européia, foi quem formalizou o conceito de exergia. Este autor demonstra como a perda da “energia útil” num dado processo é igual ao produto da temperatura ambiente pela soma da variação da entropia que todos os corpos participantes do processo experimentam. Stodola, em 1898, desenvolve o mesmo conceito para processos de fluxo estacionário, que deu origem à Lei de Gouy-Stodola, a qual despertou enorme interesse na comunidade científica [23].

Bosnjakovic, entre 1938 e 1939, apresenta aplicações relevantes da análise exergetica em processos industriais e importante definição dos critérios de eficiência real. É o primeiro a formular de maneira sistemática o balanço de exergia [22].

Após a Segunda Guerra Mundial, os maiores avanços ocorreram na Europa, principalmente, segundo Wepfer (1979), pela necessidade de reconstruir o parque

industrial e buscar uma redução significativa dos preços dos energéticos.

Rant, em 1951, utiliza o método entrópico e a análise termodinâmica em processo de fabricação de carbonato de sódio, e em 1956 propõe a adoção do termo “exergia”, que foi rapidamente adotado na Europa continental e depois aceito internacionalmente. Esse termo contribui para padronizar a nomenclatura até então utilizada, sendo interessante destacar o trabalho de Kotas [6] para a fundamentação do conceito de exergia.

No início dos anos 60, nos Estados Unidos, foram criadas escolas de análise exérgica, com relevantes contribuições. Evans e Tribus, em 1962, numa análise exérgica da eficiência de um processo de dessanilização, introduzem a idéia de acoplar a exergia ao custo econômico dos fluxos da planta, sugerindo a adoção do vocábulo “termoeconomia”. A essência do procedimento de Evans e Tribus é associar o recurso econômico (combustível, custo de operação e custo de amortização) da planta analisada com qualquer fluxo e sua exergia. Desse modo, fazendo-se o balanço monetário dos equipamentos pode-se determinar os custos econômicos unitários dos distintos fluxos de exergia. Com esses custos unitários pode-se buscar a otimização individual dos equipamentos da instalação. Surgiram desse trabalho os conceitos fundamentais da termoeconomia, tal como são atualmente aceitos. Posteriormente El-Sayed e Evans, em meados de 1970, generalizam e fornecem fundamentos matemáticos definitivos para a otimização termoeconômica dos sistemas energéticos [23].

Reistad, em 1970, em sua tese de doutorado, efetua uma análise termoeconômica de sistemas de co-geração e aplica o método de El-Sayed e Evans a uma planta simples de potência, comparando a eficácia do método com procedimentos convencionais de otimização.

Szargut, em 1971, realiza uma análise da relação “eficiência-investimento” para alguns tipos de instalações e deriva uma expressão geral para avaliar a eficiência econômica. Este mesmo autor introduz o conceito de “consumo exérgico

acumulado”, que determina o consumo dos recursos energéticos não-renováveis associados à obtenção do produto funcional. Nesse momento, dá um valor essencialmente ecológico à nova propriedade definida [22].

Gaggioli *et al.* propõem a utilização dos custos exerгéticos diretamente para valorar os distintos fluxos numa planta industrial com problemas de otimização local, análise econômica de alternativas e substituição de equipamentos.

Tsatsaronis, de 1982 a 1984, foi quem sistematizou as idéias de Gaggioli *et al.* e propôs utilizar o conceito “recurso-produto” como gerador das equações auxiliares necessárias para o cálculo dos custos dos fluxos de uma instalação e para a otimização local de seus equipamentos (método exergoeconômico) [22].

Bejan, durante a década de 80, contribuiu também para a generalização da aplicação de técnicas baseadas na combinação da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica na análise, projeto e otimização de equipamentos e sistemas térmicos. As técnicas incluem a rápida identificação dos componentes responsáveis pelas maiores parcelas da geração de irreversibilidade total em sistemas multicomponentes [6, 23].

Lozano e Valero *et al.*, em meados de 1986, propõem uma metodologia unificadora e compacta para o cálculo dos custos e para outras aplicações da termoeconomia, ao fazer a conexão desta com a teoria geral de sistemas (método da teoria do custo exerгético). Segundo esses autores, três são os fatores importantes a ser considerados:

- (i) a irreversibilidade total não pode ser evitada;
- (ii) as destruições de exergia local não são equivalentes;
- (iii) as oportunidades de economia são obtidas com estudo detalhado dos mecanismos fundamentais da geração de entropia, associados às variáveis livres e aos investimentos.

O custo exerгético surgiu como uma metodologia para relacionar a geração de irreversibilidade em um equipamento isolado com os demais componentes da

planta em análise [22].

Nas décadas de 80 e 90, tem-se o período mais fértil do desenvolvimento da otimização termoeconômica. Nessa época, destacam-se os trabalhos de Valero e Lozano, na Universidade de Saragoça (Espanha), Tsatsaronis, na Universidade do Tennessee (Estados Unidos) e posteriormente na Universidade Tecnológica de Berlim (Alemanha), Frangopoulos, na Universidade Nacional Técnica de Atenas (Grécia), e Spakovsky, na Escola Politécnica Federal de Lausanne (Suíça) e posteriormente no Instituto Politécnico de Virginia (Estados Unidos) [23, 24].

A seguir, são relacionadas as quatro principais metodologias aplicadas na atualidade [23]:

- a) otimização termoeconômica (El-Sayed e Evans, 1970);
- b) análise funcional termoeconômica (Frangopoulos, 1983) [25];
- c) teoria do custo exergetico (Lozano e Valero, 1993) [22, 24, 26, 27, 28];
- d) exergoeconomia (Tsatsaronis, 1993) [29];

Muito tem se discutido sobre as diversas metodologias hoje existentes, porém ainda não se pode afirmar categoricamente qual é a melhor. Na referência bibliográfica [25], foram comparadas as principais metodologias, mas não se chegou a resultados conclusivos, pois cada uma delas tem uma particularidade de aplicação.

Matematicamente, merece destaque a abordagem de Frangopoulos, mas tem que haver grande rigor na sua aplicação. Pela abordagem unificadora e compacta, destacam-se a de Valero e Lozano, e que devido ao tipo de planta que será analisada neste trabalho foi a escolhida.

Nesta dissertação, aplicou-se a Teoria do Custo Exergetico no processo de secagem de grãos de soja, com uma otimização da planta, aplicando-se sistemas de co-geração e trigeração.

Em função das divergências entre enfoques existentes nas metodologias atuais, são apresentadas duas definições para a termoeconomia:

Segundo El-Sayed e Evans, em 1970, “Termoeconomia pretende ser uma

técnica que combine a análise termodinâmica e a otimização econômica de sistemas térmicos complexos, tais como centrais termelétricas, instalações frigoríficas e instalações de dessalinização.” [23]

Segundo Bejan *et al.*, 1996, “Termoeconomia é o ramo da engenharia que combina a análise exérgica e princípios econômicos visando prover ao projetista ou operador de sistemas informação não-disponível através das análises termodinâmica e econômica convencionais mais cruciais para o projeto e operação econômica de um sistema.” [23]

3.2 Síntese da teoria do custo exérgico

A Teoria do Custo Exérgico possui um conjunto de regras (postulados) para se elaborar o sistema de equações utilizadas na determinação dos custos dos fluxos do sistema [22, 24, 26, 27, 28].

O primeiro passo é a definição da *estrutura física* (e.g. figura 11, capítulo 4) do sistema, através da divisão em subsistemas e da relação dos fluxos materiais e/ou energéticos entre os subsistemas e entre os subsistemas de controle e o ambiente. Deve ser dada atenção especial à definição de *nível de agregação da estrutura produtiva*, visando ao impacto na qualidade dos resultados.

O segundo passo é estabelecer a estrutura produtiva (e.g. figura 12, capítulo 4), definindo a função termodinâmica de cada subsistema da planta, de acordo com a eficiência exérgica. A combinação dos fluxos é efetuada a partir da definição dos produtos (P), dos recursos (F) e das perdas (L). O custo exérgico de um fluxo (B^*), recurso (F^*) ou produto (P^*) é a quantidade real de exergia (B) que foi necessária para produzi-lo. O fundamento básico é que o custo exérgico dos fluxos de entrada num equipamento repercute nos fluxos úteis que saem do subsistema. A relação entre os fluxos e subsistemas se estabelece mediante a Matriz de Incidência $A(n \times m)$ sendo que n é o número de subsistemas e m é o número de fluxos. Os elementos da matriz a_{ij}

assumem o valor +1 se o fluxo j entra no subsistema i , e de -1 se sai e de 0 se não existe relação física direta entre eles [22].

A partir dessas bases, tem-se um conjunto de proposições cuja aplicação permite determinar inequivocamente o valor dos custos exergéticos dos recursos, produtos e perdas do processo analisado.

As proposições da Teoria do Custo Exergético são as seguintes:

Proposição 1. O custo exergético é uma propriedade conservativa.

Proposição 2. Para os componentes “multipleres” do recurso total de um subsistema, o custo exergético unitário dos custos de saída deve ser igual ao dos fluxos de entrada.

Proposição 3a. Se um subsistema tem um produto total formado por vários componentes, então todos eles terão o mesmo custo exergético unitário.

Proposição 3b. Se um componente do produto tem vários fluxos de saída, assinalar-se-á para todos eles o mesmo custo exergético unitário (a razão desta proposição é que, se dois ou mais produtos independentes podem ser identificados em um mesmo subsistema, seu processo de formação é inseparável no nível de agregação considerado e, portanto, deve-se assinalar-lhes idêntica valoração).

Proposição 4. Na ausência de valoração externa, para os fluxos de perdas deve-se assinalar um custo exergético nulo, uma vez que eles não têm utilidade posterior (este corolário supõe a constatação de que o custo exergético dos fluxos que entram em um subsistema repercutem integralmente nos fluxos úteis que dele saem).

Proposição 5. Na ausência de valoração externa, o custo exergético dos fluxos de entrada no sistema é igual à sua exergia.

Considere-se uma planta composta por vários equipamentos. O conjunto de balanços do custo exergético (Proposição 1) dos n equipamentos que a constituem corresponderá ao sistema de equações:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = 0 \quad (11)$$

Como em qualquer sistema o número de fluxos (m) é maior que o número de subsistemas (n), serão necessárias ($m-n$) equações adicionais para resolver o problema da assinalação de custos para todos os fluxos.

Em forma matricial, isso implica que devem ser determinados os argumentos de uma matriz α ($m-n, m$) e um vetor coluna ω ($m-n$) que satisfaça:

$$\alpha \times \mathbf{B}^* = \omega \quad (12)$$

Pode-se demonstrar [22, 27, 28] que a aplicação das proposições 2 a 5 aos subsistemas que compõem a planta determina inequivocamente o sistema de $m-n$ equações auxiliares que complementarão a matriz de incidência (\mathbf{A}).

Portanto, os sistemas de equações necessários para calcular os custos exergéticos dos fluxos têm a seguinte estrutura:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \alpha \end{bmatrix} \times \mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

Caso se defina:

$$\mathbb{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \alpha \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{Y}^* = \begin{bmatrix} -\mathbf{Y}^* \\ \omega \end{bmatrix} \quad (14)$$

com $\mathbf{Y}^* = 0$, pode-se apresentar tal sistema de forma mais compacta:

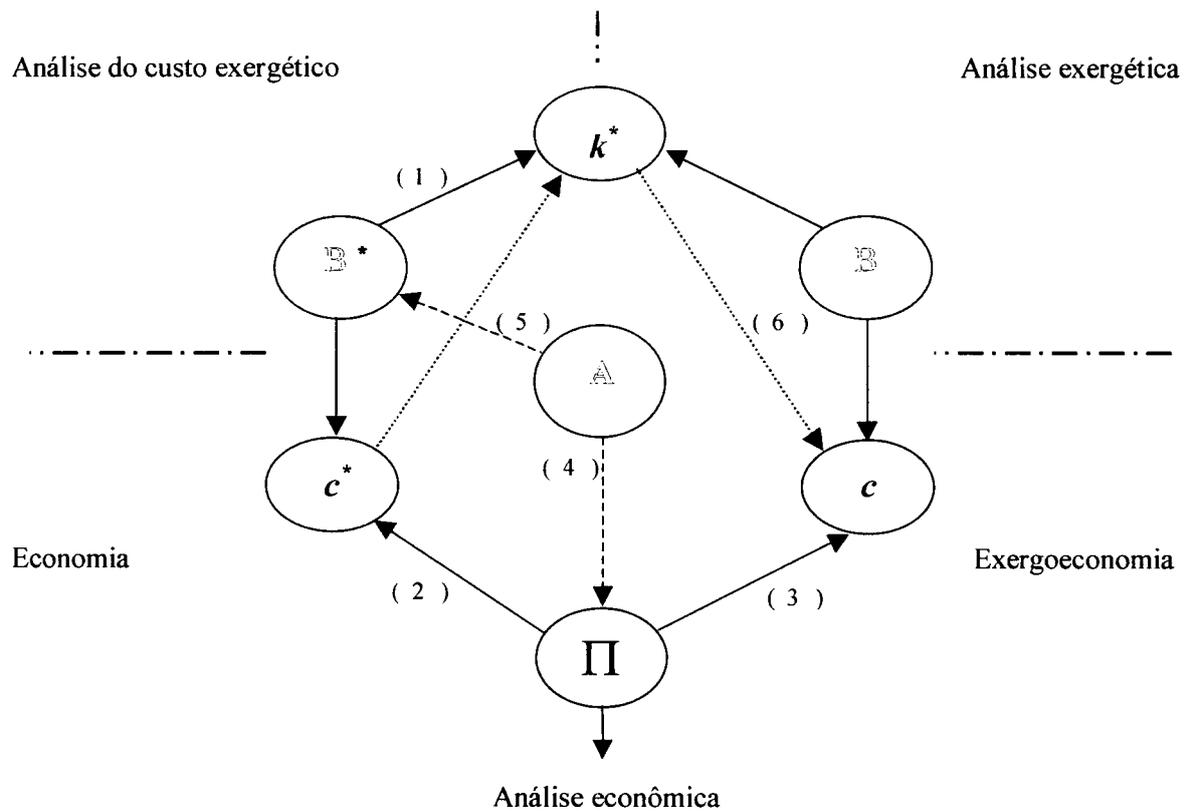
$$\mathbb{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{Y}^* \quad (15)$$

Observe-se que os coeficientes da matriz \mathbb{A} só dependem dos valores assumidos pelas exergias dos m fluxos, sendo que, estando estes conhecidos, somente

faltará realizar a valora o do vetor coluna \mathbb{E}^* para que os custos exergeticos dos m fluxos estejam determinados.

A figura 10 ilustra a forma o dos custos pela teoria termoeconômica de Valero e Lozano.

FIGURA 10 – CUSTOS PELA TEORIA DO CUSTO EXERGETICO



- (1) $k^* = B^* / B$ = custo exergetico unitário
- (2) $c^* = \Pi / B^*$ = custo termoeconômico unitário [US\$/GJ]
- (3) $c = \Pi / B$ = custo exergoeconômico unitário [US\$/GJ]
- (4) $\Pi = A^{-1} \times Z$ = custo termoeconômico [US\$/s]
- (5) $B^* = A^{-1} \times Y$ = custo exergetico [kW]
- (6) $c = c^* \cdot k^*$ = custo exergoeconômico unitário [US\$/GJ]

Valendo-se das proposi es (1) a (4) [22], tem-se: $A \times \Pi = -Z$ ($n \times m$), cujas

cujas incógnitas Π_j , são os custos exergoeconômicos de cada uma das m correntes.

As restantes $(m-n)$ equações para compor o sistema linear de equações são determinadas através das proposições (2) a (5), $\alpha \times \Pi = \omega_z$, onde ω_z representa a valoração econômica externa das correntes de entrada ou de saídas referentes à planta.

Assim, similarmente, obtém-se um novo sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \times \Pi = \begin{bmatrix} -Z \\ \omega_z \end{bmatrix} \text{ ou, se } \mathbb{Z} = \begin{bmatrix} -Z \\ \omega_z \end{bmatrix}, \text{ escreve-se } \mathbb{A} \times \Pi = \mathbb{Z}.$$

3.3 ANEX – um *software* para análise exergética e termoeconômica

O problema de qualquer metodologia de análise a ser aplicada a determinada planta, tanto no projeto quanto no diagnóstico de seu funcionamento efetivo, consiste em responder à seguinte questão:

Valero, 1994, “Onde, como e em que parte a energia consumida pelo processo pode ser otimizada mantendo-se constante a quantidade e especificações dos produtos finais?” [22]

Uma possível solução do problema enunciado consiste no desenvolvimento de um simulador da planta em análise e na sua utilização para resolver questões fundamentais na variação dos parâmetros do processo. A simulação deve satisfazer a estes requisitos: (a) especificação adequada da planta e (b) capacidade da planta para reproduzir de maneira fiel os resultados obtidos na busca da otimização.

A metodologia do diagnóstico energético de processos e sistemas complexos, de acordo com procedimentos clássicos, deve propiciar a modelagem matemática do sistema, através dos balanços de massa, energia e exergia da planta global e de seus equipamentos individuais. A proposta aqui utilizada é baseada nos seguintes princípios:

- (i) comparação racional dos resultados obtidos a respeito da referência, determinando o nível de decisão e os tipos de ações a serem tomadas e, portanto, quantificando as perdas inevitáveis ou intrínsecas do processo

produtivo;

(ii) aplicação, como ferramenta de análise, da Teoria do Custo Exergético.

O *software* Análise Exergética e Termoeconômica de Equipamentos e Processos Industriais – *ANEX*, é baseado na Teoria dos Custos Exergéticos e na Teoria Geral de Sistema. O *ANEX* foi desenvolvido para usuários que tenham conhecimentos de análise exergética. Através desse aplicativo, o usuário fornece informações básicas da estrutura produtiva de plantas industriais (fluxograma) e tem como retorno um modelo termoeconômico e os principais indicadores para análises e diagnósticos.

Podem ser enumeradas as seguintes etapas para a utilização do *ANEX*:

- determinar o enfoque e o objetivo;
- estabelecer o nível de agregação do modelo ($n \times m$);
- preparar um desenho esquemático (diagrama de blocos);
- levantar os dados operacionais da planta (vazões, pressões, composições químicas, temperatura, potência, etc.);
- levantar dados econômicos da planta (custo instalado, combustíveis, etc.);
- inicializar o *ANEX* e fornecer dados;
- executar a planilha de dados “anex.xls” e converter os dados para MS-EXCEL;
- elaborar gráficos, e tabelas;

O *ANEX* propicia um arquivo em formato texto, do qual as informações podem ser extraídas.

A termoeconomia permite introduzir custos econômicos (monetários) na análise, tornando o *ANEX* uma ferramenta ainda mais útil no processo decisório. Para plantas industriais onde a energia exerce um papel preponderante, a formação do custo econômico das correntes internas e dos produtos finais está relacionada tanto com a eficiência termodinâmica dos processos, quanto com o custo de amortização, manutenção e operação dos equipamentos em que ocorrem tais processos.

No anexo 1 apresenta-se um modelo de planilha para levantamento de campo

utilizado na coleta dos dados para realizar avaliação global de uma planta industrial com o uso do *ANEX*.

No desenvolvimento desta dissertação ficarão mais explícitos os resultados e a aplicação do *software* desenvolvido.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE CO-GERAÇÃO OU TRIGERAÇÃO COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEIS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS

4.1 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25TMC para o regime nominal de funcionamento (GEX-0)

O objetivo desta análise é consolidar o entendimento da tecnologia de célula de combustível para geração distribuída de energia elétrica e fornecer entendimento para aplicação ao sistema complexo a que se destina o estudo desta dissertação.

A escolha da célula de combustível do tipo ácido fosfórico (anexo 2, PC25TMC) se deve ao fato de ser ela o equipamento disponível no mercado, porém a avaliação servirá de orientação para outros tipos de células que entrarem no mercado.

Os estudos foram efetuados para a análise energética e exergética do potencial de co-geração e trigeração para quatro configurações de plantas com células de combustível PC25TMC:

- a) célula de combustível com geração de energia elétrica, ou seja, sem co-geração (GEX-0);
- b) célula de combustível com co-geração de energia elétrica e térmica (COGEX-Q);
- c) célula de combustível com trigeração de energia elétrica e frigorífica (COGEX-F);
- d) célula de combustível com co-geração de energia elétrica, frigorífica e térmica (TRIGEX-QF).

A avaliação do potencial energético foi realizada em três etapas:

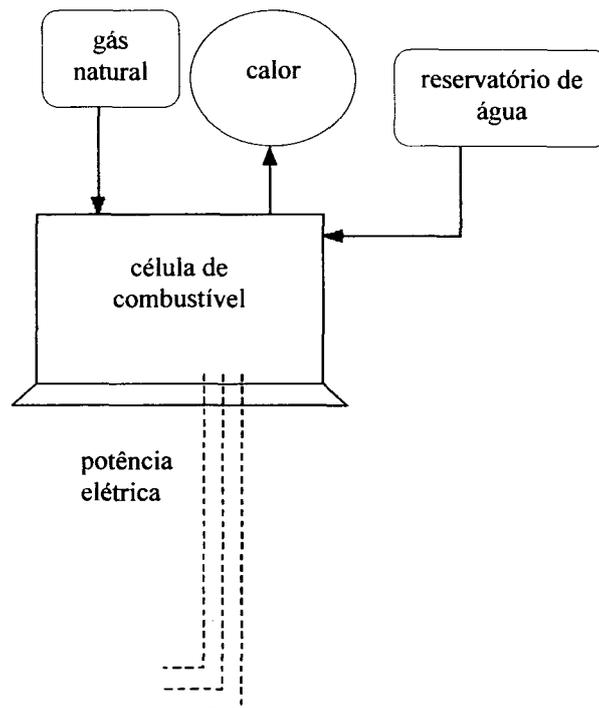
1. foi efetuada a análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível para o regime nominal de geração de energia elétrica e correspondentes regimes térmicos na faixa de funcionamento especificada pelo fabricante; avaliou-se a eficiência nesses regimes e o disponível de energia e exergia para co-geração (geração simultânea de eletricidade e efeito térmico de aquecimento, item 4.2) ou trigeração (geração simultânea de eletricidade, de efeito térmico de aquecimento e de frio – item 4.4);

2. com base nos resultados da primeira fase, foram identificados possíveis equipamentos (equipamento frigorífico para água gelada com absorção Li-Br – anexo 3) a serem montados para implementação física de uma configuração PC25TMC com co-geração (item 4.3) e uma configuração PC25TMC com trigerção (4.4);

3. as configurações PC25TMC com co-geração e PC25TMC com trigerção foram avaliadas para verificação da viabilidade termoeconômica (relação custo/benefício).

Os resultados foram obtidos através do aplicativo computacional *ANEX*, considerando-se o sistema de referência da célula de combustível (GEX-O), representado na figura 11. Considerou-se que a célula de combustível funciona em regime nominal, conforme as especificações do Manual de Instalação FCR-13258B da *ONSI Corporation* [30], sendo alimentada com $\dot{V}_{1,N} = 53,8 \text{ m}^3/\text{h}$ de combustível gasoso (gás natural com composição química conforme apresentado na tabela 4) de poder calorífico superior de $HHV = 37253 \text{ kJ/m}^3_N$.

FIGURA 11 – ESTRUTURA FÍSICA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25TMC



Fonte: [30]

TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO GÁS NATURAL UTILIZADO NA PC25™C

Substância	Máxima fração volumétrica (%)
metano	100,00
etano	10,00
propano	5,00
butano	1,25
pentano, hexano e outros hidrocarbonetos de tipo C ₆₊	0,50
CO ₂	3,00
O ₂	0,20
N ₂	4,00
enxofre total	30,00 (6 méd. ppmV)
NH ₃	1,00 ppmV
cloro	0,05 ppmW

Fonte: [30]

A potência elétrica útil produzida em regime nominal é de 200 kW. Nessa configuração, a diferença entre a energia que alimenta a célula de combustível e a potência nominal representa a energia perdida para o ambiente, conforme mostrado na figura 12. Além da estrutura de produção da célula de combustível, a análise energética e exérgica considera também a definição dos combustíveis, dos produtos e das perdas (estrutura produtiva) para os subsistemas considerados na figura 12, conforme tabelas 5 e 6.

FIGURA 12 – ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25™C

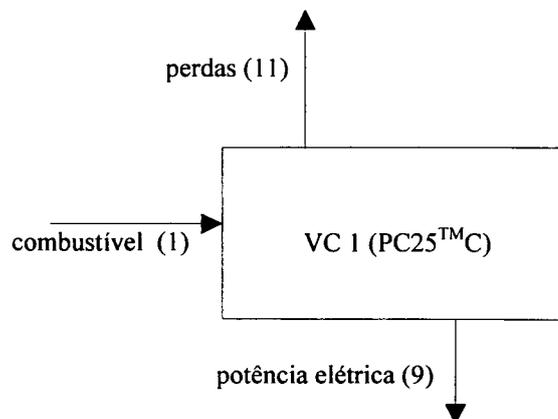


TABELA 5 – EQUIPAMENTOS E FLUXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA PC25TMC

Equipamentos	Fluxos
1. célula de combustível pc25 tm c na configuração gex-o	1. gás natural 9. potência elétrica 11. perdas

TABELA 6 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25TMC

Equipamento	Combustível	Produtos	Perdas
VC 1	(1)	(9)	(11)
planta (GEX-O)	(1)	(9)	(11)

Os fluxos de energia e exergia associados a cada corrente são indicados na tabela 7.

TABELA 7 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PC25TMC

Fluxo	GEX-O	
	Fluxo de energia (kW)	Fluxo de exergia (kW)
gás natural (1)	554,58	554,58
potência elétrica (9)	200,00	200,00
calor (11)	354,58	0,00

Com base nos resultados na tabela 7, estima-se que a eficiência, tanto pela Primeira como pela Segunda Lei da Termodinâmica seja da ordem de 36%. A presença de um fluxo de energia de 354,58 kW associado ao circuito de resfriamento indica um potencial significativo para o aumento da eficiência do uso da energia do combustível.

4.2 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25TMC em regime de co-geração de energia elétrica e térmica (COGEX-Q)

A configuração representa uma alternativa para o uso de células de

diferenças entre a configuração COGEX-Q e a configuração-referência GEX-O decorrem do fato de que, nesse caso, a energia térmica do fluxo de água de resfriamento representa um produto da planta, e não uma perda, como considerado inicialmente. A nova definição dos combustíveis, dos produtos e das perdas (estrutura produtiva) para os subsistemas considerados na figura 13 é mostrada na tabela 8. Tratando-se de uma avaliação de potencial de aumento de eficiência, foi pressuposto que não existem perdas geradas pelo funcionamento das bombas d'água de rotação variável, das válvulas e do reservatório visto que os erros são desprezíveis.

TABELA 8 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

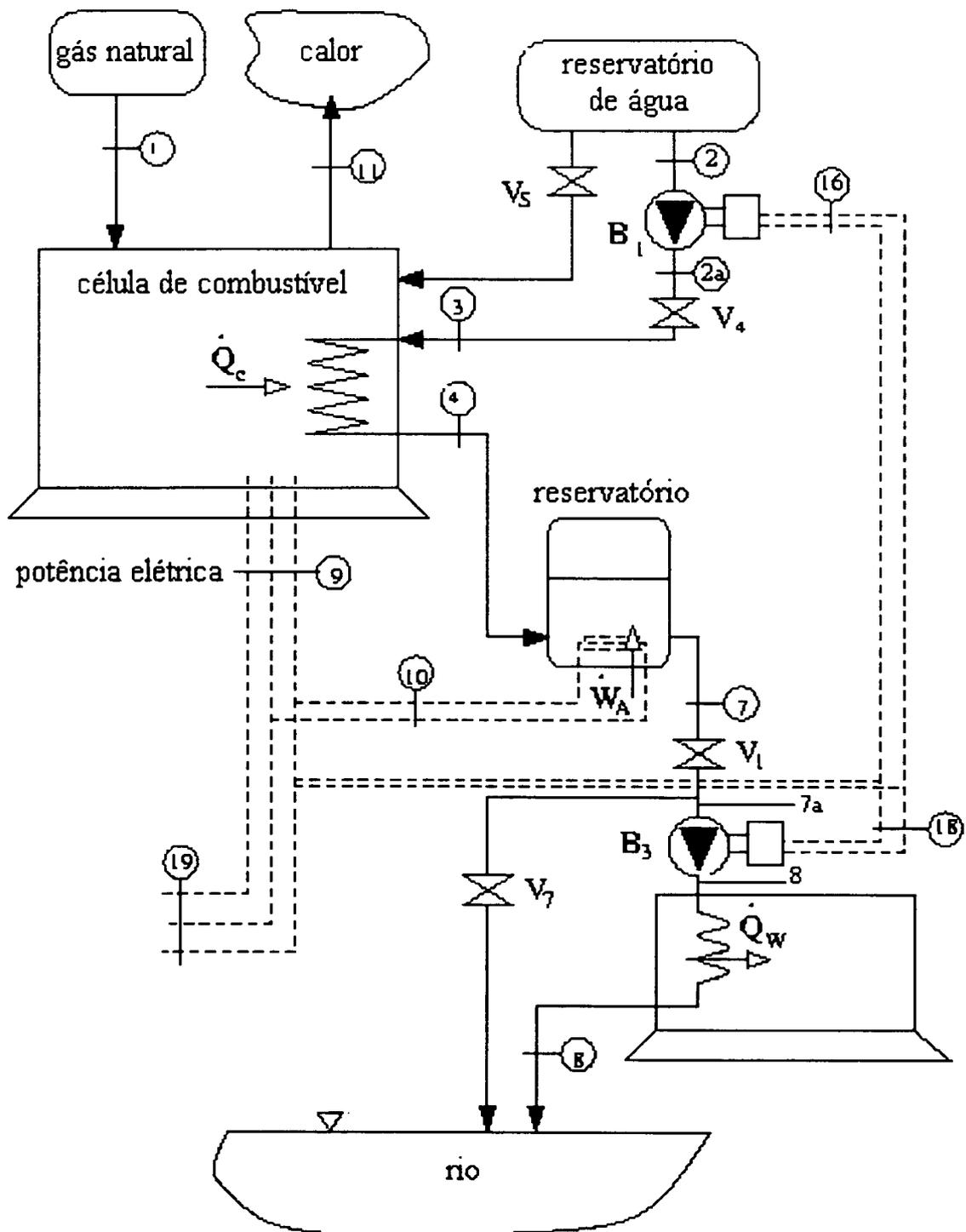
Equipamento	Combustível	Produtos	Perdas
VC 1 (PC25 TM C)	(1)	(9)+(16)+(18)+(4)-(3)	(11)
VC 2 (bomba B ₁)	(16)	(2a)-(2)	-
VC 3 (válvula V ₄)	(2a)	(3)	-
VC 4 (reservatório)	(4)	(7)	-
VC 5 (válvula V ₁)	(7)	(7a)	-
VC 6 (bomba B ₃)	(18)	(8)-(7a)	-
Planta (COGEX-Q)	(1)	(9)+(8)	(11)

As propriedades termodinâmicas da água nas seções características do circuito de resfriamento são apresentadas na tabela 9.

TABELA 9 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

Seção	P (Mpa)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	e _x (kJ/kg)
0	0,10	298,00	104,96	0,3673	0,000
2	0,10	299,76	112,41	0,3919	0,120
2a	0,20	299,76	12,40	0,3919	0,120
3	0,18	299,76	112,40	0,3919	0,110
4	0,16	352,39	332,40	1,0678	18,590
7	0,14	352,39	332,40	1,0678	18,590
7a	0,12	352,40	332,40	1,0680	18,530
8	0,12	352,40	332,40	1,0680	18,530

FIGURA 13 – ESTRUTURA FÍSICA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25™C



Fonte: [30]

Os fluxos de energia e exergia associados a cada corrente são indicados na tabela 10, para um regime térmico caracterizado pela vazão mássica de água de resfriamento $\dot{m}_2 = 0,95 \text{ kg/s}$, temperatura $T_3 = 26,7^\circ \text{C}$ e $T_4 = 79,4^\circ \text{C}$.

TABELA 10 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-Q PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

Fluxo	COGEX-Q	
	Fluxo de energia (kW)	Fluxo de exergia (kW)
gás natural (1)	554,58	554,58
água de resfriamento (2)	106,79	0,11
água de resfriamento (2a)	106,79	0,11
água de resfriamento (3)	106,79	0,10
água de resfriamento (4)	315,78	17,66
água de resfriamento (7)	315,78	17,66
água de resfriamento (7a)	315,78	17,66
água de resfriamento (8)	315,78	17,66
potência elétrica (9)	199,88	199,88
calor (11)	145,59	0,00
potência auxiliar (16)	0,06	0,06
potência auxiliar (18)	0,06	0,06

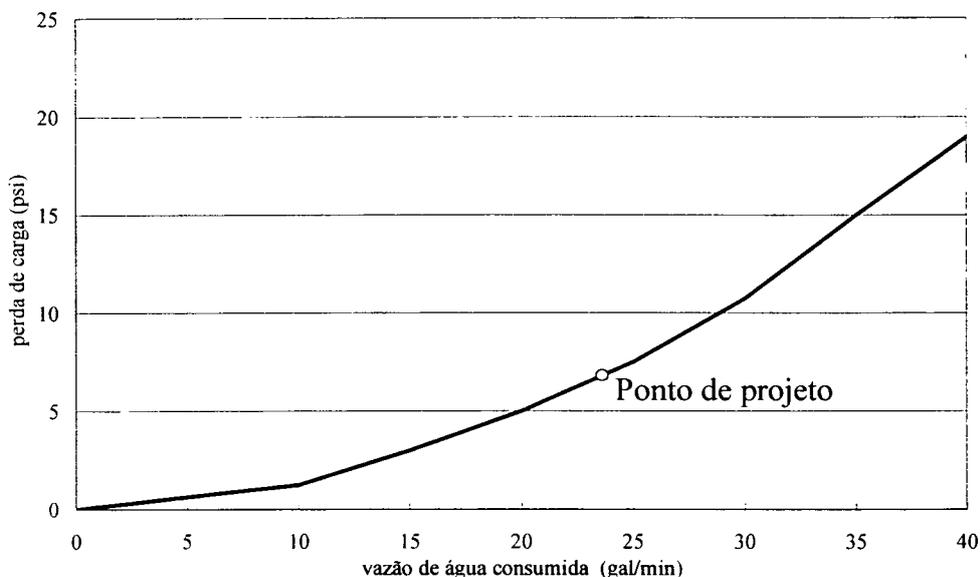
A potência auxiliar, necessária para o acionamento da bomba d'água (B_1 na figura 13), foi assim calculada:

$$\dot{W}_{16} = \dot{m}_2 \frac{\Delta p_{2-2a}}{\rho} \quad (16)$$

A perda de carga no circuito de resfriamento, $\Delta p_{3-4}(\dot{m}_2)$, depende da vazão mássica \dot{m}_2 como mostrado na figura 14. Conforme as recomendações apresentadas no manual de instalação da célula PC25TMC [30], foi considerado que, durante o processo de bombeamento, a pressão da água de resfriamento aumenta duas vezes o valor Δp_{3-4} [30].

A potência elétrica líquida da célula de combustível resulta da diferença entre o valor nominal de $\dot{W}_9 = 200 \text{ kW}$ e \dot{W}_{16} .

FIGURA 14 – PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA NO SISTEMA DE RESFRIAMENTO DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL (TROCADOR DE CALOR HEX880)



Fonte: [30]

4.3 Análise energética e exergética de desempenho da célula de combustível PC25TMC em regime de co-geração de energia elétrica e frio (COGEX-F)

A configuração COGEX-F representa uma alternativa para o uso de células PC25TMC, para geração simultânea de energia elétrica e frio, com maior eficiência da energia química do combustível.

A diferença entre esta configuração e a configuração-referência (GEX-O) consiste na presença de um equipamento frigorífico com ciclo de absorção (WFC-10, *Yazaki Energy Systems, Inc.* – anexo 3), movido com a energia térmica removida durante o processo de resfriamento da célula de combustível.

A nova definição dos combustíveis, dos produtos e das perdas para os subsistemas considerados na figura 15 é mostrada na tabela 11. Foi pressuposto que não existem perdas geradas pelo funcionamento da bomba d'água de rotação variável, da válvula V_2 e do reservatório.

FIGURA 15 – ESTRUTURA FÍSICA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

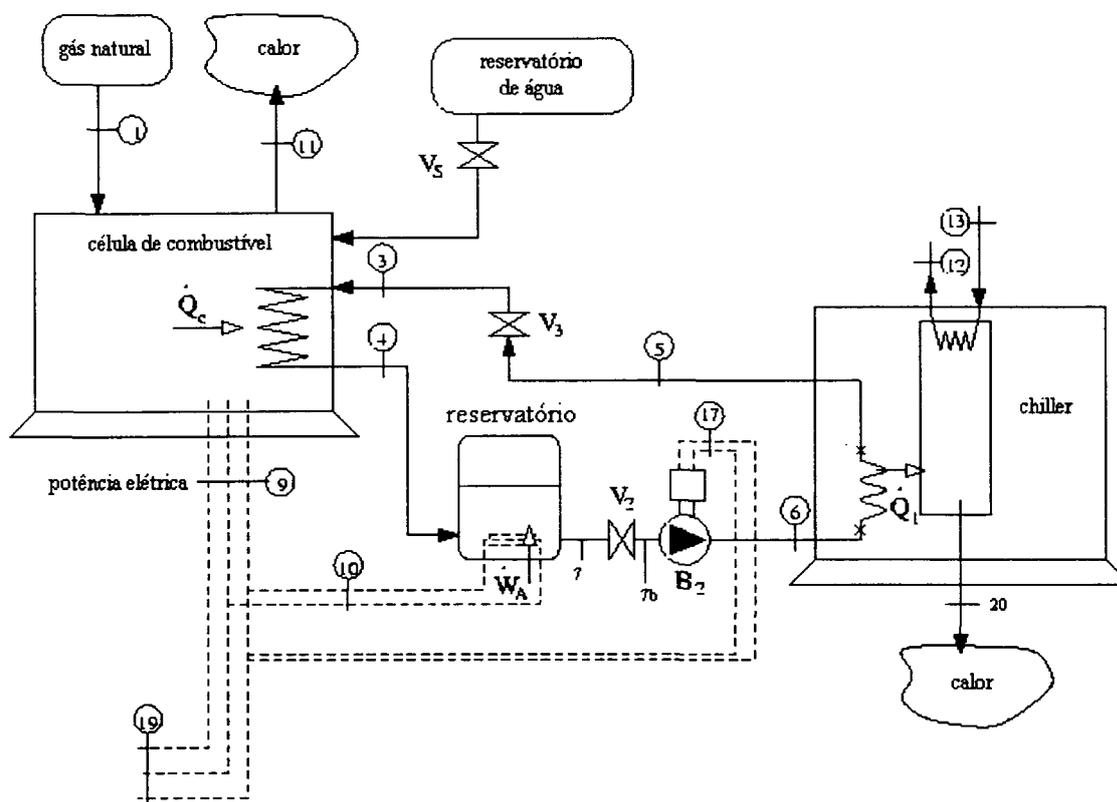


TABELA 11 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

Equipamento	Combustível	Produtos	Perdas
VC 1 (PC25 TM C)	(1)	(9)+(17)+(4)-(3)	(11)
VC 2 (reservatório)	(4)	(7)	-
VC 3 (válvula V ₂)	(7)	(7b)	-
VC 4 (bomba B ₂)	(17)	(6)-(7b)	-
VC 5 (WFC-10)	(6)-(5)	(12)-(13)	(20)
VC 6 (válvula V ₃)	(5)	(3)	(21)
planta (COGEX-F)	(1)	(9)+(12)-(13)	(11)+(20)+(21)

Os fluxos de energia e exergia associados a cada corrente são indicados na tabela 12, para um regime térmico caracterizado pela vazão mássica de água de resfriamento $\dot{m}_2 = 2,36 \text{ kg/s}$, temperatura $T_3 = 71,1^\circ \text{C}$ e $T_4 = 79,4^\circ \text{C}$. As propriedades termodinâmicas da água nas seções características do circuito de resfriamento são apresentadas na tabela 13.

TABELA 12 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

Fluxo	COGEX-F	
	Fluxo de energia (kW)	Fluxo de exergia (kW)
gás natural (1)	554,58	554,58
água de resfriamento (3)	702,57	32,12
água de resfriamento (4)	785,88	44,16
água quente (7)	785,88	44,16
água quente (7b)	785,88	44,06
água quente (6)	784,94	44,11
água de resfriamento (5)	739,62	37,38
calor (11)	271,27	0,00
água fria (12)	27,39	1,45
água fria (13)	54,58	0,37
potência elétrica (9)	199,94	199,94
potência auxiliar (17)	0,06	0,06
calor (20)	72,51	0,00
calor (21)	37,05	0,00

TABELA 13 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CONFIGURAÇÃO COGEX-F PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

Seção	p (Mpa)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	e _x (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)
0	0,10	298,00	104,96	0,3673	0,00	-
3	0,25	344,10	297,70	0,9681	13,61	2,36
4	0,20	352,32	332,58	1,0694	18,71	2,36
7	0,18	352,32	332,58	1,0694	18,71	2,36
7b	0,16	352,33	332,58	1,0695	18,67	2,36
6	0,30	352,40	332,60	1,0695	18,76	2,36
5	0,26	347,84	313,40	1,0133	15,84	2,36
12	0,25	282,00	38,04	0,1361	2,01	0,72
13	0,20	291,00	75,80	0,2678	0,51	0,72

4.4 Análise energética e exergetica de desempenho da célula de combustível PC25TMC em regime de trigeriação de energia elétrica, térmica (calor) e frio (TRIGEX-FQ)

A configuração TRIGEX-QF representa uma aplicação de células PC25TMC

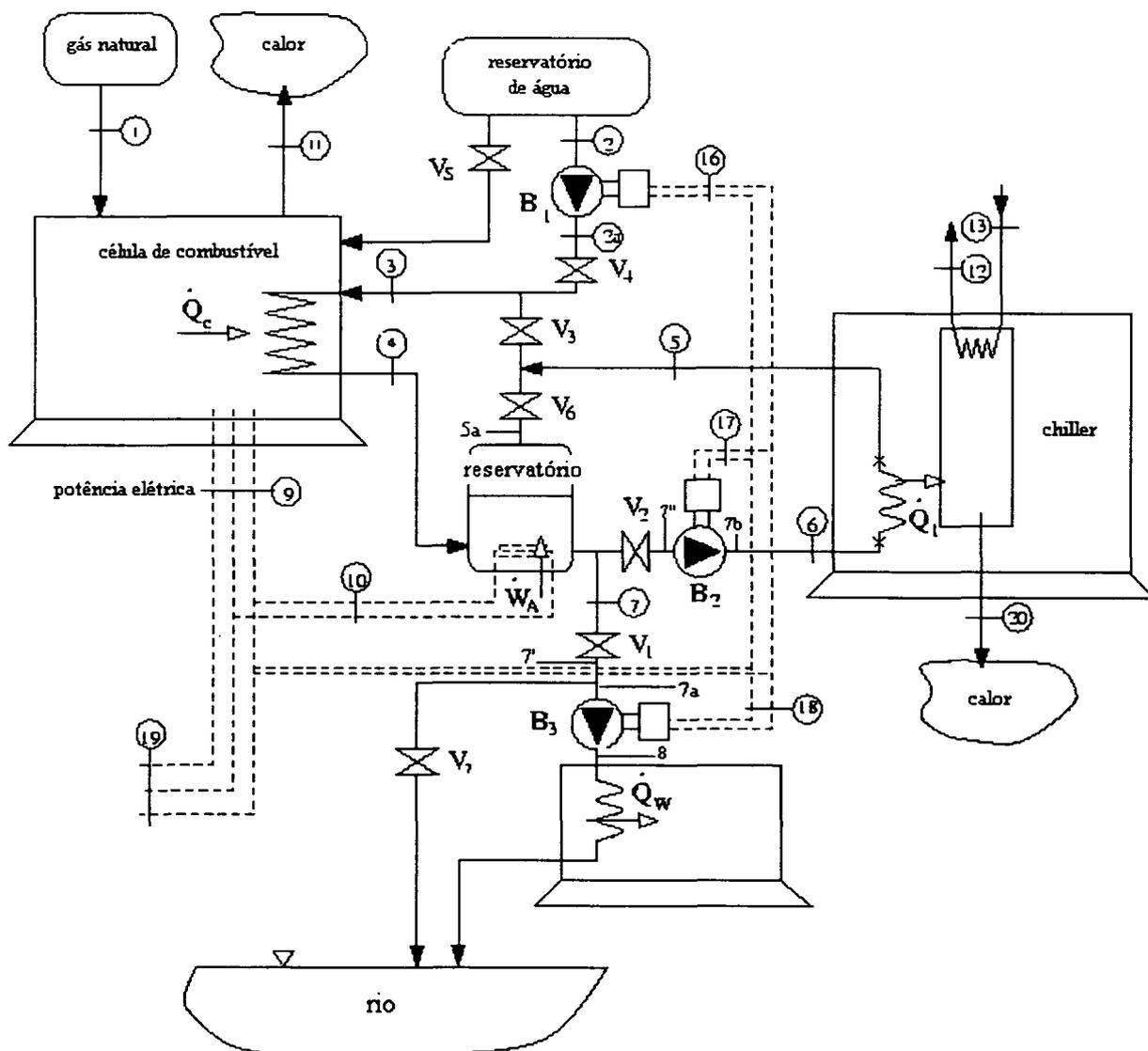
na geração simultânea de energia elétrica, energia térmica e frio. A diferença entre esta configuração e as anteriores (COGEX-Q e COGEX-F) consiste na presença simultânea de equipamentos para aproveitamento de energia térmica da água quente e de um equipamento frigorífico com ciclo de absorção (WFC-10, *Yazaki Energy Systems, Inc.* – anexo 3), movido com uma parte da energia térmica removida durante o processo de resfriamento da célula de combustível.

A nova definição dos combustíveis, dos produtos e das perdas para os subsistemas considerados na figura 16 é mostrada na tabela 14. Tratando-se de uma avaliação de potencial de aumento de eficiência, foi pressuposto que não existem perdas geradas pelo funcionamento das bombas d'água de rotação variável, das válvulas V_1, V_2 e V_4 , e do reservatório.

TABELA 14 - DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC

Equipamento	Combustível	Produtos	Perdas
VC 1 (PC25 TM C)	(1)	(9)+(16)+(17)+(18)+(4)-(3)	(11)
VC 2 (bomba B ₁)	(16)	(2a)-(2)	-
VC 3 (válvula V ₄)	(2a)	(3)	-
VC 4 (reservatório)	(4)+(5a)	(7)	-
VC 5 (válvula V ₁)	(7')	(7a)	-
VC 6 (bomba B ₃)	(18)	(8)-(7a)	-
VC 7 (válvula V ₂)	(7'')	(7b)	-
VC 8 (bomba B ₂)	(17)	(6)-(7b)	-
VC 9 (WFC-10)	(6)-(5)	(12)-(13)	(20)
VC 10 (válvula V ₆)	(5)	(5a)	-
planta (TRIGEX-QF)	(1)	(9)+(8)-(2)+(12)-(13)	(11)+(20)

FIGURA 16 - ESTRUTURA FÍSICA DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25™C



Os fluxos de energia e exergia associados a cada corrente são indicados na tabela 15, para um regime térmico caracterizado pela vazão mássica de água de resfriamento $\dot{m}_2 = 0,95 \text{ kg/s}$, temperatura $T_3 = 26,7^\circ \text{C}$ e $T_4 = 85,0^\circ \text{C}$.

As propriedades termodinâmicas da água nas seções características do circuito de resfriamento são apresentadas na tabela 16.

TABELA 15 – FLUXOS DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25™C

Fluxo	TRIGEX-QF	
	Fluxo de energia (kW)	Fluxo de exergia (kW)
gás natural (1)	554,58	554,58
água de resfriamento (2)	106,79	0,11
água de resfriamento (2a)	106,78	0,11
água de resfriamento (3)	106,78	0,10
água de resfriamento (4)	338,20	21,77
água quente (7')	305,14	16,11
água quente (7a)	305,14	16,00
água quente (8)	305,14	16,00
potência elétrica (9)	199,82	199,82
potência auxiliar (16)	0,06	0,06
potência auxiliar (17)	0,06	0,06
potência auxiliar (18)	0,06	0,06
calor (11)	123,16	0,00
água quente (7'')	758,03	40,03
água quente (7b)	758,03	39,46
água quente (6)	758,50	39,93
água de resfriamento (5)	719,56	34,41
água de resfriamento (5a)	719,56	34,41
água fria (12)	20,54	1,09
água fria (13)	40,93	0,28
calor (20)	59,33	0,00

TABELA 16 – PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA CONFIGURAÇÃO TRIGEX-FQ PARA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25™C

Seção	p (Mpa)	T (K)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	ex (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)
0	0,10	298,00	104,96	0,37	0,00	-
2	0,10	299,76	112,41	0,39	0,12	0,95
2a	0,20	299,76	112,40	0,39	0,12	0,95
3	0,18	299,76	112,40	0,39	0,11	0,95
4	0,18	358,00	356,00	1,13	22,92	0,95
7'	0,18	349,70	321,20	1,04	16,96	0,95
7a	0,12	349,72	321,20	1,04	16,84	0,95
8	0,12	349,72	321,20	1,04	16,84	0,95
7''	0,18	349,70	321,20	1,04	16,96	2,36
7b	0,17	349,75	321,20	1,04	16,72	2,36
6	0,24	349,76	321,40	1,04	16,92	2,36
5	0,20	345,82	304,90	0,99	14,58	2,36
5a	0,18	345,82	304,90	0,99	14,58	2,36
12	0,25	282,00	38,04	0,14	2,01	0,54
13	0,20	291,00	75,80	0,27	0,51	0,54

4.5 Resultados e conclusões da análise energética e exergetica da célula de combustível PC25TMC

As análises foram realizadas para determinar os gastos unitários exergeticos (tabela 17) e econômicos (tabela 18) dos produtos (energia elétrica, água quente e água fria) obtidos nas quatro configurações anteriormente mencionadas, a partir das seguintes hipóteses (anexo 4):

- a) a célula de combustível gera energia elétrica em capacidade nominal (200 kW) durante 7200 h/ano, utilizando toda a energia térmica disponibilizada em cada um dos casos;
- b) o tempo de retorno de investimento (todos os componentes físicos) foi considerado de 5 anos;
- c) o fator de recuperação de capital adotado foi 0,31, utilizando-se uma taxa mínima de atratividade de 18% a.a. (taxa de juros considerada).

TABELA 17 – CUSTOS EXERGETICOS UNITÁRIOS PARA PC25TMC

	k*p, (kWex/kWex)		
	Eletricidade	Calor	Frio
GEX-0	2,77	-	-
COGEX-Q	2,55	2,56	-
COGEX-F	2,62	-	29,32
TRIGEX-FQ	2,50	3,41	0,30

TABELA 18 – CUSTOS ECONÔMICOS UNITÁRIOS PARA PC25TMC

	Custos econômicos unitários, c _p			
	Eletricidade (US\$/MWh)	Calor (US\$/Gcal)	Frio (US\$/kBtu)	Frio (US\$/TR)
GEX-0	225,78	-	-	-
COGEX-Q	207,49	251,35	-	-
COGEX-F	212,89	-	0,77	9,20
TRIGEX-FQ	203,64	19,47	0,10	1,14

Explorando todo o potencial de cada uma das alternativas de co-geração apresentadas na tabela 18, foi calculado o efeito econômico, conforme mostrado nas tabelas 19, 20, 21 e 22.

TABELA 19 – EFEITOS ENERGÉTICOS ANUAIS PARA PC25TMC

	Eletricidade (MWh)	Calor (Gcal)	Frio (TR)
GEX-0	1.440	-	-
COGEX-Q	1.439	1.958	-
COGEX-F	1.440	-	55.669
TRIGEX-FQ	1.439	1.892	41.746

TABELA 20 – RECEITA ANUAL PARA PC25TMC

	Eletricidade (1) (US\$/ano)	Calor (2) a 80°C (US\$/ano)	Frio (3) a 9°C (US\$/ano)	Total (US\$/ano)
GEX-0	50.375,43	-	-	50.375,43
COGEX-Q	50.345,33	95.445,32	-	145.790,65
COGEX-F	50.360,57	-	5.136,40	55.496,97
TRIGEX-FQ	50.360,57	92.229,30	3.851,82	146.441,69

TABELA 21 – CUSTO TOTAL ANUAL PARA PC25TMC

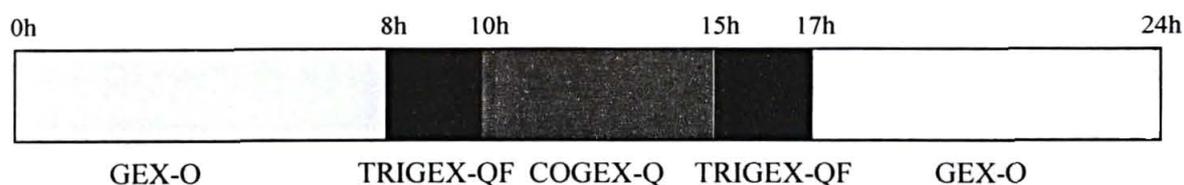
	Eletricidade (1) (US\$/ano)	Calor (2) a 80°C (US\$/ano)	Frio (3) a 9°C (US\$/ano)	Total (US\$/ano)
GEX-0	325.133,43	-	-	325.133,43
COGEX-Q	298.606,85	27.525,06	-	326.131,91
COGEX-F	306.472,79	-	20.346,36	326.819,15
TRIGEX-FQ	292.981,69	1.931,44	1.894,86	296.807,99

TABELA 22 – CUSTOS LÍQUIDOS ESTIMADOS PARA PC25TMC

Configuração	Custo líquido (US\$/ano)
GEX-0	274.758,00
COGEX-Q	180.341,26
COGEX-F	271.322,18
TRIGEX-FQ	150.366,30

Os efeitos econômicos anuais corrigidos à vista da utilização, durante o mesmo dia e em horários diferentes, de várias configurações com co-geração e trigerção foram avaliados em comparação com o uso da célula de combustível somente para a produção de energia elétrica.

FIGURA 17 – CENÁRIO DE OPERAÇÃO DA PC25TMC



Foi considerado um cenário de operação (figura 17) com uma planta TRIGEX-QF (figura 16) funcionando em diversos regimes, conforme as seguintes características:

- De 0h às 8h e das 17h às 24h: funcionamento em configuração equivalente a GEX-O (regulagem permitida através das válvulas previstas);
- das 8h às 10h e das 15h às 17h: funcionamento em configuração nominal TRIGEX-QF;
- entre 10h e 15h: funcionamento em configuração COGEX-Q (co-geração de energia térmica com o ciclo de refrigeração desligado).

Os efeitos energéticos anuais no cenário da figura 17 são apresentados na tabela 23.

TABELA 23 – EFEITOS ENERGÉTICOS ANUAIS PARA CENÁRIO DE OPERAÇÃO DA PC25TMC

	Eletricidade (MWh)	Calor (Gcal)	Frio (TR)
TRIGEX-FQ	1.439	710	6.958
horas/ano	7.200	2.700	1.200

Os custos anuais de operação da célula e as receitas são apresentados na tabela 24.

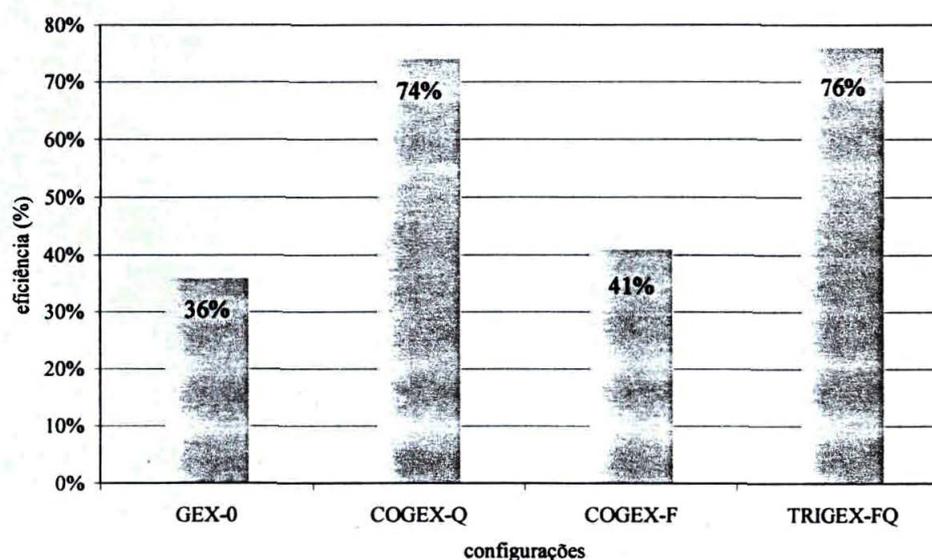
TABELA 24 – CUSTOS E RECEITAS PARA CENÁRIO DE OPERAÇÃO DA PC25TMC

Receita anual (US\$/ano)		
Eletricidade (1)	Calor (2) a 80°C	Frio (3) a 9°C
56.802,88	26.691,91	495,62
Custo anual (US\$/ano)		
Eletricidade (1)	Calor (2)	Frio (3)
292.981,69	1.931,44	1.894,86

Dessa forma, observa-se que a diferença entre os custos e a receita anual resulta em US\$ 236.178,81. Esse valor é comparável as diferentes configurações da tabela 22, indicando que, nesse cenário considerado da célula de combustível, a trigerção representa a melhor opção energética.

Com relação à eficiência do uso do gás natural, pode-se notar na figura 18 que houve um aumento de 36% (sem qualquer forma de co-geração) para 76% com a geração simultânea de energia elétrica, térmica e de efeito frigorífico.

FIGURA 18 – EFICIÊNCIA DA ENERGIA DO GÁS NATURAL PARA DIVERSAS CONFIGURAÇÕES PARA A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25TMC



A configuração TRIGEX-QF (geração simultânea de energia elétrica, térmica e de efeito frigorífico) apresenta melhor desempenho, tanto do ponto de vista da eficiência do gás natural quanto do ponto de vista termoeconômico. Recomenda-se por isso a implementação física dessa configuração, conforme detalhado na figura 16.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONOMICA DE SISTEMAS AGRO-INDUSTRIAIS COMPLEXOS COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

5.1 Análise exergética e termoeconômica da planta de secagem de grãos de soja

5.1.1 Modelagem e simulação da planta de secagem de grãos de soja

O estudo a ser desenvolvido utiliza o processo de secagem de grãos de soja. Adotar-se-á um sistema de secagem obtido através de visitas técnicas a instalações industriais (uso de planilha do anexo 1), o qual caracteriza a grande maioria das plantas existentes no Estado do Paraná atendidas pelo gasoduto Brasil-Bolívia. Maiores dados sobre os levantamentos efetuados podem ser encontrados na referência [31, 32].

Adotou-se como sistema de referência o secador contínuo de fluxo misto, modelo KW 330 R, fabricado pela empresa KEPLER WEBER, com capacidade para 100 t/h de soja seca (13% de umidade) e que requerem 4.000.000 kcal/h de energia térmica (calor) e 66,24 kW de energia elétrica para realizar a secagem dos grãos. Os parâmetros técnicos desse equipamento são típicos para a grande maioria das unidades de secagem de soja paranaenses (anexo 5). Assim, o estudo a ser realizado pode ser reproduzido para diversos sistemas.

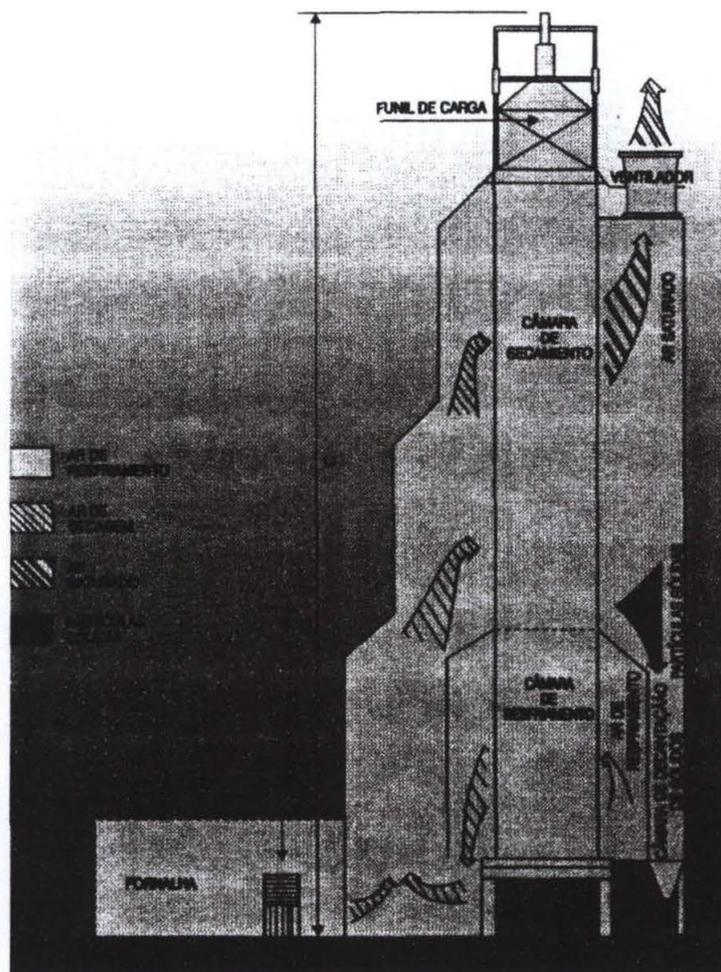
Como mostra a figura 19, esse tipo de secador é constituído basicamente de quatro volumes de controle:

- (1) fôrnalha;
- (2) câmara de mistura dos gases de combustão da fôrnalha com o ar que sai da câmara de resfriamento;
- (3) câmara de resfriamento da soja antes de saída do secador;
- (4) câmara de secagem, onde ocorre a remoção da umidade dos grãos.

Formada por dutos dispostos horizontalmente, a câmara de secagem proporciona uma vazão homogênea do ar. Também constituída de dutos, a câmara de resfriamento (1/3 da área do secador) é atravessada por um fluxo de ar em condições ambientais na entrada do volume de controle. Devido à remoção de uma parte da energia interna dos grãos durante o resfriamento da massa de soja, este fluxo de ar

atmosférico passa por um processo de pré-aquecimento. Em seguida, ele é conduzido para a câmara de mistura, onde forma, com os gases de combustão em alta temperatura que saem da fornalha, uma mistura gasosa de baixa umidade relativa para a câmara de secagem. O processo de circulação e reaproveitamento do ar pré-aquecido resulta em economia de gás natural (GN) e de energia elétrica. A circulação interna do ar pré-aquecido e dos gases quentes é controlada pela alteração de vários registros internos. Na saída da câmara de resfriamento, a soja apresenta, durante a descarga, uma leve diferença de temperatura, acima da temperatura ambiente ($5^{\circ}\text{C} \dots 8^{\circ}\text{C}$).

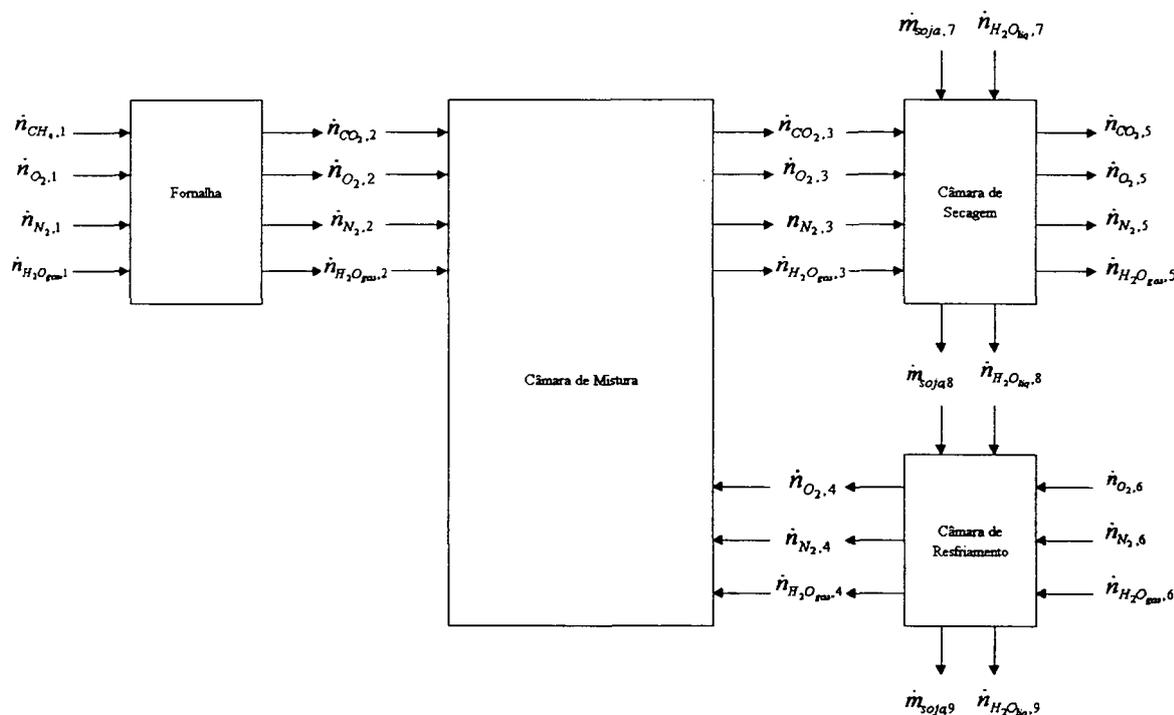
FIGURA 19 – ESTRUTURA FÍSICA DO SISTEMA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA DE GRÃOS DE SOJA



Fonte: anexo 5

Na figura 20 são apresentados os fluxos de massa e as propriedades termodinâmicas nas entradas e saídas dos quatro volumes de controle (estrutura produtiva).

FIGURA 20 – ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA DE GRÃOS DE SOJA PARA MODELAGEM



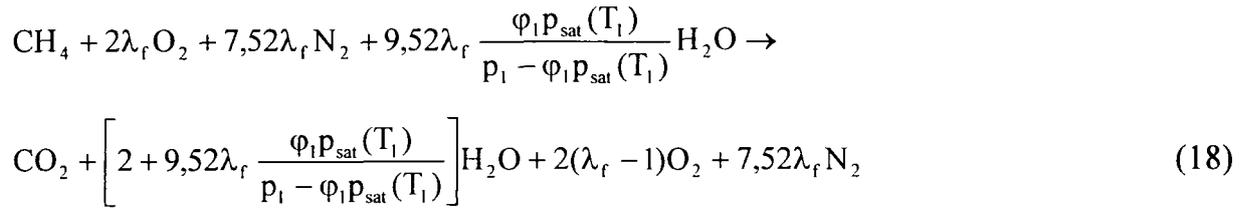
A equação de conservação da energia (Primeira Lei da Termodinâmica) para a fornalha (volume de controle 1) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{vc,1} + \dot{n}_{CH_4,1}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CH_4,1} + \dot{n}_{O_2,1}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{O_2,1} + \dot{n}_{N_2,1}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{N_2,1} + \dot{n}_{H_2O,1}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{H_2O,1} = \dot{n}_{CO_2,2}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{CO_2,2} + \dot{n}_{H_2O,2}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{H_2O,2} + \dot{n}_{O_2,2}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{O_2,2} + \dot{n}_{N_2,2}(\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_{N_2,2} \quad (17)$$

onde $-\dot{Q}_{vc,1}/(\dot{n}_{CH_4,1}PCS) = \varepsilon = 0,05 \dots 0,15$ representa as perdas de energia térmica na fornalha, \dot{n} representa a vazão molar, \bar{h}_f^0 representa a entalpia molar de formação e $\Delta\bar{h}$ representa a variação de entalpia molar entre o estado de referência e o estado termodinâmico de entrada ou saída do volume de controle.

A equação geral para a combustão de 1 kmol de metano com ar atmosférico

de umidade relativa φ_1 é a seguinte:



onde λ_f representa o excesso de ar, p_1 representa a pressão absoluta do ar atmosférico e $p_{\text{sat}}(T_1)$ representa a pressão de saturação do vapor d'água presente no ar atmosférico, à temperatura de entrada no combustor.

A tabela 25 apresenta alguns valores da temperatura dos gases de combustão T_2 na saída da fornalha, obtidos com base nas equações (17) e (18), em função do excesso de ar e da umidade relativa do ar atmosférico. Observa-se uma forte variação de T_2 em função de λ_f , enquanto a umidade relativa do ar atmosférico não produz um efeito significativo.

TABELA 25 – TEMPERATURA DE GASES DE COMBUSTÃO DO SISTEMA DE SECAGEM DE REFERÊNCIA DE GRÃOS DE SOJA PARA MODELAGEM

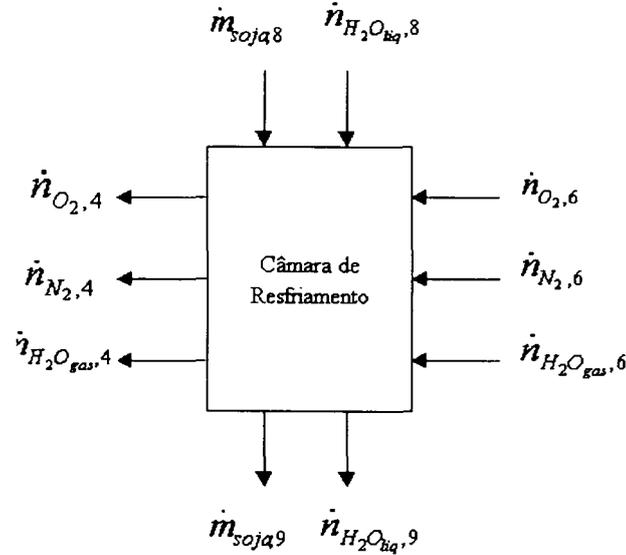
Excesso de ar	Umidade relativa do ar atmosférico	Temperatura T_2 (°C)
$\lambda_f = 1,0$	$\varphi_1 = 50\%$	1939,28
	$\varphi_1 = 60\%$	1934,82
	$\varphi_1 = 70\%$	1930,43
	$\varphi_1 = 80\%$	1926,13
$\lambda_f = 1,2$	$\varphi_1 = 50\%$	1694,78
	$\varphi_1 = 60\%$	1690,78
	$\varphi_1 = 70\%$	1686,98
	$\varphi_1 = 80\%$	1683,09
$\lambda_f = 1,4$	$\varphi_1 = 50\%$	1506,93
	$\varphi_1 = 60\%$	1503,43
	$\varphi_1 = 70\%$	1499,93
	$\varphi_1 = 80\%$	1496,43

Fonte: apêndice B

Pressupondo que a redução da umidade da soja ocorre exclusivamente na região superior do secador, o volume de controle (4) pode ser analisado considerando-

se os dados de entrada e saída, conforme a figura 21.

FIGURA 21 – ENTRADAS E SAÍDAS DO VOLUME DE CONTROLE 4 (CÂMARA DE RESFRIAMENTO)



Nesse caso, a lei da conservação de energia para a câmara de resfriamento pode ser escrita como:

$$\eta_r (\dot{m}_{soja,8} \Delta h_{soja,8} + \dot{n}_{H_2O_{liq},8} \Delta \bar{h}_{H_2O_{liq},8} - \dot{m}_{soja,9} \Delta h_{soja,9} - \dot{n}_{H_2O_{liq},9} \Delta \bar{h}_{H_2O_{liq},9}) = \dot{n}_{O_2,4} \Delta \bar{h}_{O_2,4} + \dot{n}_{N_2,4} \Delta \bar{h}_{N_2,4} + \dot{n}_{H_2O_{gas},4} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},4} - \dot{n}_{O_2,6} \Delta \bar{h}_{O_2,6} - \dot{n}_{N_2,6} \Delta \bar{h}_{N_2,6} - \dot{n}_{H_2O_{gas},6} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},6} \quad (19)$$

onde $\eta_r < 1$ indica que, durante o resfriamento, somente uma fração da energia da soja que sai do secador passa para o ar de resfriamento, e o restante representa perdas para o ambiente. Como no volume de controle não ocorre nenhuma reação química, a conservação das espécies químicas indica:

$$\dot{m}_{soja,8} = \dot{m}_{soja,9} \quad (20)$$

$$\dot{n}_{H_2O_{liq},8} = \dot{n}_{H_2O_{liq},9} \quad (21)$$

$$\dot{n}_{O_2,6} = \dot{n}_{O_2,4} \quad (22)$$

$$\dot{n}_{N_2,6} = \dot{n}_{N_2,4} = 3,76\dot{n}_{O_2,6} \quad (23)$$

$$\dot{n}_{H_2O_{gas},6} = \dot{n}_{H_2O_{gas},4} = 4,76 \frac{\phi_6 psat(T_6)}{p_6 - \phi_6 psat(T_6)} \dot{n}_{O_2,6} \quad (24)$$

onde $\phi_6 = \phi_1$ e $T_6 = T_1$. Substituindo as equações (20) – (24) na equação (19), pode ser determinada a vazão molar de oxigênio atmosférico na entrada no resfriador:

$$\dot{n}_{O_2,6} = \frac{\eta_r [\dot{m}_{soja,9} (\Delta h_{soja,8} - \Delta h_{soja,9}) + \dot{n}_{H_2O_{liq},9} (\Delta \bar{h}_{H_2O_{liq},8} - \Delta \bar{h}_{H_2O_{liq},9})]}{(\Delta \bar{h}_{O_2,4} - \Delta \bar{h}_{O_2,6}) + 3,76(\Delta \bar{h}_{N_2,4} - \Delta \bar{h}_{N_2,6}) + 4,76 \frac{\phi_6 psat(T_6) (\Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},4} - \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},6})}{p_6 - \phi_6 psat(T_6)}} \quad (25)$$

O balanço de energia no volume de controle 3 (câmara de mistura) pode ser escrito da seguinte forma:

$$\eta_m (\dot{n}_{CO_2,2} \Delta \bar{h}_{CO_2,2} + \dot{n}_{H_2O_{gas},2} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},2} + \dot{n}_{O_2,2} \Delta \bar{h}_{O_2,2} + \dot{n}_{N_2,2} \Delta \bar{h}_{N_2,2} + \dot{n}_{O_2,4} \Delta \bar{h}_{O_2,4} + \dot{n}_{N_2,4} \Delta \bar{h}_{N_2,4} + \dot{n}_{H_2O_{gas},4} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},4}) = \dot{n}_{CO_2,3} \Delta \bar{h}_{CO_2,3} + \dot{n}_{H_2O_{gas},3} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},3} + \dot{n}_{O_2,3} \Delta \bar{h}_{O_2,3} + \dot{n}_{N_2,3} \Delta \bar{h}_{N_2,3} \quad (26)$$

onde η_m é a eficiência do misturador e

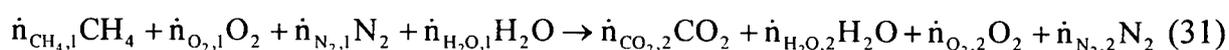
$$\dot{n}_{CO_2,3} = \dot{n}_{CO_2,2} \quad (27)$$

$$\dot{n}_{H_2O_{gas},3} = \dot{n}_{H_2O_{gas},2} + \dot{n}_{H_2O_{gas},4} \quad (28)$$

$$\dot{n}_{O_2,3} = \dot{n}_{O_2,2} + \dot{n}_{O_2,4} \quad (29)$$

$$\dot{n}_{N_2,3} = \dot{n}_{N_2,2} + \dot{n}_{N_2,4} \quad (30)$$

Comparando a equação (18) com a equação de combustão do metano na fornalha, tem-se:



podem ser identificadas as seguintes igualdades:

$$\dot{n}_{O_2,1} = 2\lambda_f \dot{n}_{CH_4,1} \quad (32)$$

$$\dot{n}_{N_2,1} = 7,52\lambda_f \dot{n}_{CH_4,1} \quad (33)$$

$$\dot{n}_{H_2O,1} = 9,52\lambda_f \frac{\varphi_1 P_{sat}(T_1)}{p_1 - \varphi_1 P_{sat}(T_1)} \dot{n}_{CH_4,1} \quad (34)$$

$$\dot{n}_{CO_2,2} = \dot{n}_{CH_4,1} = c_1 \dot{n}_{CH_4,1} \quad (35)$$

$$\dot{n}_{H_2O,2} = \left[2 + 9,52\lambda_f \frac{\varphi_1 P_{sat}(T_1)}{p_1 - \varphi_1 P_{sat}(T_1)} \right] \dot{n}_{CH_4,1} = c_2 \dot{n}_{CH_4,1} \quad (36)$$

$$\dot{n}_{O_2,2} = 2(\lambda_f - 1)\dot{n}_{CH_4,1} = c_3 \dot{n}_{CH_4,1} \quad (37)$$

$$\dot{n}_{N_2,2} = 7,52\lambda_f \dot{n}_{CH_4,1} = c_4 \dot{n}_{CH_4,1} \quad (38)$$

Combinando as equações (27) – (30) e (32) – (38) com a equação (26), pode ser calculada a vazão de metano na entrada da fornalha:

$$\dot{n}_{CH_4,1} = [\dot{n}_{O_2,4}(\Delta\bar{h}_{O_2,3} - \eta_m \Delta\bar{h}_{O_2,4}) + \dot{n}_{N_2,4}(\Delta\bar{h}_{N_2,3} - \eta_m \Delta\bar{h}_{N_2,4}) + \dot{n}_{H_2O_{gas},4}(\Delta\bar{h}_{H_2O_{gas},3} - \eta_m \Delta\bar{h}_{H_2O_{gas},4})] / [c_1(\eta_m \Delta\bar{h}_{CO_2,2} - \Delta h_{CO_2,3}) + c_2(\eta_m \Delta\bar{h}_{H_2O_{gas},2} - \Delta h_{H_2O_{gas},3}) + c_3(\eta_m \Delta\bar{h}_{O_2,2} - \Delta h_{O_2,3}) + c_4(\eta_m \Delta\bar{h}_{N_2,2} - \Delta h_{N_2,3})] \quad (39)$$

A expressão matemática da Primeira Lei da Termodinâmica para a câmara de secagem dos grãos pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{soja,7} h_{f,soja}^0 + \dot{n}_{H_2O_{liq},7} \bar{h}_{f,H_2O_{liq}}^0 + \dot{n}_{CO_2,3} \bar{h}_{f,CO_2}^0 + \dot{n}_{H_2O_{gas},3} \bar{h}_{f,H_2O_{gas}}^0 + \dot{n}_{O_2,3} \bar{h}_{f,O_2}^0 + \dot{n}_{N_2,3} \bar{h}_{f,N_2}^0 + \\ & \eta_s (\dot{m}_{soja,7} \Delta h_{soja,7} + \dot{n}_{H_2O_{liq},7} \Delta \bar{h}_{H_2O_{liq},7} + \dot{n}_{CO_2,3} \Delta \bar{h}_{CO_2,3} + \dot{n}_{H_2O_{gas},3} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},3} + \dot{n}_{O_2,3} \Delta \bar{h}_{O_2,3} + \dot{n}_{N_2,3} \Delta \bar{h}_{N_2,3}) = \\ & \dot{m}_{soja,8} h_{f,soja}^0 + \dot{n}_{H_2O_{liq},8} \bar{h}_{f,H_2O_{liq}}^0 + \dot{n}_{CO_2,5} \bar{h}_{f,CO_2}^0 + \dot{n}_{H_2O_{gas},5} \bar{h}_{f,H_2O_{gas}}^0 + \dot{n}_{O_2,5} \bar{h}_{f,O_2}^0 + \dot{n}_{N_2,5} \bar{h}_{f,N_2}^0 + \\ & \dot{m}_{soja,8} \Delta h_{soja,8} + \dot{n}_{H_2O_{liq},8} \Delta \bar{h}_{H_2O_{liq},8} + \dot{n}_{CO_2,5} \Delta \bar{h}_{CO_2,5} + \dot{n}_{H_2O_{gas},5} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},5} + \dot{n}_{O_2,5} \Delta \bar{h}_{O_2,5} + \dot{n}_{N_2,5} \Delta \bar{h}_{N_2,5} \quad (40) \end{aligned}$$

com

$$\dot{m}_{soja,7} = \dot{m}_{soja,8}, \quad \dot{n}_{H_2O_{gas},5} = \dot{n}_{H_2O_{gas},3} + \dot{n}_{H_2O_{liq},7} - \dot{n}_{H_2O_{liq},8}, \quad \dot{n}_{O_2,5} = \dot{n}_{O_2,3}, \quad \dot{n}_{N_2,5} = \dot{n}_{N_2,3}.$$

A eficiência energética da câmara de secagem – equação (40) – é calculada levando-se em conta o efeito das perdas de energia sobre as variações das entalpias, Δh_{soja} e $\Delta \bar{h}$, o que não afeta o balanço das entalpias de formação, $h_{f,\text{soja}}^0$ e \bar{h}_f^0 .

As equações (17), (19), (26) e (40) definem um sistema algébrico não-linear com solução múltipla paramétrica, que pode ser solucionado para calcular as vazões de todas as espécies químicas nas entradas e saídas dos quatro volumes de controle. Os parâmetros considerados são as temperaturas T_4 e T_5 , respectivamente na saída da câmara de mistura e na saída da câmara de secagem.

Para a avaliação das melhores soluções para se aumentar a eficiência energética no processamento da soja quando se associar uma unidade geradora de energia elétrica, vapor e ar quente de processo, considera-se a solução do sistema algébrico desenvolvido, que corresponde à eficiência máxima de secagem, ou seja, a umidade relativa máxima dos gases que saem da câmara de secagem $\varphi(T_5) = \varphi_{5,\text{max}}$.

TABELA 26 – DESEMPENHO DE VÁRIOS MODELOS DE SECADORES DE SOJA OBTIDOS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM (CONDIÇÃO DE PROJETO)

Capacidade de secagem (t/h)	Vazão total de ar (m ³ /h)	Consumo de gás natural (m ³ /h)	Consumo de energia elétrica (kWh/h)	Consumo específico (m ³ /t _{soja seca})
10	26.526,82	61,29	7,36	6,13
20	53.053,64	122,58	11,04	6,13
30	79.580,45	183,87	18,40	6,13
40	106.107,30	245,16	22,00	6,13
60	159.160,90	367,74	33,00	6,13
80	212.214,50	490,31	55,20	6,13
100	265.268,20	612,89	66,24	6,13
150	397.902,30	919,34	88,32	6,13
200	530.536,40	1.225,78	110,40	6,13
250	663.170,40	1.532,23	132,48	6,13

A tabela 26 apresenta os valores obtidos considerando-se uma velocidade desprezível do volume de ar no secador, ou seja, a energia potencial e a energia cinética presentes, devido aos exaustores, no volume de controle do misturador (apêndice B).

Os valores considerados para o sistema de referência são: temperatura ambiente de 20°C; umidade relativa do ar de gás quente a 60%; umidade de entrada da soja de 18% no secador; saída na câmara de resfriamento com 13%.

Para a soja, a temperatura de entrada dos gases de combustão na câmara de secagem é de 100°C, tendo um valor fixado em 48°C na saída para não danificar a soja.

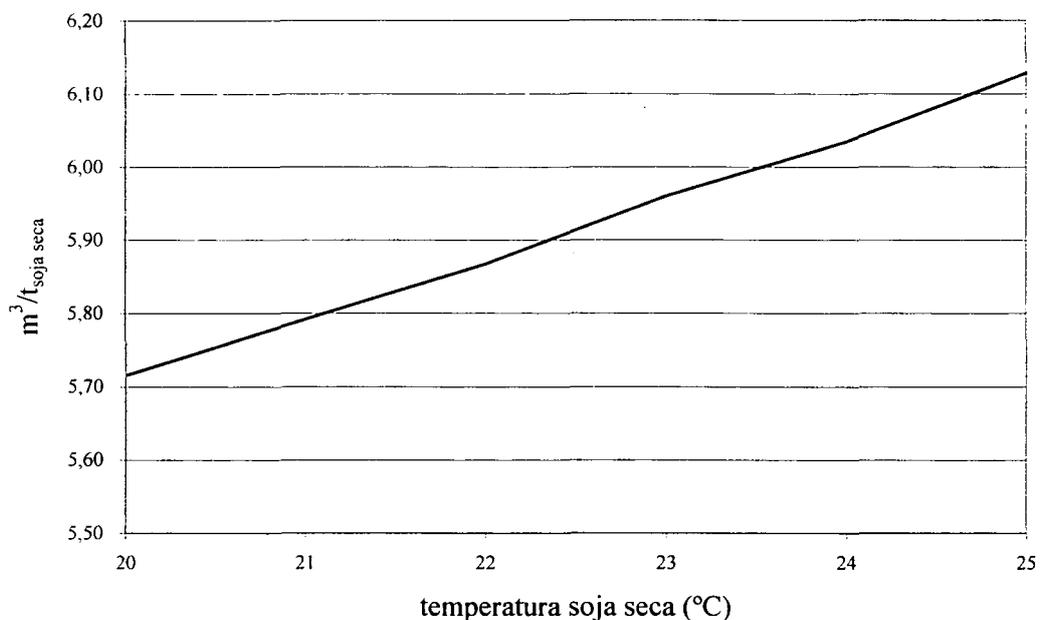
A eficiência é definida de 98% para o misturador, o secador e o resfriador, para um calor específico da soja de 2,34 kJ/kg.K, e a perda para a fornalha é de 5% quando simulada a condição de projeto da planta de secagem.

Com a modelagem, obtém-se, na saída do secador, um valor de 99,51% de umidade, numa temperatura de 31,55°C.

Os valores de vazão total do ar quente obtidos pela modelagem confirmam os dados técnicos dos fabricantes (anexo 5), o que garante a representação física do fenômeno modelado. A validação do modelo, baseada em vazão total de ar quente, foi verificada nas condições de projeto de fabricantes.

Para uma primeira avaliação da otimização do sistema de referência, pode-se verificar a influência do aumento de eficiência da câmara de resfriamento no consumo específico obtido através da simulação. O gráfico 1 apresenta, com análise baseada na Primeira Lei da Termodinâmica, o impacto da diminuição da eficiência da câmara de resfriamento, ou seja: com o aumento da temperatura de saída da soja, ocorre o aumento do consumo específico. Isso demonstra que os aspectos construtivos da câmara de secagem são extremamente relevantes para o consumo específico final da secagem, e que qualquer ação de otimização construtiva se inicia por esse volume de controle.

GRÁFICO 1 – CONSUMO ESPECÍFICO COM A DIMINUIÇÃO DA EFICIÊNCIA DA CÂMARA DE RESFRIAMENTO



5.1.2 Análise termoeconômica da planta de secagem

Para a análise termoeconômica do sistema em estudo e posterior avaliação econômica, aplicou-se o *software ANEX*, sendo que os dados de entrada do aplicativo utilizado foram obtidos do programa de simulação elaborado (apêndice B).

Para a comparação racional do sistema de referência, efetuou-se avaliação de diferentes condições, assim definidas:

- a) Condição ideal: Trata-se da situação em que não há perdas nos equipamentos que compõem a planta, porém é considerada a irreversibilidade do sistema. Fornece valores para estabelecer os limites teóricos que podem ser atingidos.
- b) Condição de projeto: É a situação em que se estima um rendimento para os componentes do sistema (fornalha com 5% de perdas, câmara de mistura, secagem e resfriamento com 98% de rendimento). Fornece valores esperados para a planta de secagem considerando a tecnologia

existente.

- c) Condição de operação: Estima-se uma condição de operação do sistema para demonstrar a aplicação da metodologia (fornalha com 10% de perdas, câmara de mistura, secagem e resfriamento com 90% de rendimento).

A figura 22 ilustra a estrutura produtiva definida para o sistema de referência, e a tabela 27 ilustra a definição dos volumes de controle e fluxos para as condições estabelecidas.

FIGURA 22 – ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA

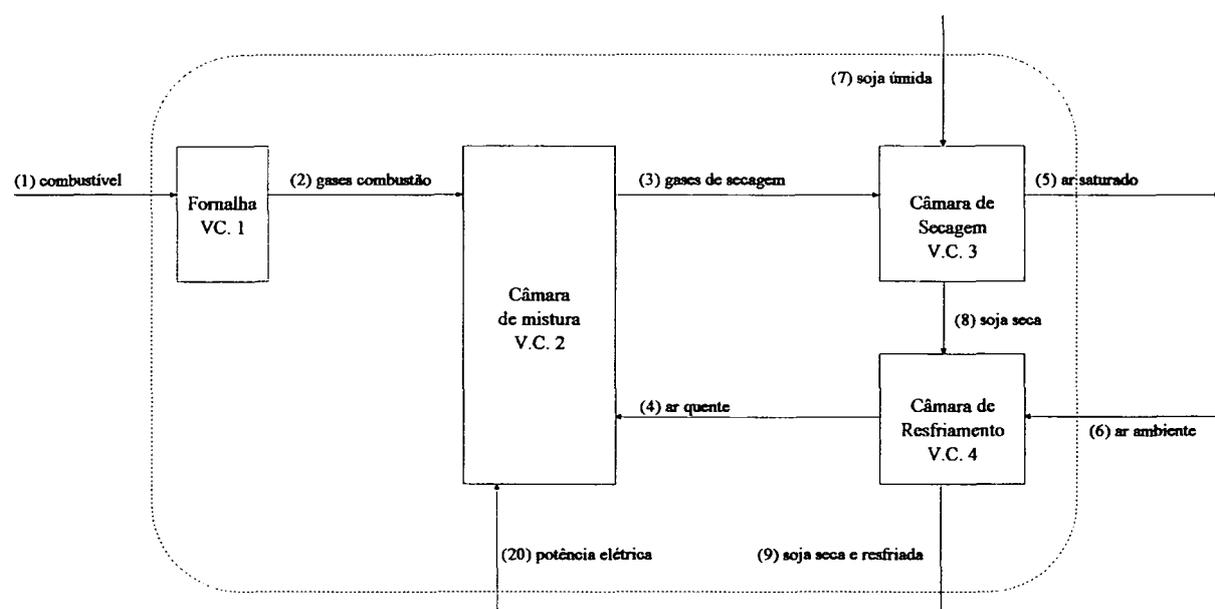


TABELA 27 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM

Equipamento	Equipamento	Recurso	Produto	Perdas
1	fornalha	1	2	-
2	câmara de mistura	2 + 20 + 4	3	-
3	câmara de secagem	3 + 7	5 + 8	-
4	câmara de resfriamento	8 + 6	4	9
	planta	1 + 20 + 6 + 7	5	9

É fundamental na Teoria do Custo Exergético escolher a melhor estrutura produtiva, ou seja, interpretar a planta com seus recursos, produtos e perdas. Na planta de secagem de grãos de soja, pode-se notar que o produto final, segundo a teoria aqui aplicada, é o fluxo 5 (ar saturado), que expressa fisicamente a umidade que é retirada da soja. Pelo conceito de exergia, a soja que sai do volume de controle 4 é considerada perda do sistema. Com um nível de agregação elevado, a planta global tem como recursos o gás natural para a fornalha, a eletricidade para o exaustor, a soja úmida e o ar ambiente. O produto nessa condição é apenas o ar saturado (umidade retirada da soja), tendo-se como perda a soja seca e resfriada (fluxo 9). O custo termoeconômico para a secagem da soja é definido pelo custo da obtenção do produto do fluxo 5 (ar saturado).

TABELA 28 – VAZÃO MÁSSICA E FLUXO DE ENERGIA E EXERGIA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM

Fluxo	Condição Ideal				Condição de Projeto			Condição de Operação			
	Temperatura (°C)	Fluxo de massa (kg/s)	Fluxo de energia (kJ/s)	Fluxo de exergia (kJ/s)	Fluxo de massa (kg/s)	Fluxo de energia (kJ/s)	Fluxo de exergia (kJ/s)	Fluxo de massa (kg/s)	Fluxo de energia (kJ/s)	Fluxo de exergia (kJ/s)	
combustível	1	20,00	2,48	5.548,02	5.066,24	2,92	6.534,13	5.966,72	4,79	10.726,95	9.795,44
gases de combustão	2	1.573,51	2,48	5.548,02	3.385,54	2,92	6.287,99	3.744,92	4,79	9.846,66	5.753,25
gases de secagem	3	100,00	77,97	10.491,84	872,92	81,13	10.778,69	912,12	97,37	13.231,56	1.112,05
ar quente	4	41,35	75,49	4.877,58	244,36	78,21	4.893,39	245,26	92,58	5.054,04	264,99
ar saturado	5	31,90	79,36	8.397,31	302,05	82,52	8.644,06	315,22	98,76	9.864,33	378,07
ar ambiente	6	19,75	75,49	3.211,40	213,78	78,21	3.327,08	221,47	92,58	3.881,34	263,20
soja úmida	7	20,00	29,17	1.549,53	3,22	29,17	1.549,53	3,22	29,17	1.549,53	3,22
soja seca	8	48,00	27,78	3.644,06	60,39	27,78	3.439,86	60,39	27,78	3.439,86	60,39
soja seca e resfriada	9	24,75	27,78	1.773,68	-	27,78	1.773,68	-	27,78	1.705,60	-
potência elétrica	20	-	-	66,24	66,24	-	66,24	66,24	-	66,24	66,24

Fonte: apêndice B

Com os valores obtidos da tabela 28, pode-se calcular a eficiência energética e exergética de cada um dos equipamentos, conforme tabela 29, verificando-se que o equipamento que provoca maior destruição de exergia é a câmara de mistura, que, na condição ideal, possui um rendimento exergético de 23,62%, seguida da câmara de secagem, com 41,37% (na referência bibliográfica [22] encontra-se este valor dentre os típicos para sistemas de secagem).

O rendimento exergético da planta é de 5,04% na condição de projeto, o que, segundo a referência bibliográfica [22], também é o valor esperado para um sistema

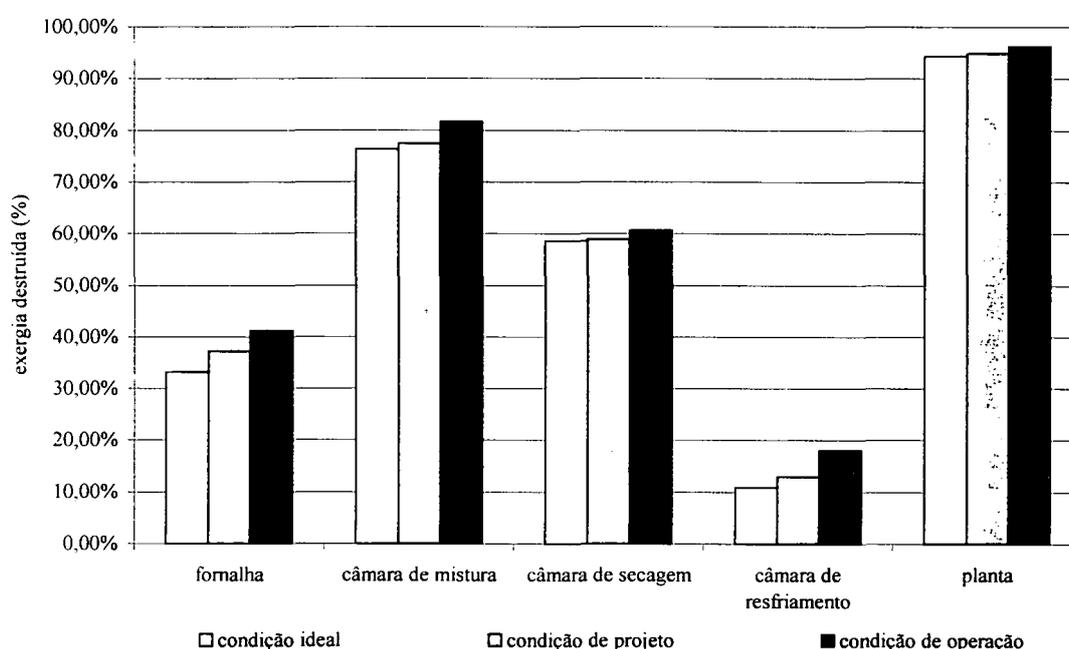
dissipativo como a planta de secagem.

TABELA 29 – RENDIMENTO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM

Equipamento	Equipamento	Condição ideal		Condição de projeto		Condição de operação	
		Rendimento Energético	Rendimento Exergético	Rendimento Energético	Rendimento Exergético	Rendimento Energético	Rendimento Exergético
1	fornalha	100,00%	66,83%	96,23%	62,76%	91,79%	58,73%
2	câmara de mistura	100,00%	23,62%	95,83%	22,49%	88,41%	18,28%
3	câmara de secagem	100,00%	41,37%	98,02%	41,03%	90,01%	39,31%
4	câmara de resfriamento	71,15%	89,13%	72,31%	87,02%	69,03%	81,89%
	planta	80,94%	5,65%	75,32%	5,04%	60,80%	3,73%

A destruição de exergia nos equipamentos pode ser vista no gráfico 2.

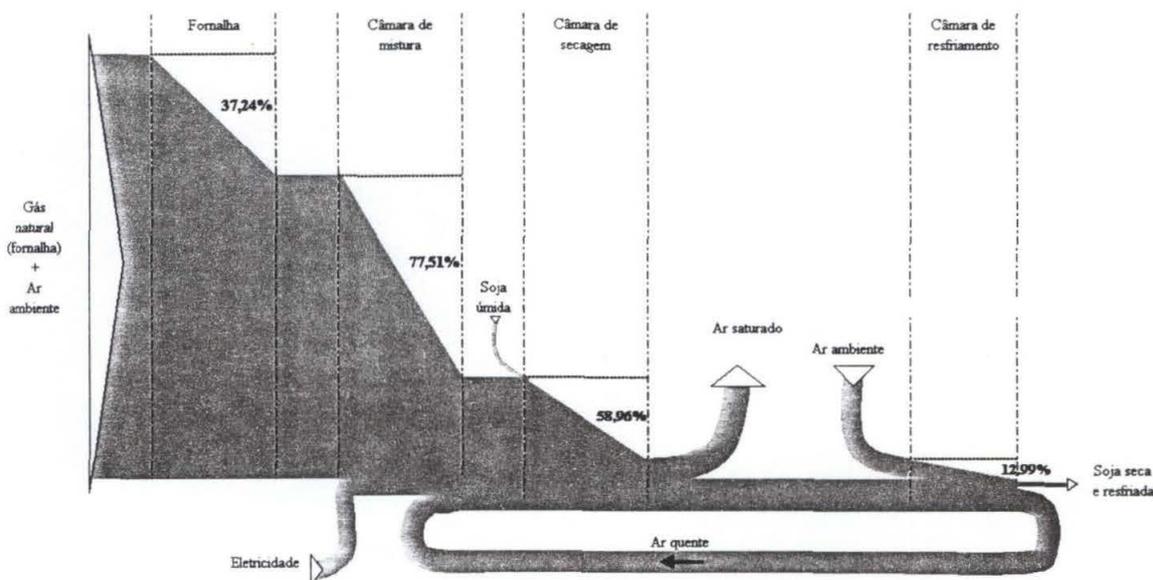
GRÁFICO 2 – EXERGIA DESTRUÍDA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM



Para melhor ilustrar a destruição de exergia no sistema dissipativo, apresenta-se o Diagrama de Grassmann (figura 23, sem escala), elaborado para a condição de projeto da planta, considerando-se os valores de exergia e exergia destruída para cada volume de controle. Isso indica, agora com uma interpretação

combinada da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica, que o equipamento que deve ser primeiramente otimizado é a câmara de mistura, e em seguida a câmara de secagem.

FIGURA 23 – DIAGRAMA DE GRASSMANN PARA CONDIÇÃO DE PROJETO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM



Com a estrutura produtiva definida e tendo-se os valores de vazão mássica, de fluxo de energia e de exergia, pode-se utilizar o aplicativo *ANEX* e obter avaliação termoeconômica.

Para cada avaliação exergoeconômica é necessário alterar a Matriz Z (unidade US\$/s), que é obtida através do aplicativo de simulação (apêndice B), com os valores anualizados para os volumes de controle e os fluxos específicos (gás natural e eletricidade).

A tabela 30 apresenta os valores anualizados obtidos.

TABELA 30 – ANUALIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM

Capacidade de secagem (t/h)	Investimento secador (US\$/ano)	Investimento queimador (US\$/ano)	Anualização dos investimentos					
			secador (US\$/ano)	queimador (US\$/ano)	O & M - secador (US\$/ano)	O & M - queimador (US\$/ano)	Gás natural (US\$/ano)	Energia elétrica (US\$/ano)
10	11.008,80	3.333,33	3.520,37	1.065,92	1.225,78	490,31	51.284,40	1.572,29
20	17.740,89	7.076,00	5.586,77	2.262,75	2.451,57	980,63	94.032,42	2.358,44
30	23.932,80	8.274,80	7.653,18	2.646,10	3.677,36	1.470,94	140.151,30	3.930,73
40	30.394,80	9.473,60	9.719,58	3.029,45	4.903,14	1.961,26	186.868,50	4.699,79
60	43.318,80	11.871,20	13.852,39	3.796,15	7.374,71	2.941,88	276.860,70	7.049,60
80	56.242,80	14.268,80	17.985,20	4.562,85	9.806,28	3.922,51	369.147,60	11.792,19
100	69.166,80	16.666,40	22.118,01	5.329,54	12.257,85	4.903,14	455.722,30	14.150,63
150	101.476,80	22.660,40	32.450,03	7.246,29	18.386,78	7.354,71	683.583,60	18.867,51
200	133.786,80	28.654,40	42.782,05	9.163,04	24.515,70	9.806,28	911.052,40	23.584,39
250	166.096,80	34.648,40	53.114,07	11.079,79	30.644,63	12.257,85	1.138.816,00	28.301,26

Fonte: apêndice B

Assim, a Matriz Z é dada para o sistema de referência como a seguir descrito:

Condição ideal:

Fornalha	-0,000700
Câmara de mistura	-0,001593
Câmara de secagem	-0,000398
Câmara de resfriamento	-0,000398
Fluxo 1 (gás natural)	0,02781
Fluxo 20 (eletricidade)	0,00098
-	0
-	0
-	0
-	0

Condição de projeto:

Fornalha	-0,000700
Câmara de mistura	-0,001593
Câmara de secagem	-0,000398
Câmara de resfriamento	-0,000398
Fluxo 1 (gás natural)	0,032751
Fluxo 20 (eletricidade)	0,00098
-	0
-	0
-	0
-	0

Condição de operação:

Fornalha	-0,000700
Câmara de mistura	-0,001593
Câmara de secagem	-0,000398
Câmara de resfriamento	-0,000398
Fluxo 1 (gás natural)	0,053767
Fluxo 20 (eletricidade)	0,00098
-	0
-	0
-	0
-	0

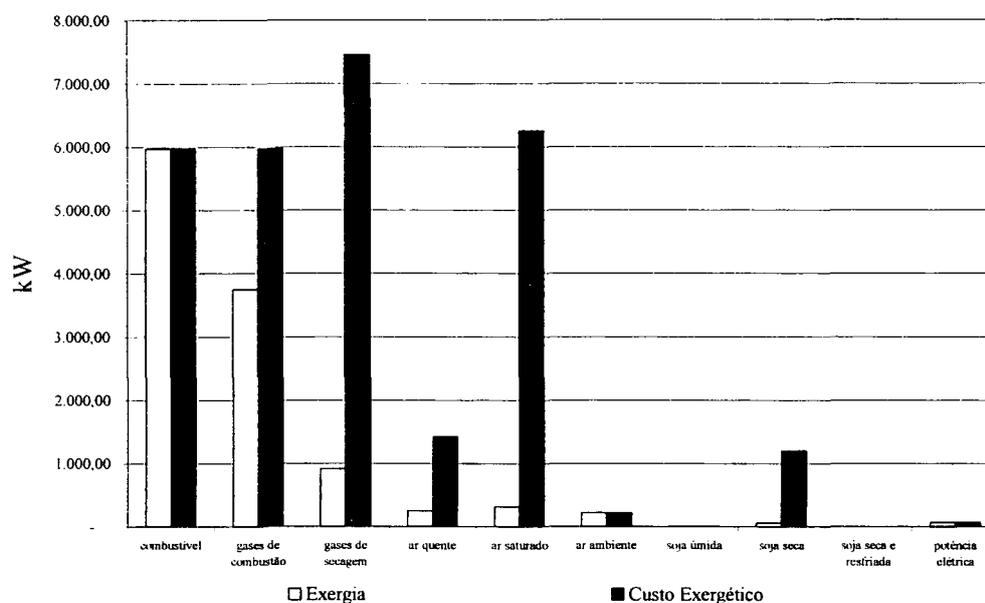
Através de fornecedor da KEPLER WEBER, foram obtidos os valores estimativos de investimento do secador e do queimador. A amortização do investimento nos equipamentos foi considerada para um período de 5 anos, a uma taxa mínima de atratividade de 18% a.a..

Com os levantamentos realizados, obteve-se o preço médio da energia elétrica, de US\$ 53,40667 /MWh, sendo que o custo do gás natural foi obtido junto à Companhia Paranaense de Gás – COMPAGAS, na tabela de preços para indústria (16/07/2002), em função de consumo no valor de US\$ 0,18589 /m³. O tempo médio de funcionamento no ano foi de 4.000 h.

Os custos de operação e manutenção (O & M) são estimados em função das necessidades de manutenção do sistema e da mão-de-obra necessária à operação, sendo utilizados os valores de referência da tabela 1.

Com os valores extraídos do aplicativo, são apresentados a seguir os valores da exergia e do custo exergético na condição de projeto (gráfico 3), o custo exergético unitário (gráfico 4) e o custo termoeconômico (gráfico 5), para cada um dos fluxos.

GRÁFICO 3 – EXERGIA E CUSTO EXERGÉTICO NA CONDIÇÃO DE PROJETO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM



Com o gráfico 4 pode-se verificar que os fluxos ar saturado e soja seca possuem o mesmo valor de custo exergético unitário, pois ambos são produtos da câmara de secagem, o que comprova que a interpretação da estrutura produtiva é a adequada para o caso.

GRÁFICO 4 – CUSTO EXERGÉTICO UNITÁRIO PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM

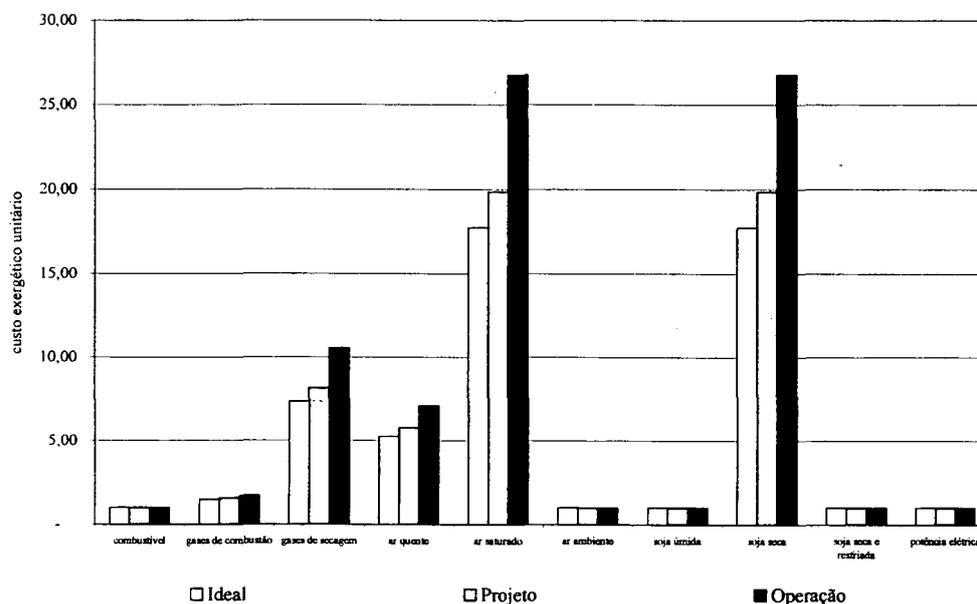
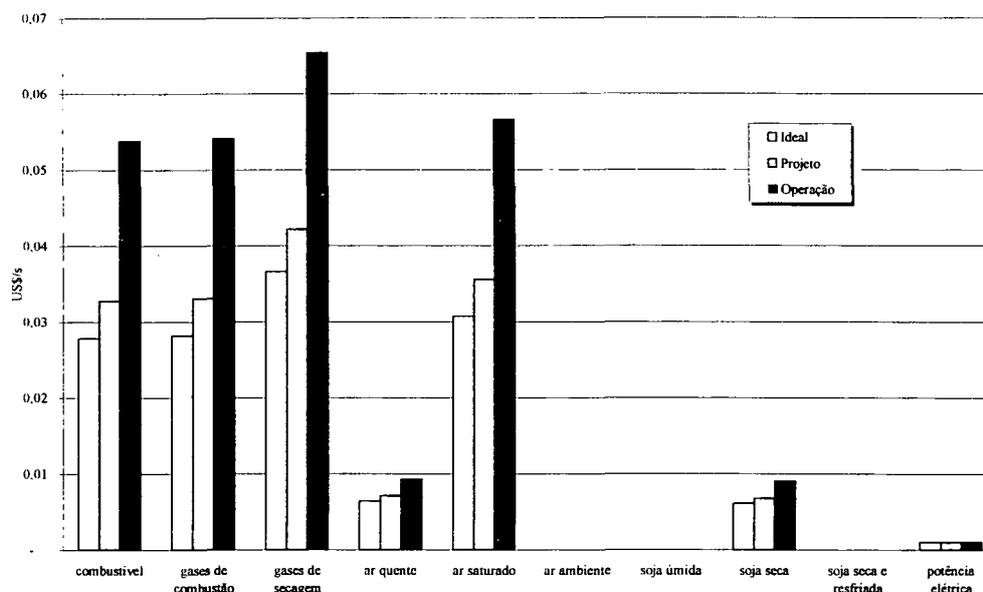


GRÁFICO 5 – CUSTO TERMoeCONÔMICO PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM

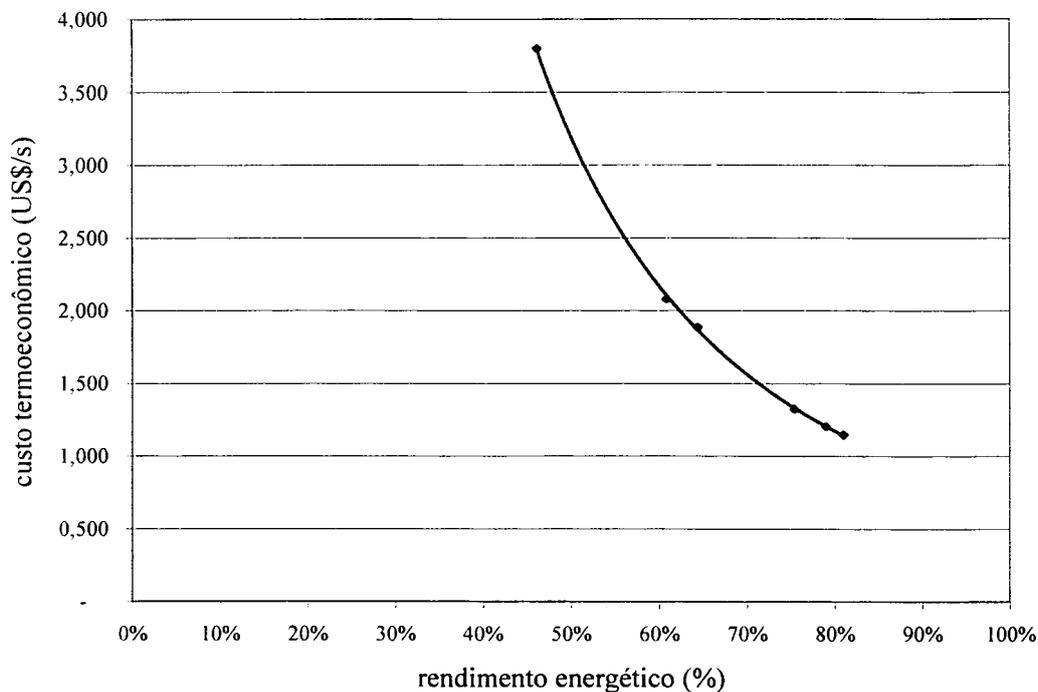


O custo de secagem é dado pelo custo do produto encontrado na aplicação de avaliação termoeconômica, ou seja, pelo custo do produto ar saturado. O custo termoeconômico do fluxo 5 nas diversas condições simuladas é de:

- condição ideal: US\$ 1,148 / $t_{\text{soja seca}}$;
- condição de projeto: US\$ 1,324 / $t_{\text{soja seca}}$;
- condição de operação: US\$ 2,080 / $t_{\text{soja seca}}$.

Os valores demonstram que o custo aumenta consideravelmente com pequenas variações na eficiência dos equipamentos e que os parâmetros de projeto somente são atingidos com a adoção de controle automatizado e preciso. O rendimento energético da planta na condição de projeto é de 75,32% e na condição de operação simulada é de 60,80%, havendo perda de rendimento de cerca de 19%. O custo termoeconômico de US\$ 1,324 / $t_{\text{soja seca}}$ passou para US\$ 2,080 / $t_{\text{soja seca}}$, ou seja, houve um aumento de 57%. Assim, o custo aumenta aproximadamente numa razão de 3 vezes a perda de rendimento na planta. O gráfico 6 resume os resultados obtidos no estudo termoeconômico.

GRÁFICO 6 – CUSTO TERMoeCONÔMICO DA SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA EM FUNÇÃO DA EFICIÊNCIA GLOBAL DA PLANTA DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NA CONDIÇÃO DE PROJETO



Assim, a equação (55) representa o custo termoeconômico da secagem de grãos de soja em função do rendimento energético global da planta, limitada à condição ideal (η_e), com rendimento de 80,94%. A equação (41) é obtida pela linha de tendência dos valores obtidos.

$$\Psi_{soja.seca} = 0,7269.\eta_e^{-2,1385} \quad (41)$$

onde $0 < \eta_e < 0,8094$.

Se efetuarmos a derivada da equação (41) obtemos a tendência do custo termoeconômico para um dado valor de rendimento energético global da planta, que tem como objetivo auxiliar na tomada de decisão.

$$\frac{\partial \Psi_{soja.seca}}{\partial \eta_e} = -1,5548.\eta_e^{-3,1385} \quad (42)$$

A planta de secagem é um sistema altamente dissipativo, ver figura 23, que pode ser classificado conforme a referência bibliográfica [6]:

- a) equipamentos cuja função primordial é a troca de calor com o meio ambiente; os exemplos mais comuns são os evaporadores de bombas de calor e os condensadores de sistema frigoríficos;
- b) sistemas projetados para acelerar processos, que são, por natureza, espontâneos, como os sistemas de secagem (de soja, milho e outros grãos), os separadores mecânicos de pó e a refrigeração abrupta de produtos (como leite e aço inoxidável), por temperatura acima do ambiente; nesses casos, o fluxo de matéria trabalha sem acréscimo de exergia, sendo que em alguns casos ocorre destruição acentuada desta;
- c) dispositivos que são necessariamente dissipativos por projeto, se bem que podem ser úteis para regular, controlar e permitir o funcionamento adequado dos demais componentes da planta, como válvulas de estrangulamento, misturador de todo tipo e aparatos de tubulações.

Os equipamentos dissipativos não apresentam produto, em termos de Teoria de Custo Exergético, sua eficiência exergética é, em regra, muito baixa. Isso não implica que a qualidade de seu funcionamento não possa ser obtida termodinamicamente. O melhor critério depende do tipo de equipamento dissipativo, sendo que, em geral, é suficiente utilizar a irreversibilidade total por unidade de produto (como kW de calor dissipado, kg de água evaporada).

Para o caso em estudo, pode-se tentar estabelecer uma eficácia do sistema de secagem em 27,80%, sabendo-se que a soja úmida possui 5 kg/s de água incorporada e que o sistema de secagem retira 1,39 kg/s. Este valor representa melhor a performance da planta que o rendimento exergético obtido da análise exergética, devido a característica dissipativa da planta.

Através dos resultados encontrados com a utilização do gás natural na secagem, pôde-se fazer um estudo comparativo dos custos de secagem com gás natural (GN), lenha, gás liquefeito de petróleo (GLP) e óleo diesel.

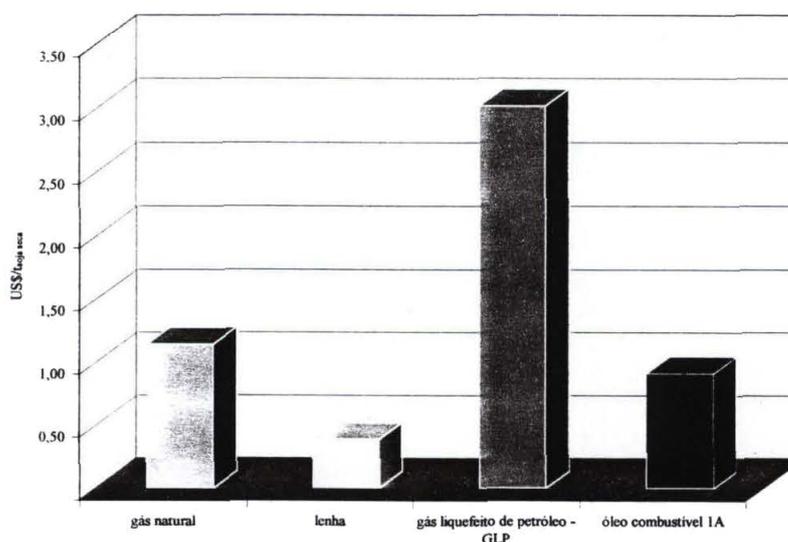
Para a comparação, adotou-se uma eficiência de 70% para a lenha (poder calorífico superior – PCS – de 1.225.000 kcal/m³_(st)), de 95% para o GLP (PCS de 11.900 kcal/kg) e de 90% para o óleo combustível 1 A (PCS de 10.000 kcal/kg). A tabela 31 e o gráfico 7 resumem os valores de custo específico de secagem (combustível) comparados.

TABELA 31 – COMPARAÇÃO RACIONAL NO CUSTO DE SECAGEM DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA PLANTA DE SECAGEM NA CONDIÇÃO DE PROJETO

Energético	Consumo específico (Unidade/t _{soja seca})	Preço		Custo específico (combustível) (US\$/t _{soja seca})
		(US\$/Unidade)	Unidade	
gás natural	6,13000	0,18589	m ³	1,14
lenha	0,06385	6,00000	m ³ _(st)	0,38
gás liquefeito de petróleo - GLP	4,90400	0,61467	kg	3,01
óleo combustível 1A	6,17807	0,14687	kg	0,91

Pode-se observar que, à vista do preço do gás natural, atualmente elevado, a simples troca de energético não representa vantagem econômica para os consumidores, considerando-se o preço da lenha e do óleo combustível 1 A .

GRÁFICO 7 – COMPARATIVO RACIONAL DE CUSTO ESPECÍFICO DE SECAGEM DO SISTEMA DE REFERÊNCIA NA CONDIÇÃO DE PROJETO



Nesta avaliação, não foi considerado os investimentos, a manutenção e a operação provocado por cada tipo de energético, visto que o objetivo é apresentar uma ordem de grandeza.

5.2 Análise exergetica e termoeconômica de sistemas complexos

Exposto o comportamento da planta de secagem de grãos de soja, verificar-se-á neste trabalho como aumentar a eficiência energética e exergetica com a introdução de outras tecnologias.

5.2.1 Co-geração com uso direto de efluentes com microturbinas

Avaliou-se a utilização de microturbinas para aumentar o rendimento energético no processamento da soja, obtendo-se como produto energia térmica (calor) para câmara de mistura e energia elétrica. Optou-se por utilizar uma situação de auto-suficiência em eletricidade da planta e uma de geração parcial de energia térmica para promover o aumento da eficiência da planta (figura 24).

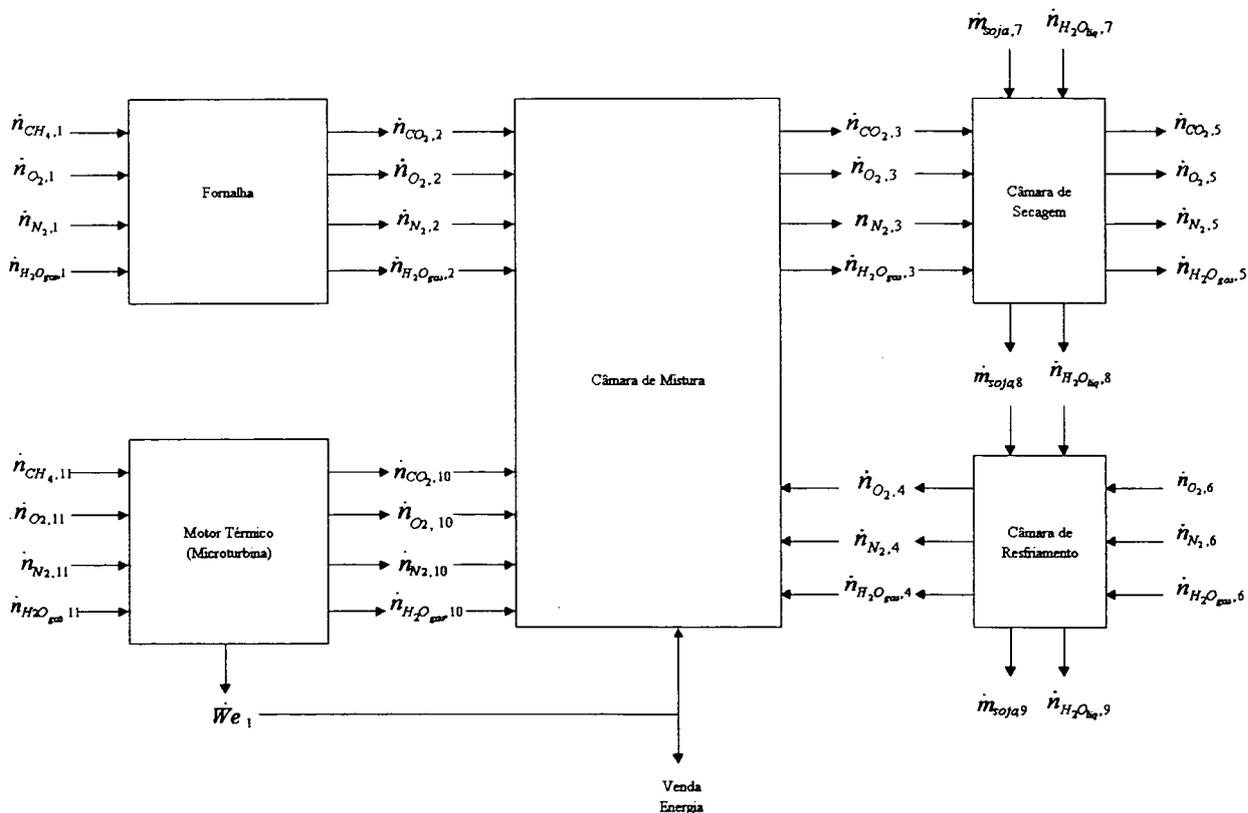
Essa configuração geral de planta de co-geração de energia térmica para secagem de grãos e energia elétrica é constituída basicamente de cinco volumes de controle:

- (1) fornalha;
- (2) câmara de mistura entre os gases de combustão da fornalha e o ar que sai da câmara de resfriamento;
- (3) câmara de resfriamento da soja antes da saída do secador;
- (4) câmara de secagem, onde ocorre a remoção da umidade dos grãos;
- (5) motor térmico acoplado a gerador elétrico (anexo 3).

Observa-se que a planta de secagem recebe na câmara de mistura os gases quentes que saem do motor térmico. Assim, parte da energia térmica liberada pelo gás natural queimado no motor térmico não será dissipada no ambiente, sendo utilizada para o aquecimento dos gases que entram na câmara de secagem de soja. Dessa maneira, é possível recuperar uma parte do valor pago pelo combustível, aumentando a

eficiência econômica do empreendimento.

FIGURA 24 – ESTRUTURA FÍSICA DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINAS



As equações (17), (19), (40) e (43) representam o modelo matemático para a avaliação do aumento da eficiência energética no processamento da soja quando se acrescenta ao sistema de referência uma unidade geradora de energia elétrica.

$$\eta_m (\dot{n}_{CO_2,2} \Delta \bar{h}_{CO_2,2} + \dot{n}_{H_2O_{gas},2} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},2} + \dot{n}_{O_2,2} \Delta \bar{h}_{O_2,2} + \dot{n}_{N_2,2} \Delta \bar{h}_{N_2,2} + \dot{n}_{O_2,4} \Delta \bar{h}_{O_2,4} + \dot{n}_{N_2,4} \Delta \bar{h}_{N_2,4} + \dot{n}_{H_2O_{gas},4} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},4} + \dot{n}_{CO_2,10} \Delta \bar{h}_{CO_2,10} + \dot{n}_{H_2O_{gas},10} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},10} + \dot{n}_{O_2,10} \Delta \bar{h}_{O_2,10} + \dot{n}_{N_2,10} \Delta \bar{h}_{N_2,10}) = \dot{n}_{CO_2,3} \Delta \bar{h}_{CO_2,3} + \dot{n}_{H_2O_{gas},3} \Delta \bar{h}_{H_2O_{gas},3} + \dot{n}_{O_2,3} \Delta \bar{h}_{O_2,3} + \dot{n}_{N_2,3} \Delta \bar{h}_{N_2,3} \quad (43)$$

onde:

$$\dot{n}_{CO_2,3} = \dot{n}_{CO_2,2} + \dot{n}_{CO_2,10} \quad (44)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}},3} = \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}},2} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}},4} + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}},10} \quad (45)$$

$$\dot{n}_{\text{O}_2,3} = \dot{n}_{\text{O}_2,2} + \dot{n}_{\text{O}_2,4} + \dot{n}_{\text{O}_2,10} \quad (46)$$

$$\dot{n}_{\text{N}_2,3} = \dot{n}_{\text{N}_2,2} + \dot{n}_{\text{N}_2,4} + \dot{n}_{\text{N}_2,10} \quad (47)$$

Os parâmetros considerados são de novo as temperaturas T_4 e T_5 , respectivamente na saída da câmara de mistura e na saída da câmara de secagem. Considera-se a solução desse sistema algébrico aquela que corresponde à eficiência máxima de secagem, ou seja, $\varphi(T_5) = \varphi_{5, \max}$.

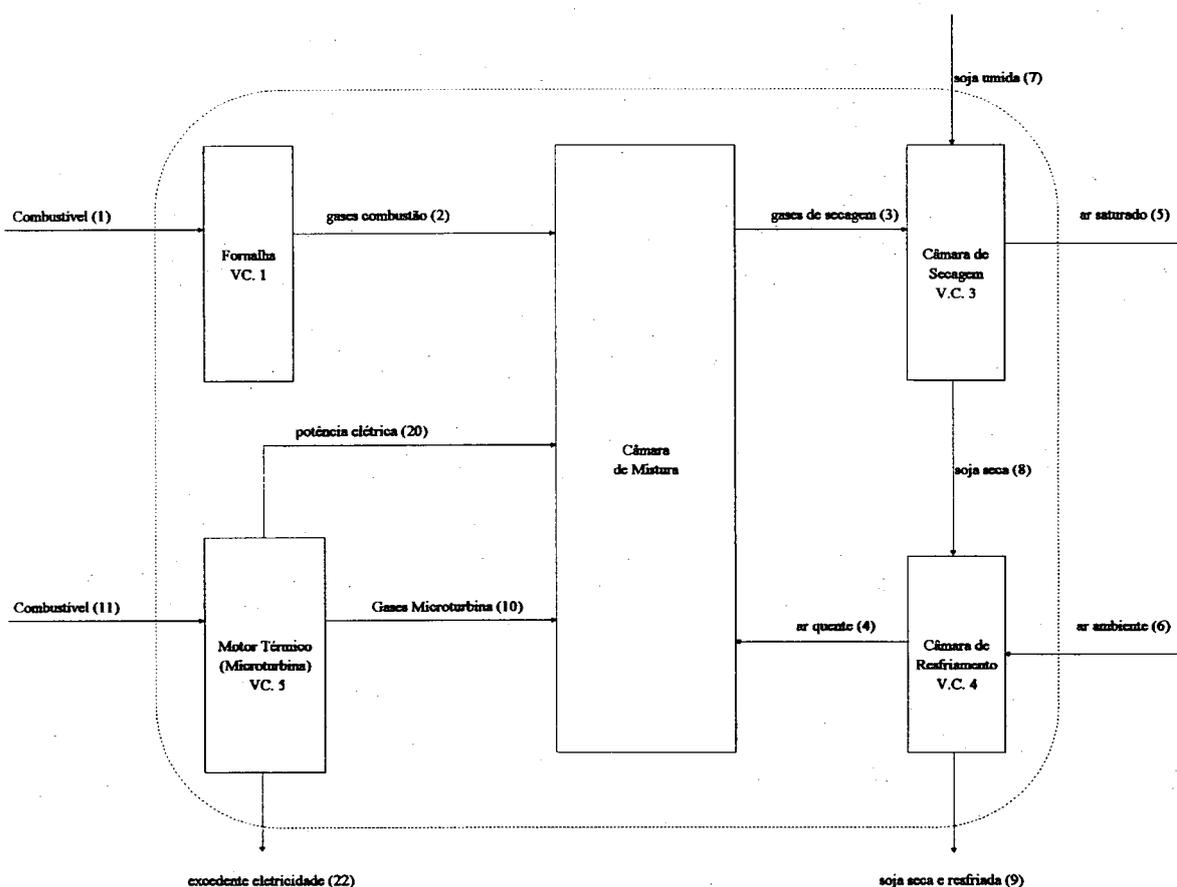
A estrutura produtiva para a configuração com microturbina para efetuar análise termoeconômica é dada pela figura 25 e pela tabela 32, e o estudo é feito dentro da condição de projeto (com 75,32% de rendimento energético global na configuração de referência).

TABELA 32 – DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA PARA ANÁLISE TERMOCONÔMICA (AUTO-SUFICIÊNCIA EM ELETRICIDADE)

Equipamento	Equipamento	Recurso	Produto	Perdas
1	fornalha	1	2	-
2	câmara de mistura	2 + 4 + 10 + 20	3	-
3	câmara de secagem	3 + 7	5 + 8	-
4	câmara de resfriamento	6 + 8	4	9
5	microturbina	11	10 + 20 + 22	-
	planta	1 + 6 + 7 + 11	5 + 22	9

Os produtos da planta nesta configuração são o ar saturado (fluxo 5) e a energia elétrica excedente produzida pela microturbina (fluxo 22).

FIGURA 25 – ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA (AUTO-SUFICIÊNCIA EM ELETRICIDADE)



A tabela 33 apresenta os valores obtidos para vazão mássica, fluxo de energia e fluxo de exergia.

Com os valores da tabela 33 pode-se calcular o rendimento energético e exergético na nova configuração, para se comparar com o sistema de referência. Assim, na tabela 34 verifica-se que a planta teve um aumento de rendimento energético de 0,73% e que o rendimento exergético aumentou 7,74%. A exergia destruída na planta foi reduzida em 0,41%, ou seja, mesmo com um aumento do rendimento exergético a exergia destruída ainda se encontra elevada, característica predominante nos equipamentos dissipativos.

TABELA 33 – VAZÃO MASSICA, FLUXO DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA

Fluxos		Temperatura (°C)	Fluxo de massa (kg/s)	Fluxo de energia (kJ/s)	Fluxo de exergia (kJ/s)
1	combustível fornalha	20,00	2,73	6.111,70	5.580,97
2	gases de combustão	1.573,43	2,73	5.881,47	3.502,81
3	gases de secagem	100,00	81,87	10.881,65	920,66
4	ar quente	39,35	78,21	4.893,39	245,26
5	ar saturado	32,10	83,26	8.738,50	318,27
6	ar ambiente	19,75	78,21	3.327,08	221,47
7	soja úmida	20,00	29,17	1.549,53	3,22
8	soja seca	48,00	27,78	3.439,86	60,39
9	soja seca e resfriada	24,75	27,78	1.773,68	-
20	potência elétrica	-	-	66,24	66,24
10	gases microturbina	272,00	0,93	338,33	74,00
11	combustível microturbina	20,00	0,93	561,12	487,47
22	excedente eletricidade	-	-	23,76	23,76

Fonte: apêndice B

TABELA 34 – RENDIMENTO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA

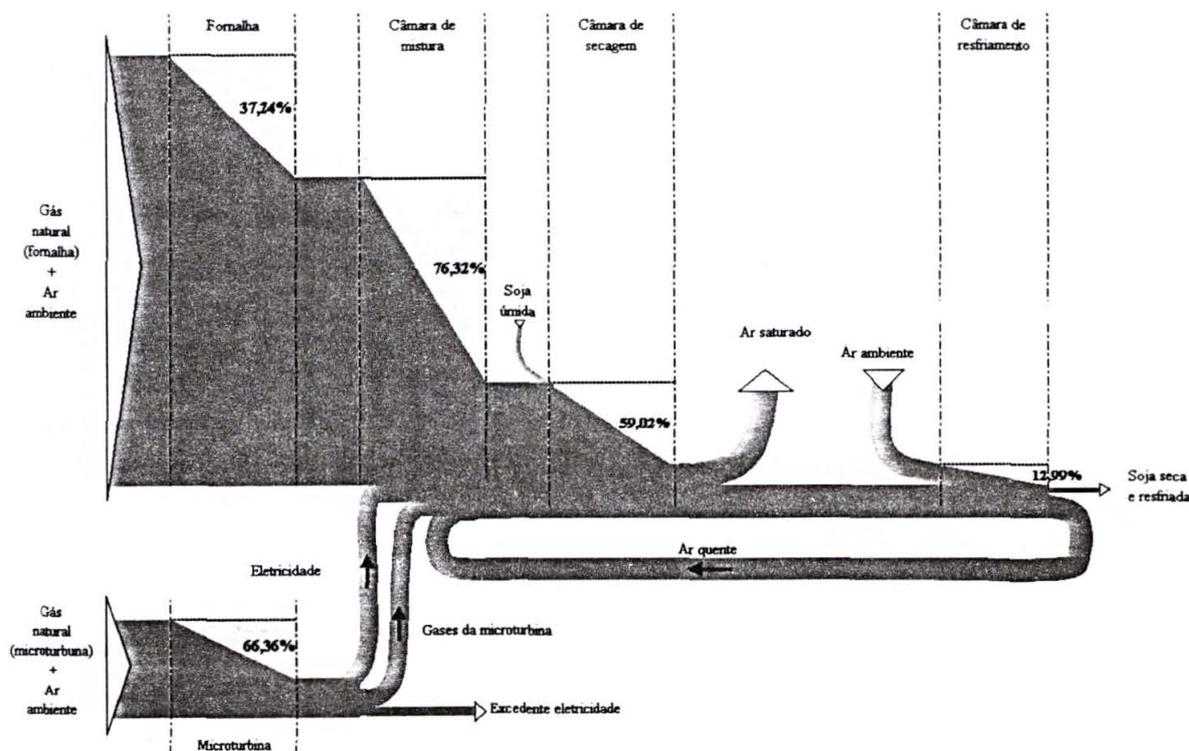
Equipamento	Energia			Rendimento Energético (%)	Exergia			Rendimento Exergético (%)
	Recurso F (kW)	Produto P (kW)	Perda L (kW)		Recurso F (kW)	Produto P (kW)	Perda L (kW)	
fornalha	6.111,70	5.881,47	-	96,23%	5.580,97	3.502,81	-	62,76%
câmara de mistura	11.179,43	10.881,65	-	97,34%	3.888,30	920,66	-	23,68%
câmara de secagem	12.431,18	12.178,36	-	97,97%	923,89	378,65	-	40,98%
câmara de resfriamento	6.766,93	4.893,39	1.773,68	72,31%	281,86	245,26	-	87,01%
microturbina	561,12	428,33	-	76,33%	487,47	164,00	-	33,64%
planta	11.549,43	8.738,50	1.773,68	75,66%	6.293,13	342,03	-	5,43%

Para melhor ilustrar a exergia destruída e entender esse fenômeno após a introdução da microturbina no sistema de referência, apresenta-se na figura 26 (sem escala) o diagrama de Grassmann.

Aplicando-se o *ANEX* para obter a análise termoeconômica da configuração, introduz-se a Matriz \mathbb{Z} , que é obtida do aplicativo de simulação (apêndice B), com valores de anualização de investimento em equipamentos acrescidos dos valores da operação e manutenção dos volumes de controle e fluxos específicos (gás natural na

fornalha e gás natural na microturbina).

FIGURA 26 – DIAGRAMA DE GRASSMANN PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA



Os valores de anualização foram obtidos considerando-se para a microturbina um tempo de amortização de 5 anos, à taxa mínima de atratividade de 18% a.a. O custo estimado pelo fabricante (www.microturbine.com) é de US\$ 1.200,00 /kW, para um custo de manutenção de US\$ 0,03 /m³_{GN}. Foram mantidas as condições do sistema de referência.

Como o objetivo da planta apresentada é a auto-suficiência em eletricidade, não se introduziu a valoração externa da venda da energia elétrica excedente. Assim, a Matriz \mathbb{Z} é fornecida por:

Fornalha	-0,000700
Câmara de mistura	-0,001593
Câmara de secagem	-0,000398
Câmara de resfriamento	-0,000398
Microturbina	-0,000282
Fluxo I (gás natural para fornalha)	0,02781
-	0
-	0
-	0
-	0
Fluxo II (gás natural para microturbina)	0,00165
-	0
-	0

Foram utilizados módulos de 30 kW, da marca Capstone, modelo CP-330, com vazão de 1.096 kg/h de gases de energia térmica. O tempo de operação da microturbinas foi de 4.000 h/ano, o mesmo tempo de operação do sistema de secagem.

Com os resultados do aplicativo, verificou-se o valor da exergia, o custo exergético (gráfico 8) e o custo termoeconômico (gráfico 9) para cada um dos fluxos. O custo termoeconômico do processo de secagem dos grãos de soja é obtido à vista do fluxo 5 (ar saturado) e é igual a US\$ 1,443 /t_{soja seca}. Nesse custo estaria incorporada a amortização do investimento na microturbina num período de cinco anos, sendo que, após o retorno dos investimentos, o custo seria o equivalente ao do sistema de referência, tendo a planta auto-suficiência em energia elétrica.

O custo termoeconômico da energia elétrica gerada pela microturbina é de US\$ 0,0011 /s, ou seja, US\$ 166,67 /MWh. Após a amortização do investimento na microturbina, ele será de US\$ 60,61 /MWh. Para se obter o custo após amortização, foi utilizado o *ANEX*, considerando-se a Matriz \mathbb{Z} e retirando-se o custo anualizado da microturbina (US\$ 0,000282 /s).

GRÁFICO 8 – EXERGIA E CUSTO EXERGÉTICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA

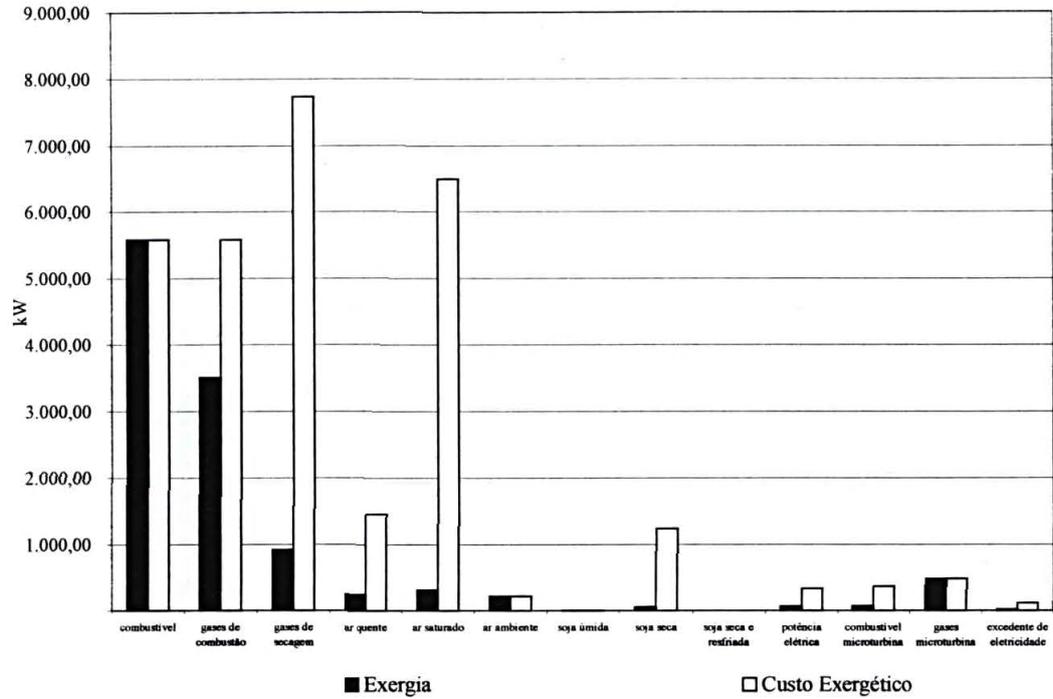
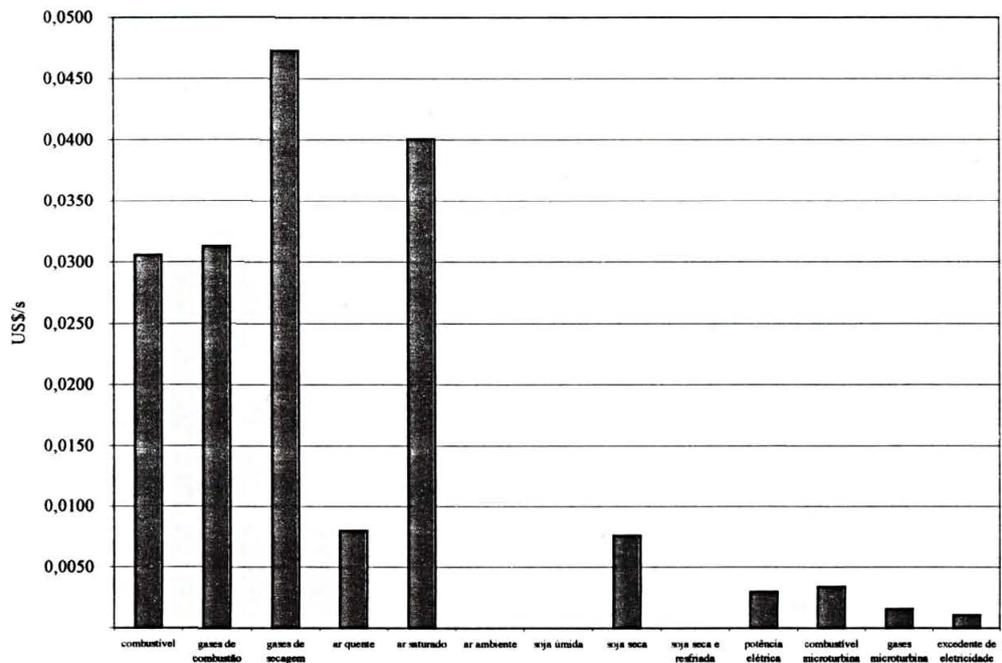


GRÁFICO 9 – CUSTO TERMoeCONômICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM CO-GERAÇÃO ATRAVÉS DE MICROTURBINA



5.2.2 Trigeração com uso indireto de efluentes com célula de combustível

A avaliação das melhores soluções para se aumentar o rendimento energético no processamento da soja quando se associar uma unidade geradora de energia elétrica será realizada neste instante considerando-se uma configuração como aquela representada na figura 27, e as demais considerações explicitadas como na aplicação da microturbina.

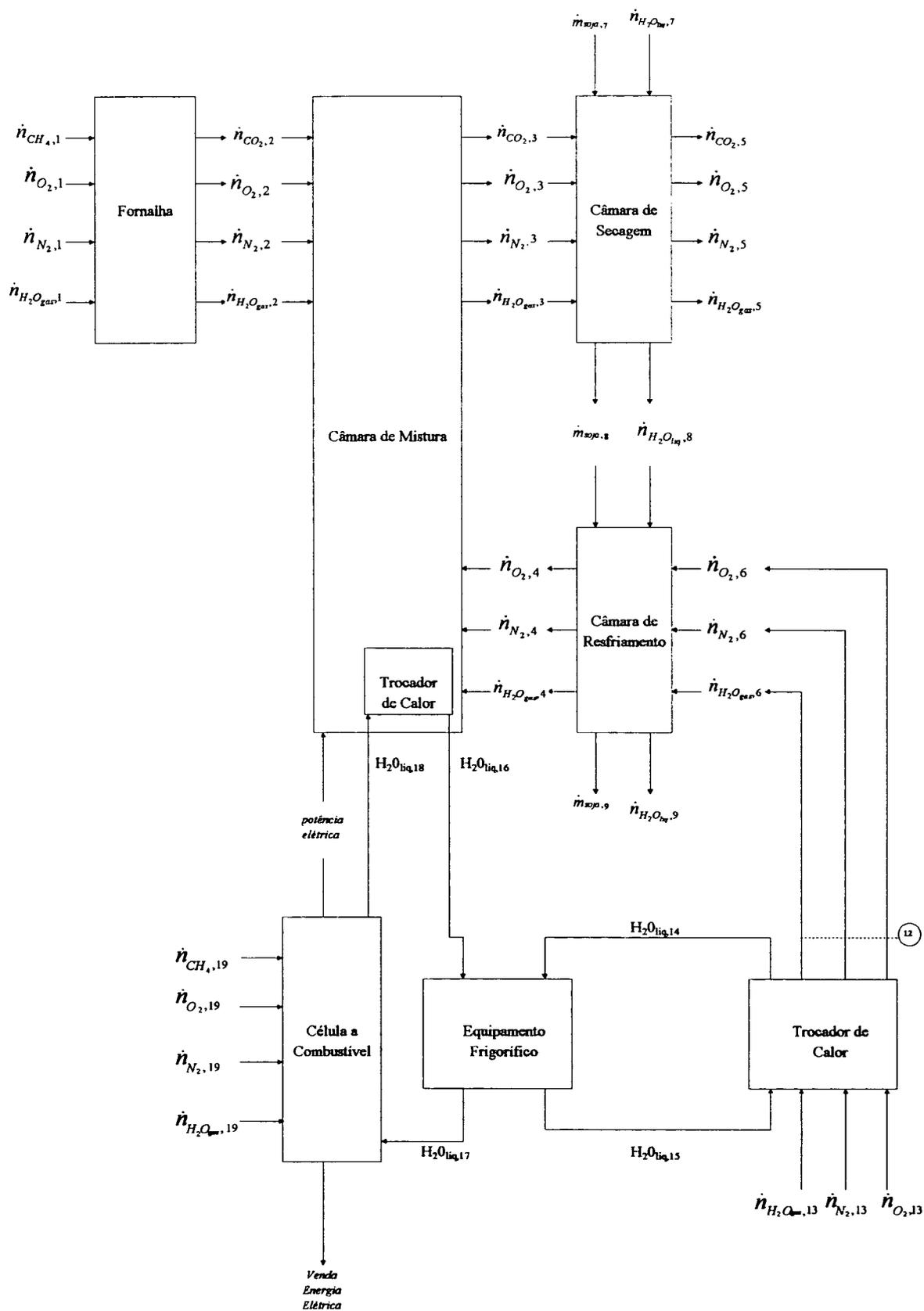
Esta configuração geral da planta de trigeração de energia térmica para secagem de grãos e energia elétrica é constituída basicamente sete volumes de controle:

- (1) fornalha,
- (2) câmara de mistura entre os gases de combustão da fornalha e o ar que sai da câmara de resfriamento,
- (3) câmara de resfriamento da soja antes de saída do secador,
- (4) câmara de secagem onde ocorre a remoção de umidade dos grãos de soja,
- (5) Célula de combustível (anexo 2),
- (6) Equipamento frigorífico (anexo 3),
- (7) Trocador de calor.

Observa-se que a planta de secagem recebe neste instante um ar com a temperatura T_6 resfriado no trocador de calor devido ao aproveitamento da energia térmica da célula de combustível e do gradiente de temperatura obtido na câmara de mistura. Assim, a energia térmica da célula de combustível é utilizada através do equipamento frigorífico para resfriar a entrada de ar na câmara de resfriamento com objetivo de obter-se os grãos de soja com a temperatura mais próxima do ambiente.

Desta maneira é possível fazermos uso dos efluentes da célula de combustível de modo indireto aumentando a eficiência energética da planta.

FIGURA 27 – CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL



Os parâmetros considerados para a saída da água do equipamento frigorífico, que foi estudado em módulos de 10TR (anexo 3), é de T_{14} igual a 14°C e T_{15} igual a $7,2^{\circ}\text{C}$. É fixada a temperatura T_{16} igual a 88°C , e garantindo que a quantidade de calor será mantida para que o equipamento frigorífico funcione na condição nominal, obtemos T_{17} . Com o valor de T_{17} , e considerando valores discretos na vazão de água que circula no resfriamento da célula de combustível, podemos obter através do gráfico do anexo 2 o valor da temperatura T_{18} (para a dissertação obten-se uma equação que forneça os valores de T_{18} , pois no primeiro momento obteve-se manualmente do catálogo). Os valores discretos da vazão são admitidos partir da vazão necessária para funcionamento nas condições nominais de cada módulo do equipamento frigorífico.

A tabela 35 representa os valores da temperatura na saída da câmara de resfriamento, dos grãos de soja, bem como a quantidade de calor retirada da câmara de mistura e a quantidade de transferência de calor ao ar ambiente que se destina a câmara de resfriamento.

TABELA 35 – VALORES DA SIMULAÇÃO COM MÓDULOS DE EQUIPAMENTOS FRIGORÍFICOS WFC-10

Equipamento frigorífico (pç)	Temperatura na saída do resfriador ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura na entrada do resfriador ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura na entrada da célula de combustível ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura na entrada do equipamento frigorífico ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura na saída da célula de combustível ($^{\circ}\text{C}$)	Quantidade de calor retirada no misturador (kJ/h)	Quantidade de calor transferida ao meio ambiente (kJ/h)	Vazão de água da célula de combustível (kg/s)
0	24,80	19,80	-	-	-	-	-	-
1	24,10	19,16	82,99	88,00	86,00	71.628,48	206.065,60	2,38
2	23,30	18,45	83,00	88,00	85,00	215.336,90	412.131,20	4,77
3	22,60	17,80	83,00	88,00	84,00	430.372,80	618.196,80	7,15
4	21,80	17,08	82,99	88,00	83,50	644.656,30	824.262,30	9,52
5	21,00	16,38	82,99	88,00	83,00	895.355,90	1.030.328,00	11,90

Fonte: apêndice B

A estrutura produtiva para configuração da figura 27 para efetuar a análise termoeconômica é dada pela figura 28 e pela tabela 36, e o estudo é feito dentro da

condição de projeto (com 75,32% de rendimento energético global na configuração de referência).

Os produtos da planta nesta configuração são o ar saturado (fluxo 5), a energia elétrica excedente produzida pela célula de combustível (fluxo 21) e o calor rejeitado (fluxo 23).

FIGURA 28 – ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA

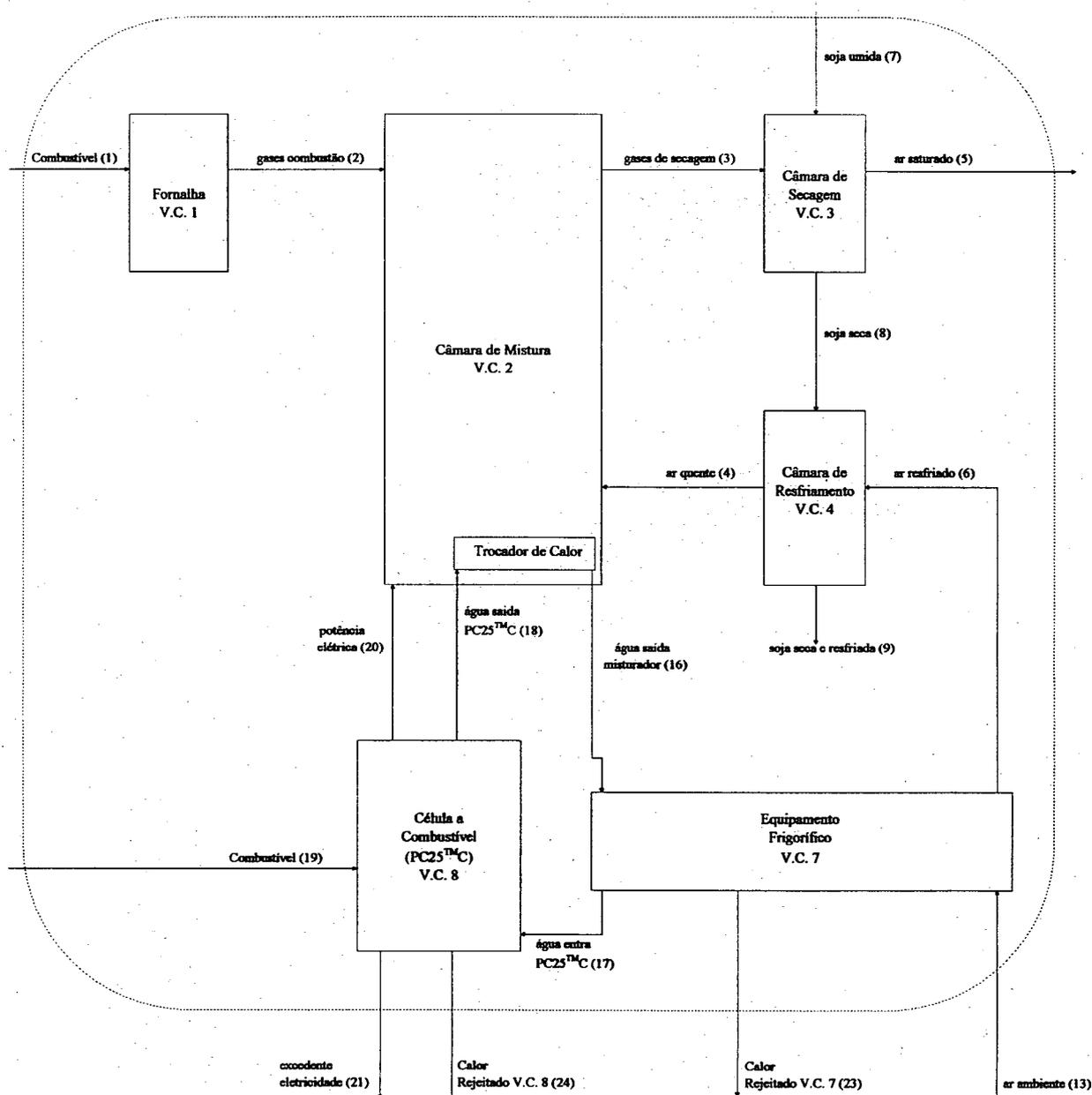


TABELA 36 - DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA PRODUTIVA DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PARA ANÁLISE TERMOECONÔMICA (AUTO-SUFICIÊNCIA EM ELETRICIDADE)

Equipamento	Equipamento	Recurso	Produto	Perdas
1	fornalha	1	2	-
2	câmara de mistura	2 + 4 + 20	3 + (16-18)	-
3	câmara de secagem	3 + 7	5 + 8	-
4	câmara de resfriamento	6 + 8	4	9
7	equipamento frigorífico	(16-17)	(6 - 13)	23
8	célula de combustível	19	(18-17) + 20 + 21	24
	planta	1 + 7 + 13 + 19	5 + 21	9 + 24 + 23

Considerou-se o equipamento frigorífico e o trocador de calor como um único volume de controle para facilitar a análise. A tabela 37 apresenta os valores obtidos para vazão mássica, fluxo de energia e fluxo de exergia. Com esses valores pode-se calcular o rendimento energético e exerético, para se comparar com o sistema de referência. Assim, na tabela 38 verifica-se que a planta teve um aumento de rendimento energético de 0,41% e que o rendimento exerético aumentou 31,80%. A exergia destruída na planta foi reduzida em 1,69%.

TABELA 37 - VAZÃO MASSICA, FLUXO DE ENERGIA E EXERGIA DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Fluxos	Temperatura (°C)	Fluxo de massa (kg/s)	Fluxo de energia (kJ/s)	Fluxo de exergia (kJ/s)
1 combustível fornalha	20,00	2,94	6.576,78	6.005,66
2 gases de combustão	1.503,43	2,94	6.329,03	3.769,36
3 gases de secagem	100,00	81,68	10.851,33	918,28
4 ar quente	39,35	78,74	4.926,48	246,92
5 ar saturado	31,60	83,07	8.717,11	317,26
6 ar resfriado	16,35	78,74	3.156,60	227,14
7 soja úmida	20,00	29,17	1.549,53	3,22
8 soja seca	48,00	27,78	3.439,86	60,39
9 soja seca e resfriada	20,95	27,78	1.569,43	1,15
20 potência elétrica	-	-	66,24	66,24
13 ar ambiente	20,00	78,25	3.369,71	222,63
16 água saída misturador	88,00	9,52	3.506,30	250,27
17 água entra PC25 TM C	81,74	9,52	3.306,64	212,05
18 água saída PC25 TM C	83,50	9,52	3.327,00	215,80
19 combustível PC25 TM C	20,00	2,83	712,71	557,63
21 excedente eletricidade	-	-	133,76	133,76
23 calor rejeitado V.C. 7	25,00	-	382,60	-
24 calor rejeitado V.C.8	50,00	-	271,27	-

Fonte: apêndice B

TABELA 38 – RENDIMENTO ENERGÉTICO E EXERGÉTICO DA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Equipamento	Energia			Rendimento Energético (%)	Exergia			Rendimento Exergético (%)
	Recurso F (kW)	Produto P (kW)	Perda L (kW)		Recurso F (kW)	Produto P (kW)	Perda L (kW)	
fornalha	6.576,78	6.329,03	-	96,23%	6.005,66	3.769,36	-	62,76%
câmara de mistura	11.321,75	11.030,63	-	97,43%	4.552,84	952,75	-	20,93%
câmara de secagem	12.400,86	12.156,97	-	98,03%	921,50	377,65	-	40,98%
câmara de resfriamento	6.596,46	4.926,48	1.569,43	74,68%	287,52	246,92	1,15	85,88%
equipamento frigorífico	199,66	169,50	-	84,89%	38,23	4,51	-	11,79%
célula de combustível	712,71	220,36	271,27	30,92%	557,63	203,75	-	36,54%
planta	12.208,72	9.233,47	1.840,70	75,63%	6.789,15	451,02	1,15	6,64%

Na aplicação da célula de combustível um dos principais efeitos desejados é a redução da temperatura da soja seca na saída da câmara de resfriamento (fluxo 9). Quanto mais próxima a temperatura da soja estiver da temperatura ambiente, melhores são as condições de armazenagem do produto e maior será a flexibilidade para comercialização, obtendo-se então condições de maximizar a lucratividade na comercialização da soja.

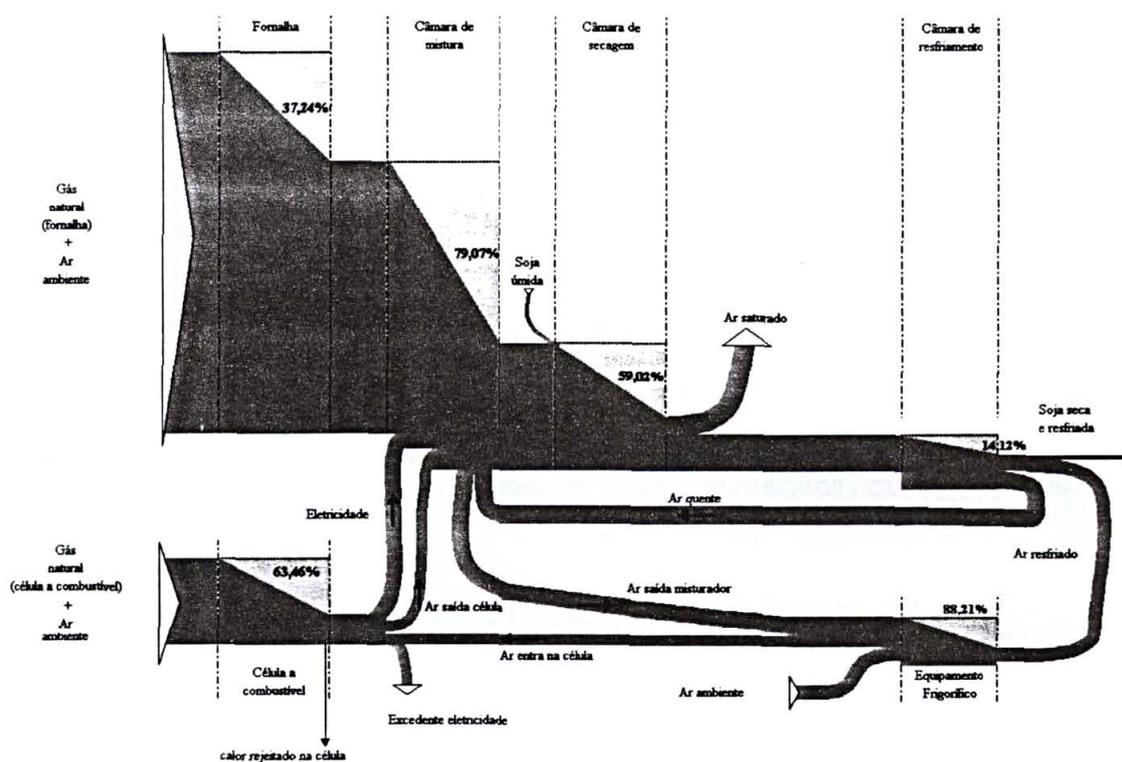
Para melhor ilustrar a exergia destruída e entender esse fenômeno após a introdução da célula de combustível no sistema de referência, apresenta-se na figura 29 o Diagrama de Grassmann.

Aplicando-se o *ANEX* para obter a análise termoeconômica da configuração, introduz-se a Matriz \mathbb{Z} , que é obtida do aplicativo de simulação (apêndice B), com valores de anualização de investimento em equipamentos acrescidos dos valores da operação e manutenção dos volumes de controle e fluxos específicos (gás natural na fornalha e gás natural na microturbina).

Como o objetivo da planta apresentada é a auto-suficiência em eletricidade, não se introduziu a valoração externa da venda da energia elétrica excedente. Assim, a Matriz \mathbb{Z} é fornecida por:

Fornalha	-0,000720
Câmara de mistura	-0,001593
Câmara de secagem	-0,000398
Câmara de resfriamento	-0,000398
Equipamento frigorífico	-0,000227
Célula de combustível	-0,022660
Fluxo 1 (gás natural para fornalha)	0,032760
-	0
-	0
-	0
-	0
-	0
-	0
-	0
Fluxo 19 (gás natural para célula)	0,001720
-	0
-	0
-	0
-	0

FIGURA 29 – DIAGRAMA DE GRASSMANN PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL



Os valores de anualização foram obtidos considerando para a célula de combustível um tempo de amortização de 5 anos a taxa de atratividade de 18%a.a.. O custo estimado do fabricante (www.onsicorp.com) é de US\$ 1.000.000,00, para um custo de manutenção de US\$ 0,03 /m³_{GN}. São mantidas as mesmas condições do sistema de referência.

A geração de energia elétrica é de 200 kW e o tempo de operação da célula de combustível é de 4.000 h/ano, o mesmo tempo de operação do sistema de secagem. O limite no número de equipamentos frigoríficos é de 5 unidades, pois com esta quantidade o calor fornecido pela célula de combustível chega em seu valor máximo. Simulou-se no sistema a utilização de quatro unidades de equipamentos frigoríficos.

Com os resultados do aplicativo, verificou-se o valor da exergia, o custo exergético (gráfico 10) e o custo termoeconômico (gráfico 11) para cada um dos fluxos. O custo termoeconômico do processo de secagem dos grãos de soja é obtido à vista do fluxo 5 (ar saturado) e é igual a US\$ 1,663 /t_{soja seca}. Nesse custo estaria incorporada a amortização do investimento na célula de combustível, a sua operação e manutenção, num período de cinco anos.

O custo termoeconômico da energia elétrica gerada pela célula de combustível é de US\$ 0,0162 /s, ou seja, US\$ 436,00 /MWh. Após a amortização do investimento na célula de combustível, ele será de US\$ 103,88 /MWh. Para se obter o custo após amortização, foi utilizado o *ANEX*, considera-se a Matriz \mathbb{Z} e retira-se o custo anualizado da célula de combustível (US\$ 0,022660 /s).

GRÁFICO 10 – EXERGIA E CUSTO EXERGÉTICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

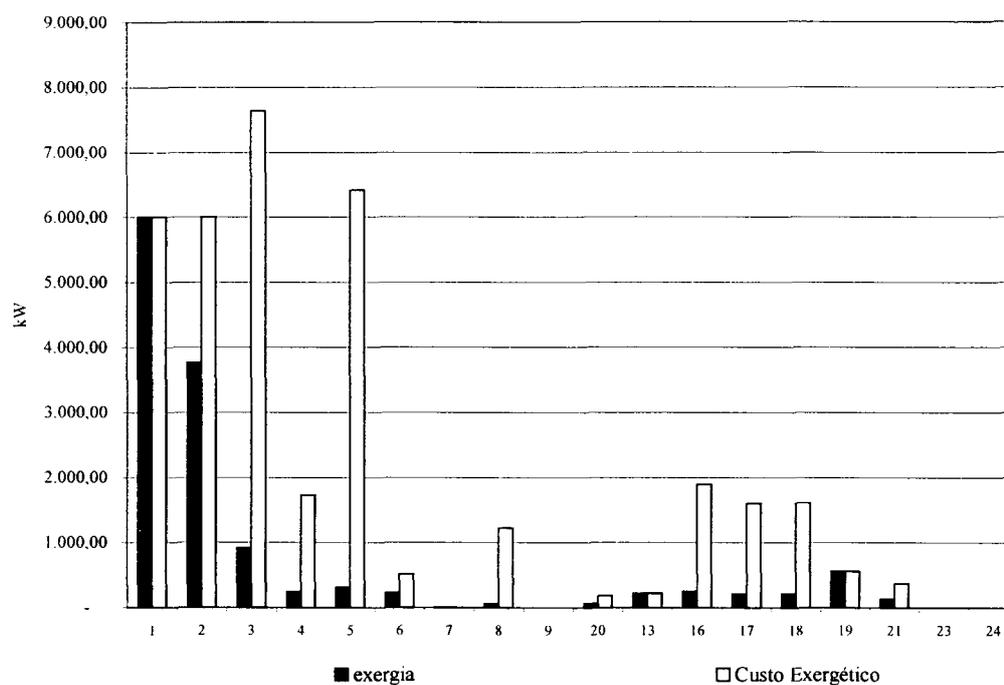
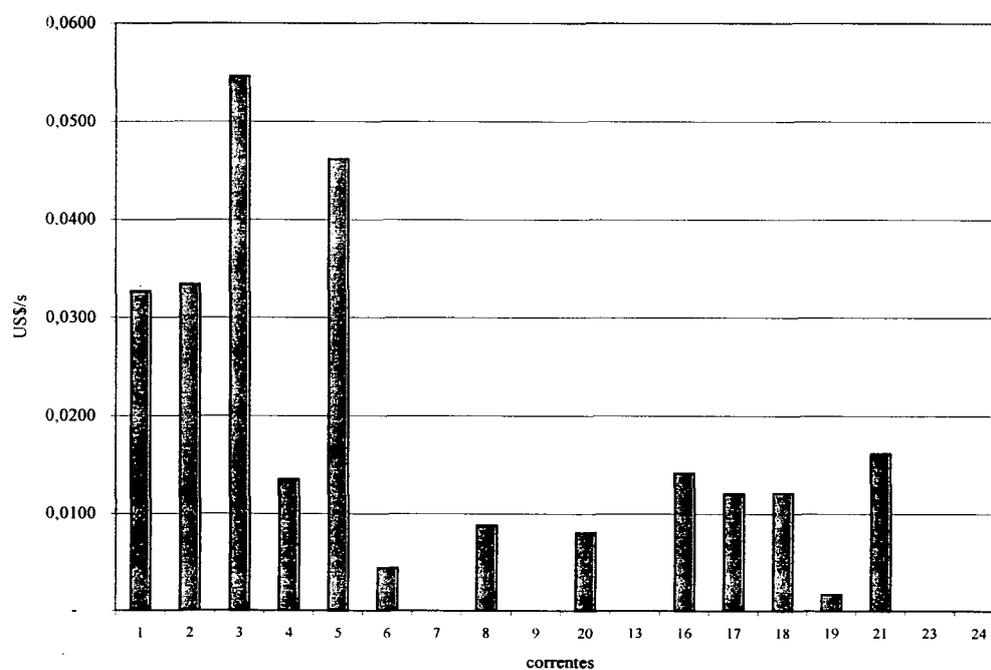


GRÁFICO 11 – CUSTO TERMOECONÔMICO PARA CONFIGURAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM COM TRIGERAÇÃO ATRAVÉS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL



CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Considerações finais

Com base na Teoria do Custo Exergético, esta dissertação propõe a ferramenta computacional (*ANEX*) para otimização de sistemas energéticos complexos, visando um novo tipo de planejamento energético e incorporando na matriz energética as necessidades de energia elétrica e de energia térmica (calor e/ou frio) ao mesmo tempo.

Junto à ferramenta computacional é descrita uma metodologia completa de planejamento energético e de análise termoeconômica de plantas industriais (planilha de levantamentos de dados, modelagem da estrutura física para conversão em estrutura produtiva, definição da valoração econômica).

No trabalho são apresentados resultados da avaliação da viabilidade técnica e econômica de co-geração ou trigeração com células a combustíveis comercialmente disponíveis, obtidos com o *ANEX* através da nova metodologia proposta para análise de sistemas energéticos complexos.

Uma análise exergética e termoeconômica completa de um sistema agro-industrial com co-geração ou trigeração com células a combustíveis, é também apresentada junto com a avaliação do impacto de novas tecnologias no aumento do rendimento energético/exergético e econômico de sistemas que usam simultaneamente mais de uma forma de energia.

As soluções apresentadas indicam ao consumidor final as melhores opções econômicas e técnicas para a compra e o uso de várias formas de energia e fornecem para as companhias de energia as melhores soluções de geração e venda.

Este trabalho tenta demonstrar que a abordagem termoeconômica realizada conforme a metodologia proposta, permite um maior detalhamento dos custos de cada produto (energia elétrica, energia térmica – vapor ou ar frio, soja com baixo teor de umidade), visando quantificar efeitos como aumento da eficiência e redução do investimento, nas quatro estratégias de geração e comercialização de várias formas de energia:

- (1) auto-suficiência térmica (calor e/ou frio) ou elétrica,

- (2) co-geração para auto-suficiência térmica e geração parcial de energia elétrica,
- (3) co-geração ou trigeração para auto-suficiência térmica e elétrica e
- (4) co-geração ou trigeração para auto-suficiência térmica e excedente de energia elétrica

Levando em consideração tanto a valoração externa como os possíveis impactos ambientais, os resultados obtidos pelo uso do ANEX permitem equacionar diferentes pontos de operação de varias configurações de sistemas complexos, viabilizando assim a análise racional da rentabilidade dos investimentos.

6.2 Questões em aberto

A metodologia para análise de sistemas complexos proposta neste trabalho é uma ferramenta para uma possível estratégia de planejamento energético para otimização funcional da matriz energética nacional quando aplicada conforme seqüência:

- análise, otimização e planejamento em nível micro (como plantas industriais individuais);
- análise, otimização e planejamento em nível local (matriz energética local);
- análise, otimização e planejamento em nível regional (matriz energética regional);
- análise, otimização e planejamento em nível nacional (matriz energética nacional).

Como o objetivo de otimização da matriz energética nacional é uma tarefa além dos objetivos deste trabalho o autor da dissertação se propõe a continuar o estudo sobre esta questão em futuros trabalhos científicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JANNUZZI, G. M.; SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. Campinas: Autores Associados, 1997.
- [2] CAÍRES, M.I. **Desenvolvimento e caracterização de matrizes à base de SiC, NbC, e ZrSiO₄ para células de combustível de ácido fosfórico**. São Paulo, 1996. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos.
- [3] MACHADO, A. C. **Pensando a energia**. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 1997.
- [4] BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- [5] BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. J. **Thermal design and optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [6] KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. London: Anchor Brendon Ltd., Tiptree, Essex, 1985. ISBN 0-408-01350-8.
- [7] **CURSO TECNOLÓGICO DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA**. Itajubá, 2000. Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- [8] CLEMENTE, A.; JUCHEM, P. A. **Valoração econômica do meio ambiente**. 2. ed. Curitiba: SEMA-PR/IAP/GTZ, 1993.
- [9] REIS, M. M. **Custos ambientais associados a geração elétrica: hidrelétricas x termelétricas a gás natural**. Rio de Janeiro, 2001. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE/UFRJ.

- [10] KOROBITSYN, M. A. **New and advanced energy conversion technologies. Analysis of cogeneration, combined and integrated cycles.** Amsterdam, 1998. Dissertação (Doctor Thesis) – University of Twente, Laboratory of Thermal Engineering.
- [11] FARRET, F. A. **Aproveitamentos de pequenas fontes de energia elétrica.** Santa Maria: Editora da UFSM, 1999.
- [12] DAVY, H. **Annales physics.** v. 8, n. 31, p. 1801.
- [13] LINDEN, D. **Handbook of batteries and fuel cells.** New York: Mc-Graw Hill, 1984.
- [14] SIEGL, K. **Elektrotek. Z.** 34, 1317 (1913).
- [15] VIELSTICH, W. **Fuel cells.** London: John Wiley & Sons Ltd. , 1970.
- [16] BOCKRIS, John. O. M. **Surface electrochemistry: a molecular level approach.** New York: Plenum Press, 1993.
- [17] BOCKRIS, John. O. M., AMULYA, K. N. **Eletroquímica moderna.** v. 2. Espanha: Reverté, 1980.
- [18] WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. **Tecnologia de células de combustível.** Química Nova, 23(4), 538-546, 2000.
- [19] HIRSCHENHOFER, J. H.; STAUFFER, D. B.; ENGLEMAN, R. R.; KLETT, M. G. **Fuel cell handbook.** Fourth Edition. Morgantown: Parsons Corporation Reading, PA 19607 Under Contract No. DE-AC21-94MC31166 for U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, Federal Energy Technology Center, P.O. Box 880, 3610 Collins Ferry Road, Morgantown, WV 26507-0880, November, 1998.
- [20] BRÉELLE, Y.; BLOCH, O.; DEGOBERT, P.; PRIGENT, M. **Principes, technologie, applications des piles à combustible.** Paris: Éditions Technip, 1972.
- [21] LIDORENKO, N. S.; MUCHNIK, G. F. **Fuel cell powerplant engineering.**

Moscow: Mir Publishers, 1988. ISBN 5-03-000017-8.

[22] VALERO, A.; LOZANO, M. A. **Curso de termoeconomia**. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 1994.

[23] CERQUEIRA, S. A. A. da G. **Metodologias de análise termoeconômica de sistemas**. Campinas, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia.

[24] VALERO, A.; LOZANO, M. A.; TSATSARONIS, G.; FRANGOPOULOS, C.; SERRA, L.; PISA, J.; von SPAKOVSKY, M. R. **Energy**. 19(3):279-86, 1994.

[25] FRANGOPOULOS, C. **Energy**. 19(3):322-42, 1994.

[26] VALERO, A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L.; TORRES, C. **Energy**. 19(3):365-81, 1994.

[27] VALERO, A.; LOZANO, M. A.; **Theory of the exergetic cost**. 18(9):939-60, 1994.

[28] LOZANO, M. A.; VALERO, A. **Energy**. 18(9):939-60, 1993.

[29] TSATSARONIS, G. **Progress in energy and combustion science**. 19(3):227-57, 1993.

[30] **INSTALLATION MANUAL – 200 kW ON-SITE FUEL CELL POWER PLANT PC25™ MODEL C**. Connecticut: ONSI Corporation, 1997.

[31] BROWN, H. L.; HAMEL, B. B.; HEDMAN, B. A. **Energy analysis of 108 industrial processes**. Lilburn: The Fairmont Press, Inc., 1996.

[32] ERRERA, M. R.; STANESCU, G.; FILIPINI, F. A. Relatório parcial sobre levantamento da situação atual da tecnologia de processamento de soja, contendo a avaliação do potencial de integração de Co-geração a gás natural nas plantas de processamento de grãos de soja. Curitiba: Projeto FINEP/CETPETRO#0660/01 – RedeGásEnergia #030, Universidade Federal do Paraná, 2002.

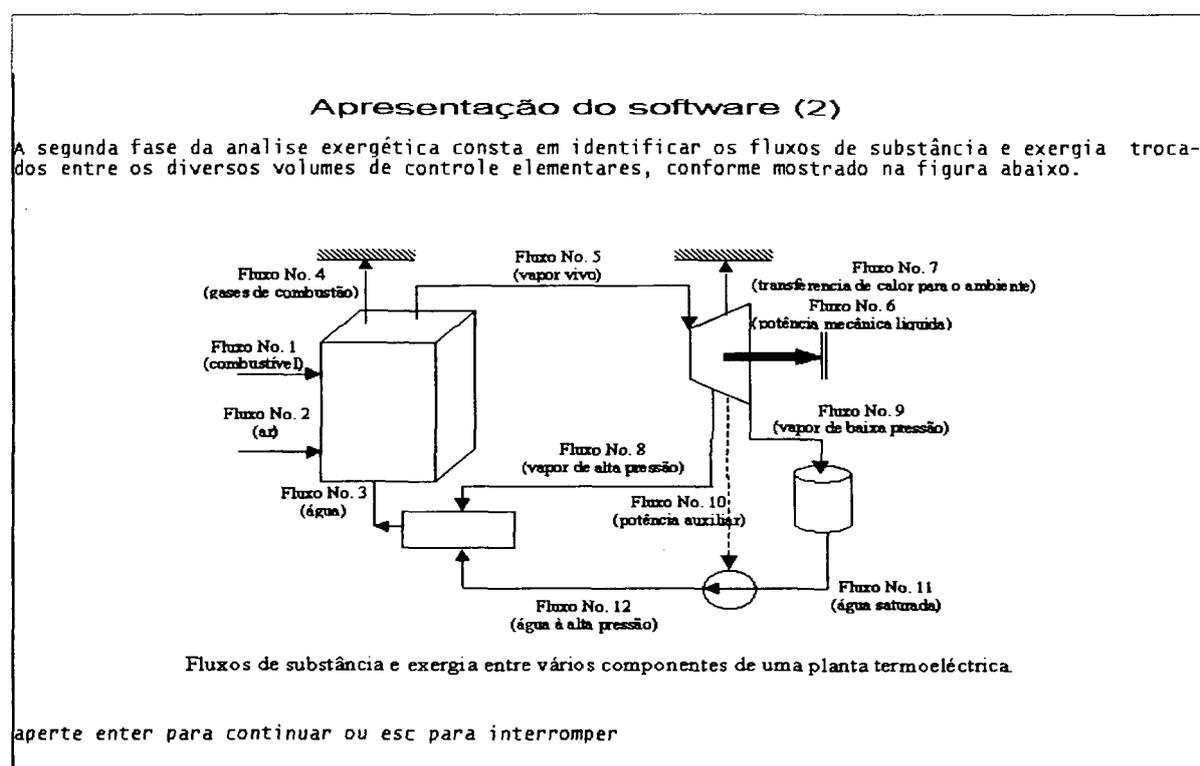
**APÊNDICE A – ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA DE
EQUIPAMENTOS E PROCESSOS INDUSTRIAIS – ANEX**

A. Análise Exergética e Termoeconômica de Equipamentos e Processos Industriais – ANEX

O *software ANEX* é a implementação computacional de uma metodologia-padrão aceita internacionalmente na área de termoeconomia, na forma de um aplicativo computacional, para possibilitar as análises dos equipamentos e processos para o cálculo de eficiência energética e exergética de plantas industriais.

O *ANEX* é a primeira versão do aplicativo (versão “beta”, figura A.1) e consiste numa ferramenta de apoio ao processo decisório e, portanto, garante apenas os resultados oferecidos. Ele foi desenvolvido para usuários que tenham conhecimentos de termodinâmica, principalmente da propriedade “exergia”, e que ainda não se aprofundaram em termoeconomia. Através do aplicativo, o usuário fornece informações básicas da estrutura produtiva de plantas industriais (fluxograma) e tem de retorno um modelo termoeconômico e os principais indicadores para análises e diagnósticos.

FIGURA A.1 – TELA DE ENTRADA DE DADOS DO ANEX

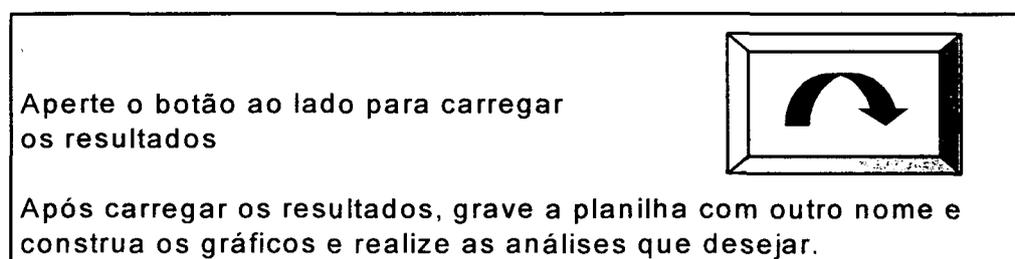


O aplicativo é estruturado numa interface gráfica interativa com o usuário, o que permite criar modelos novos, carregar e modificar modelos já implementados e rever modelos demonstrativos.

Após implementar os modelos, o *ANEX* apresenta os indicadores termoeconômicos na tela e também num arquivo “default” denominado “output.txt” (tabela A.1).

Esse arquivo armazena todos os resultados do modelo e os indicadores do processamento. Ele é facilmente importado através de um comando “macro” na planilha “anex.xls” para MS Excel (figura A.2).

FIGURA A.2 – PLANILHA DO MICROSOFT EXCEL PARA IMPORTAR RESULTADOS DO ARQUIVO “OUTPUT.TXT”



Após a conversão dos resultados para o ambiente de planilhas eletrônicas, o usuário pode desenvolver e comparar alternativas e cenários, e preparar gráficos como os das figura A.3 e A.4.

Parâmetros econômicos, como custos instalados, matéria-prima, energéticos (gás, eletricidade, etc.) e insumos podem ser introduzidos na análise. O *ANEX* fornecerá custos econômicos unitários e absolutos para cada corrente da estrutura produtiva e estabelecerá novos parâmetros para o processo decisório.

TABELA A.1 – EXEMPLO DO ARQUIVO DE SAÍDA DO ANEX (“OUTPUT.TXT”)FIGURA A.3

<p>Arquivo de saída de dados do programa ANEX v.1.0</p> <p>Sistema com : 3, volumes de controle.,</p> <p>Sistema com : 10, correntes ou fluxos.,</p> <p>matriz de incidência A</p> <p>1: 1, -1, 1, 0, 0, 1, -1, 0, 0,</p> <p>0, 0, 1, -1, -1, 0, 0, 0, -1, 0,</p> <p>0, 0, 0, 0, 1, -1, -1, 0, 0, -1,</p> <p>Fluxo Máximo (M), Energia (E), Exergia(E)</p> <p>000,110.000;110.000;</p> <p>000, 000, 000;</p> <p>000,120.000; 60.000;</p> <p>000, 30.000; 6.000;</p> <p>000, 33.000; 33.000;</p> <p>000, 30.000; 30.000;</p> <p>000, 1.500; 1.500;</p> <p>000, 21.500; 5.500;</p> <p>000, 57.000; 000;</p> <p>000, 1.500; 000;</p> <p>Matriz A aumentada, AA</p> <p>1.00; -1.00; 1.00; 00; 00; 1.00; -1.00; 00; 00;</p> <p>00; 00; 1.00; -1.00; -1.00; 00; 00; 00; -1.00; 00;</p> <p>00; 00; 00; 00; 1.00; -1.00; -1.00; 00; 00; -1.00;</p> <p>00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 1.00; 00; 00;</p> <p>00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 1.00; 00;</p> <p>00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 1.00;</p> <p>1.00; 00; 00; 00; 00; 00; -1.05; -1.05; 1.05; 1.05; 00; 1.00;</p> <p>00; 1.00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 00;</p> <p>00; 00; -1.0; 1.00; 00; 00; 00; 00; 00; 00;</p> <p>00; 00; 00; 00; 00; -0.5; 1.00; 00; 00; 00;</p> <p>Balanco de massa nos VCs</p> <p>00; 00; 00;</p> <p>Balanco de energia nos VCs</p> <p>00; 00; 00;</p> <p>Balanco de exergia nos VCs</p> <p>52.00; 21.00; 1.50;</p> <p>A=AF-AP-AL (ok)</p> <p>(1)</p>	<p>vetor F:</p> <p>111.50, 54.00, 33.00;</p> <p>vetor P:</p> <p>54.00, 33.00; 31.50;</p> <p>vetor L:</p> <p>5.50, 00, 00;</p> <p>vetor k por VC:</p> <p>2.065; 1.636, 1.048;</p> <p>vetor eta por VC:</p> <p>.484; .611, .955;</p> <p>vetor delta por VC:</p> <p>.523; .191; .014;</p> <p>eficiência da planta ==>: 2.727273E-01</p> <p>custo unitário do produto ==>: 3.666667</p> <p>índice de perda da planta ==>: 7.272727E-01</p> <p>inv(AA)</p> <p>00; 00; 00; 00; 00; 00; 1.00; 00; 00; 00;</p> <p>.00; 00; 00; 00; 00; 00; 00; 1.00; 00; 00;</p> <p>-1.17; -.06; -.06; -1.17; -.06; -.06; 1.17; 1.17; 1.11; 1.11;</p> <p>-.12; -.01; -.01; -.12; -.01; -.01; .12; .12; 1.11; .11;</p> <p>-1.05; -1.05; -.05; -1.05; -1.05; -.05; 1.05; 1.05; 00; 1.00;</p> <p>-1.00; -1.00; -1.00; -1.00; -1.00; -1.00; 1.00; 1.00; 00; 00;</p> <p>-.05; -.05; -.05; -.05; -.05; -.05; .05; .05; 00; 1.00;</p> <p>.00; 00; 00; 1.00; 00; 00; 00; 00; 00; 00;</p> <p>.00; 00; 00; 00; 1.00; 00; 00; 00; 00; 00;</p> <p>.00; 00; 00; 00; 00; 1.00; 00; 00; 00; 00;</p> <p>vetor Y</p> <p>00; 00; 00; 00; 00; 00; 110.00; 00; 00; 00;</p> <p>Aaum inversa esta correta.</p> <p>B* = AAinv x Y</p> <p>110.00; 00, 128.33, 12.83; 115.50; 110.00; 5.50; 00; 00; 00;</p> <p>(2)</p>	<p>K* =</p> <p>1.00; 00; 2.14; 2.14; 3.50; 3.67; 3.67; 00; 00; 00;</p> <p>J* =</p> <p>115.50; 115.50; 115.50;</p> <p>KF* =</p> <p>1.04; 2.14; 3.50;</p> <p>J* =</p> <p>115.50; 115.50; 115.50;</p> <p>KI* =</p> <p>2.14; 3.50; 3.67;</p> <p>vetor Z</p> <p>-.519E-01; -.318E-02; -.133E-02; .000E+00; .000E+00; .000E+00;</p> <p>880E-02; .000E+00; .000E-00; .000E+00;</p> <p>vetor PI</p> <p>880E-02; .000E+00; 711E-01; 711E-02; 672E-01; 652E-01;</p> <p>326E-02; .000E+00; .000E+00; .000E+00;</p> <p>c (\$/MWe) =</p> <p>800E-04; .000E+00; .118E-02; .118E-02; 204E-02; 217E-02;</p> <p>217E-02; .000E+00; .000E-00; .000E+00;</p> <p>estar (\$/MWe) =</p> <p>800E-04; .000E+00; .554E-03; .554E-03; .582E-03; .593E-03;</p> <p>593E-03; .000E+00; .000E-00; .000E+00;</p> <p>PI F = [\$s] =</p> <p>121E-01; 640E-01; 672E-01;</p> <p>cf = [\$/MWfuel]</p> <p>108E-03; .118E-02; 204E-02;</p> <p>PI P = [\$s]</p> <p>640E-01; 672E-01; 685E-01;</p> <p>cp = [\$/MWproduto]</p> <p>118E-02; 204E-02; 217E-02;</p> <p>(3)</p>
--	--	--

FIGURA A.3 – EXEMPLO COMPARATIVO DOS CUSTOS EXERGÉTICOS PARA A FORMAÇÃO DAS CORRENTES NOS NÍVEIS DE EXERGIA OBSERVADOS NUMA TERMELÉTRICA ATRAVÉS DO ANEX

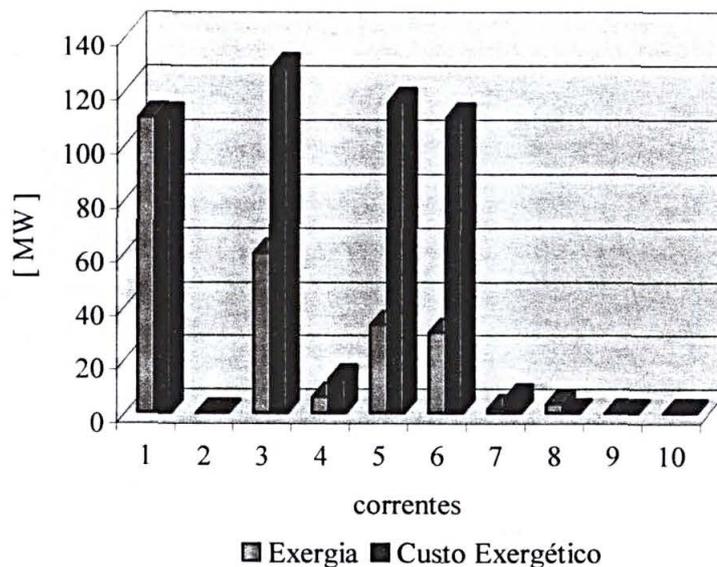
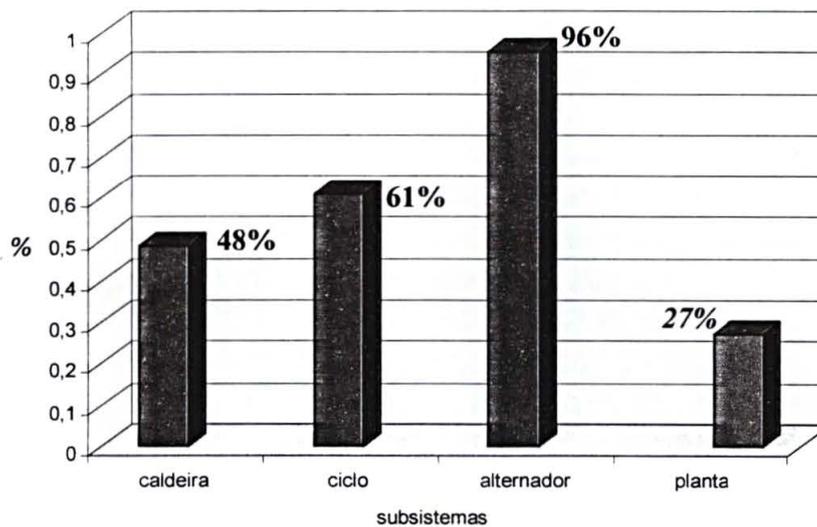


FIGURA A.4 – EXEMPLO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA RACIONAL DE UMA TERMELÉTRICA DIVIDIDA NUMA SÉRIE DE TRÊS SUBSISTEMAS (CALDEIRA, CICLO E ALTERNADOR)



APÊNDICE B – PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM

```

! *****
!
! PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DA PLANTA DE SECAGEM DE GRÃOS SOJA
!
!
! SIMULA:      (1) SISTEMA DE REFERÊNCIA
!              Reproduz o fenômeno físico da secagem de grãos de soja, e permite
!              simular condições de operação.
!
!              (2) COGERACAO ATRAVES MICROTURBINA
!              Simula a planta com a implantação de microturbina a gás natural
!              cogerao de eletricidade e energia térmica (gases para câmara de
!              mistura).
!
!              (3) TRIGERACAO COM APLICACAO DE CELULA A COMBUSTIVEL PC25
!              Simula a planta com a implantação de célula a combustível PC25
!              com trigeracão: eletricidade, calor e frio.
!
!              (4) SISTEMA HÍBRIDO COM MICROTURBINAS E CELULA A COMBUSTIVEL PC25
!              Simula a planta com a implantação simultânea de microturbinas
!              e célula a combustível PC25.
!
! OBJETIVO:   (A) REPRODUZIR PLANTA DE SECAGEM.
!
!              (B) SIMULAR IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE OTIMIZAÇÃO DA PLANTA
!
!              (C) GERAR DADOS DE VAZAO MASSICA, ENERGIA, EXERGIA e CUSTOS ANUALIZADOS
!              (EQUIPAMENTOS, OPERAÇÃO & MANUTENÇÃO, VENDA DE ENERGIA ELÉTRICA
!              PARA VALORAÇÃO EXTERNA) PARA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE ANEX (ANALISE
!              TERMoeconomica).
!
! *****
!
! ***** SIMBOLOGIA/UNIDADES *****
!
! lf          =          = Excesso de ar na fornalha
! lt          =          = Excesso de ar na microturbina
! eps        =          = Perda na fornalha
! etar       =          = Eficiência resfriador
! etam       =          = Eficiência misturador
! etas       =          = Eficiência secador
! m_X        = [kg/h]   = Fluxo de massa
! n_X        = [kmol/h] = Fluxo do número de moles
! cps        = [kJ/kg.K] = Calor específico da soja
! V          = [m3/h]   = Vazão Total de Ar na Exaustão (m3/h)
! p_X        = [kPa]   = Pressão parcial
! Y_X        =          = Fração molar (kmol/kmol)
! mdot(n)   = [kg/s]   = Fluxo de massa
! Edot(n)   = [kJ/s]   = Fluxo de energia
! Exdot(n)  = [kJ/s]   = Fluxo de exergia
! T(n)      = [°C]     = Temperatura
! fi(n)     =          = Umidade Relativa
! m_gas     = [kg/h]   = Vazão de gases quentes da turbina
! NrMicro   =          = Numero de turbinas
! coef_X    =          = Coeficiente da equação de combustão
! Conc_X    = [kmol/h] = Concentração
! *****
!
program SISE

parameter (n=19)

!      PARAMETROS DE SECAGEM

real, parameter :: lf=1.4          !Excesso de Ar fornalha
real, parameter :: T_0=20.0       !°C Ambiente
real, parameter :: T_3=100.       !°C gases saída V2
real, parameter :: T_8=48.        !°C da soja na saída
real, parameter :: c_7=0.18       !Umidade Relativa Soja Entra
real, parameter :: c_9=0.13       !Umidade Relativa Soja Sai
real, parameter :: We=66.24       !Pot Elétrica Exaustor
real, parameter :: m_soja_9=100000. !Capacidade Soja Seca [t/h]

```

```

! ***** SIMULA A CONDIÇÃO IDEAL *****
!
real, parameter :: fil=0.6,fi6=0.6,eps=0.0,etar=1.0,cps=2.34,etam=1.0,etas=1.0
real, parameter :: T_4=41.34967

! ***** SIMULA A CONDIÇÃO DE PROJETO *****
!
real, parameter :: fil=0.6,fi6=0.6,eps=0.05,etar=0.98,cps=2.34,etam=0.98,etas=0.98
real, parameter :: T_4=39.3497

! ***** SIMULA A CONDIÇÃO ESCOLHIDA DE OPERAÇÃO *****
!
real, parameter :: fil=0.6,fi6=0.6,eps=0.1,etar=0.9,cps=2.34,etam=0.9,etas=0.9
real, parameter :: T_4=31.54982

!   PARAMETROS PARA ANUALIZAÇÃO DE CUSTOS

real, parameter :: HoraAnual=4000.                !Funcionamento da Planta
real, parameter :: Cotacao=3.                    !Cotação Dólar Utilizada
real, parameter :: TaxaAmort=0.18                !Taxa Mínima Atratividade
real, parameter :: TempoAmort=5.                !Vida Contábil
real, parameter :: POeMs=0.005, POeMq=0.002     !Custo O & M [US$/m3 GN]
real, parameter :: Isec=69166.8                 !Investimento Secador
real, parameter :: Ique=16666.4                 !Investimento Queimador

!   PREÇO DE ENERGÉTICO DA PLANTA

real, parameter :: PGN=0.18589                  !Preço GN [US$/m3]
real, parameter :: PGNcoger=0.11492619         !Preço GN para Cogeração

real, parameter :: PEVenda=30.                  !Preço Venda EE [US$/MWh]
real, parameter :: PEE=53.40667                !Preço EE [US$/MWh]

!   PARAMETROS DA MICROTURBINA

real, parameter :: n_turbinas=1.                !nº módulos de 30 kW

real, parameter :: m_gas_turbina=1096.          !Consumo GN
real, parameter :: T_10=272.                    !°C gases saída
real, parameter :: Imicro=36000.               !Investimento [US$]
real, parameter :: HoraAnualMicro=4000.        !Horas Operação
real, parameter :: TaxaAmortMicro=0.18         !Taxa Mínima Atratividade
real, parameter :: TempoAmortMicro=5.         !Vida Contábil
real, parameter :: POeMmicro=0.03              !O & M [US$/m3 GN]
real, parameter :: PotGerMicro=30.             !Eletricidade Gerada

!   PARAMETROS DE CELULA A COMBUSTIVEL (FC) E EQUIPAMENTO FRIGORIFICO (WFC)

!Célula a Combustível PC25

real, parameter :: n_fc=1.                      !nº de FC

real, parameter :: T_18=83.5                    !°C água entra FC
real, parameter :: T_16=88.                    !°C água saída FC
real, parameter :: mGN_fc=53.8                 !Consumo GN da FC [m3/h]
real, parameter :: Ifc=1000000.                !Investimento FC [US$]
real, parameter :: HoraAnualFc=4000.          !Operação FC
real, parameter :: TaxaAmortFc=0.18           !Taxa Mínima Atratividade
real, parameter :: TempoAmortFc=5.           !Vida Contábil
real, parameter :: POeMfc=0.03                !O & M da FC [US$/m3 GN]
real, parameter :: PotGerFc=200.              !kW gerado pela FC

!Equipamento Frigorifico WFC e Bombas

real, parameter :: NrWFC=1.                    !nº de WFC
real, parameter :: m_H2OLfc=9.52               !Vazão EF [kg/s]
!valores admissíveis pela WFC 2.38 , 4.77 , 7.15 , 9.52 , 11.9
!Quantidade de Unidades      1. , 2. , 3 , 4 , 5

real, parameter :: T_14=14.                    !°C Entrando no WFC e Saída Trocador de Calor
real, parameter :: T_15=7.2                    !°C Saída da WFC e Entra Trocador de Calor
real, parameter :: etaWFC=0.95                 !rendimento da WFC

```

```

real, parameter :: Cw=4.18                !Vazão WFC
real, parameter :: Qwfc=179468.          !Energia térmica fornecida (nominal)
real, parameter :: Iwfc=16000.           !Investimento WFC [US$]
real, parameter :: TaxaAmortWfc=0.18     !Taxa Mínima Atratividade
real, parameter :: TempoAmortWfc=5.      !Vida Contábil
real, parameter :: POeMWfc=0.05          !O & M da WFC[US$/h]

!Trocadores de Calor (TC)

real, parameter :: Itc2=2800.             !Investimento TC
real, parameter :: TaxaAmortTc2=0.18     !Taxa Mínima Atratividade
real, parameter :: TempoAmortTc2=5.      !Vida Contábil
real, parameter :: POeMTc2=0.03          !O & M [US$/h]

!      INICIO DE CALCULOS

real n_CH4(n),n_CO2(n),n_H2OL(n),n_H2OG(n),n_O2(n),n_N2(n),m_soja(n),T(n),ss(n),sss(n)
real psat,h_CO2,h_H2OL,h_H2OG,h_O2,h_N2,h_CH4,h_soja
real A,B,coef,coef_CO2,coef_H2O,coef_O2,coef_N2,AA,BB,CC,DD
real fi5,Solucao
real Qm,CT,
real Zs,Zq,OeMs,OeMq
real Zm,OeMmicro,VendaEnergia
real Zfc,OeMfc,VendaEnergiaFc,Zwfc,OeMWfc,Ztc2,OeMTc2
real lt
real mdot(n)
real Edot(n)
real Exdot(n)
real Y_O2(n),Y_N2(n),Y_H2OG(n),Y_CH4(n),Y_CO2(n)

      T(9)=T_0
5      T(1)=T_0
      T(3)=T_3
      T(4)=T_4
      T(7)=T_0
      T(8)=T_8
      T(10)=T_10
      T(11)=T_0
      T(13)=T_0
      T(14)=T_14
      T(15)=T_15
      T(16)=T_16
      T(18)=T_18
      T(19)=T_0

      Qm=0.0

      T(17)=T(16)-(Qwfc*NrWFC/(m_H2OLfc*3600.*Cw))

      if ((n_fc.eq.0.0).or.(NrWFC.eq.0.0)) then
      Qm=0.0
      else
      Qm=3600.*m_H2OLfc*Cw*(T(16)-T(18))
      goto 23
      endif

23      write(*,*) 'T6=',T(6),'    T12=',T(12),'    T9=',T(9)

      Solucao=0.0

334      format(5x,4(2x,f10.2))
335      format(5x,6(2x,f10.2))
392      format(2x,8(1x,f7.1))

      do 100 i=1,n
      n_CH4(i)=0.0
      n_CO2(i)=0.0
      n_H2OL(i)=0.0
      n_H2OG(i)=0.0
      n_O2(i)=0.0
      n_N2(i)=0.0
      m_soja(i)=0.0

100      continue

```

```

m_soja(9)=m_soja_9
m_soja(9)=m_soja(9)*(1.0-c_9)
n_H2OL(9)=m_soja(9)/(1.0-c_9)*c_9/18.0

m_soja(8)=m_soja(9)
n_H2OL(8)=n_H2OL(9)

m_soja(7)=m_soja(9)
n_H2OL(7)=m_soja(9)/(1.0-c_9)*c_7/18.0

coef=fil*psat(T(1))/(100.0-fil*psat(T(1)))
coef_CO2=1.0
coef_H2O=2.0+9.52*lf*coef
coef_O2=2.0*(1f-1.0)
coef_N2=7.52*1f

lt=1.0

8000 A=-75730.8+h_CH4(T(1))+2.*lt*(-717.24+h_O2(T(1)))+7.52*lt*(-
707.1+h_N2(T(1)))+9.52*lt*coef*(-287741.0+h_H2OG(T(1)))
B=A-(-394379.44+h_CO2(T(10)))-(2.+9.52*lt*coef)*(-287741.0+h_H2OG(T(10)))-2.*(lt-1.)*(-
717.24+h_O2(T(10)))-7.52*lt*(-707.1+h_N2(T(10)))

n_CH4(11)=n_turbinas*118800./(B-.27*802000.)
if (n_turbinas.eq.0.0) then
A=0.0
else
A=n_CH4(11)*(44.+(2.+9.52*coef*lt*18.+2.*(lt-1.)*32.+7.52*lt*28.))
A=abs((A-m_gas_turbina*n_turbinas)/(m_gas_turbina*n_turbinas))*100.
if (A.le.1.0) then
goto 8500
else
lt=lt+0.01
goto 8000
endif
goto 8500
endif

8500 n_H2OG(11)=9.52*lt*coef*n_CH4(11)
n_O2(11)=2.*lt*n_CH4(11)
n_N2(11)=7.52*lt*n_CH4(11)

n_CO2(10)=n_CH4(11)
n_H2OG(10)=(2.+9.52*lt*coef)*n_CH4(11)
n_O2(10)=2.*(lt-1.)*n_CH4(11)
n_N2(10)=7.52*lt*n_CH4(11)

AA=m_soja(9)*etar*(h_soja(T(8),cps)-h_soja(T(9),cps))+n_H2OL(9)*etar*(h_H2OL(T(8))-
h_H2OL(T(9)))

CC=coef_CO2*h_CO2(T(3))+coef_H2O*h_H2OG(T(3))+coef_O2*h_O2(T(3))+coef_N2*h_N2(T(3))

T(2)=T(1)

A=-eps*802500.-75730.8+h_CH4(T(1))+2.*1f*(-717.24+h_O2(T(1)))+7.52*1f*(-
707.1+h_N2(T(1)))+(coef_H2O-2.0)*(-287741.0+h_H2OG(T(1)))-coef_CO2*(-
394379.44+h_CO2(T(2)))-coef_H2O*(-287741.0+h_H2OG(T(2)))-
coef_O2*(-717.24+h_O2(T(2)))-coef_N2*(-707.1+h_N2(T(2)))

200 T(2)=T(2)+0.1
B=-eps*802500.-75730.8+h_CH4(T(1))+2.*1f*(-717.24+h_O2(T(1)))+7.52*1f*(-
707.1+h_N2(T(1)))+(coef_H2O-2.0)*(-287741.0+h_H2OG(T(1)))-coef_CO2*(-
394379.44+h_CO2(T(2)))-coef_H2O*(-287741.0+h_H2OG(T(2)))-
coef_O2*(-717.24+h_O2(T(2)))-coef_N2*(-707.1+h_N2(T(2)))

if (A*B.le.0.0) then
T(2)=T(2)-0.05
goto 300
endif
A=B
goto 200

300 CC=etam*(coef_CO2*h_CO2(T(2))+coef_H2O*h_H2OG(T(2))+coef_O2*h_O2(T(2))+coef_N2*h_N2(T(
2)))-CC

```

```

T(6)=T(4)
350 BB=(h_O2(T(6))+3.76*h_N2(T(6))+4.76*coef*h_H2OG(T(6)))
n_O2(6)=h_O2(T(4))+3.76*h_N2(T(4))+4.76*coef*h_H2OG(T(4))
n_O2(6)=AA/(n_O2(6)-etar*BB)

n_N2(6)=3.76*n_O2(6)
n_H2OG(6)=4.76*coef*n_O2(6)

n_O2(4)=n_O2(6)
n_N2(4)=n_N2(6)
n_H2OG(4)=n_H2OG(6)

n_CH4(1)=(Qm+n_O2(4)*(h_O2(T(3))-etar*h_O2(T(4)))+n_N2(4)*(h_N2(T(3))-
etar*h_N2(T(4)))+n_H2OG(4)*(h_H2OG(T(3))-etar*h_H2OG(T(4)))-
etar*(n_CO2(10)*h_CO2(T(10))+n_H2OG(10)*h_H2OG(T(10))+n_O2(10)*h_O2(T(10))+n_N2(10)*h
_N2(T(10))))/CC

n_CO2(2)=coef_CO2*n_CH4(1)
n_H2OG(2)=coef_H2O*n_CH4(1)
n_O2(2)=coef_O2*n_CH4(1)
n_N2(2)=coef_N2*n_CH4(1)

n_H2OG(1)=(coef_H2O-2.0)*n_CH4(1)
n_O2(1)=(coef_O2+2.0)*n_CH4(1)
n_N2(1)=coef_N2*n_CH4(1)

n_CO2(3)=n_CO2(2)+n_CO2(10)
n_H2OG(3)=n_H2OG(2)+n_H2OG(4)+n_H2OG(10)
n_O2(3)=n_O2(2)+n_O2(4)+n_O2(10)
n_N2(3)=n_N2(2)+n_N2(4)+n_N2(10)

DD=etas*(m_soja(7)*h_soja(T(7),cps)+n_H2OL(7)*(h_H2OL(T(7)))+n_CO2(3)*(h_CO2(T(3)))+n
_H2OG(3)*(h_H2OG(T(3)))+n_O2(3)*(h_O2(T(3)))+n_N2(3)*(h_N2(T(3))))

DD=DD+n_H2OL(7)*(-287741.0)+n_CO2(3)*(-394379.44)+n_H2OG(3)*(-287741.0)+n_O2(3)*(-
717.24)+n_N2(3)*(-707.10)

DD=DD-m_soja(8)*h_soja(T(8),cps)-n_H2OL(8)*(-287741.0+h_H2OL(T(8)))

n_CO2(5)=n_CO2(3)
n_H2OG(5)=n_H2OG(3)+n_H2OL(7)-n_H2OL(8)
n_O2(5)=n_O2(3)
n_N2(5)=n_N2(3)

T(5)=T(9)
A=DD-n_CO2(5)*(-394379.44+h_CO2(T(5)))-n_H2OG(5)*(-287741.0+h_H2OG(T(5)))-n_O2(5)*(-
717.24+h_O2(T(5)))-n_N2(5)*(-707.1+h_N2(T(5)))

400 T(5)=T(5)+0.1
B=DD-n_CO2(5)*(-394379.44+h_CO2(T(5)))-n_H2OG(5)*(-287741.0+h_H2OG(T(5)))-n_O2(5)*(-
717.24+h_O2(T(5)))-n_N2(5)*(-707.1+h_N2(T(5)))

if(A*B.le.0.0) then
T(5)=T(5)-0.05
goto 500
endif
A=B
goto 400

500 V=1.0e-05*(n_CO2(5)+n_H2OG(5)+n_O2(5)+n_N2(5))*8314.3*(273.15+T(5))
do 390 i=1,n

390 continue

fi5=100.*n_H2OG(5)/(n_CO2(5)+n_H2OG(5)+n_O2(5)+n_N2(5))/psat(T(5))*100.

if (Solucao.eq.1.0) then
Solucao=0.0
goto 1000
endif

if (fi5.ge.100.) then
T(6)=T(6)+0.2
Solucao=1.
goto 350

```

```

endif

T(6)=T(6)-0.2
goto 350

1000 T(12)=T(13)-((etaWFC*Qe(T(16))*NrWFC)/(n_O2(6)*32.+n_N2(6)*28.+n_H2OG(6)*18.))
if (abs((T(12)-T(6))/T(12)).lt.0.05) then
goto 9999
else
T(9)=T(9)+0.95
goto 5
endif

9999 T(12)=T(6)
n_H2OG(12)=n_H2OG(6)
n_O2(12)=n_O2(6)
n_N2(12)=n_N2(6)

n_H2OG(13)=n_H2OG(6)
n_O2(13)=n_O2(6)
n_N2(13)=n_N2(6)

n_CH4(19)=mGN_fc/22.414
n_H2OG(19)=n_H2OG(1)
n_O2(19)=n_O2(1)
n_N2(19)=n_N2(1)

n_H2OL(14)=8.33*NrWFC/18.*3600. ! kmol/h
n_H2OL(15)=n_H2OL(14)
n_H2OL(16)=m_H2OLfc/18.*3600.
n_H2OL(17)=n_H2OL(16)
n_H2OL(18)=n_H2OL(16)

do 6667 i=1,n
if ((i.eq.1).or.(i.eq.19).or.(i.eq.11)) then
Y_CH4(i)=1.
Y_O2(i)=n_O2(i)/(n_O2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
Y_N2(i)=n_N2(i)/(n_O2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
Y_H2OG(i)=n_H2OG(i)/(n_O2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
Y_CO2(i)=0.0
aaa=Y_O2(i)+Y_N2(i)+Y_H2OG(i)
else if
((i.eq.7).or.(i.eq.8).or.(i.eq.9).or.(i.eq.14).or.(i.eq.15).or.(i.eq.16).or.(i.eq.17)
.or.(i.eq.18)) then
aaa=1.0
goto 6666
else
Y_CH4(i)=0.0
Y_O2(i)=n_O2(i)/(n_O2(i)+n_CO2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
Y_CO2(i)=n_CO2(i)/(n_O2(i)+n_CO2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
Y_N2(i)=n_N2(i)/(n_O2(i)+n_CO2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
Y_H2OG(i)=n_H2OG(i)/(n_O2(i)+n_CO2(i)+n_N2(i)+n_H2OG(i))
aaa=Y_O2(i)+Y_N2(i)+Y_H2OG(i)+Y_CO2(i)
endif

6666 write(*,*) ''

6667 continue

VVV=NrWFC*Qe(T(16))
if (VVV.le.0.0001) then
VVV=0.0
endif

write(*,*) ''
write(*,*) '***** RESUMO ANALISE ENERGETICA *****'
write(*,*) 'Temperatura Saída Ar Secador "Saturado" T5=',T(5),' (Celsius)'
write(*,*) 'Temperatura Entrada Ar Resfriador T6=',T(6),' (Celsius)'
write(*,*) 'Temperatura Saída Soja Resfriador T9=',T(9),' (Celsius)'
write(*,*) 'Temperatura Saída da Fornalha T2=',T(2),' (Celsius)'
write(*,*) 'Umidade do Ar na Saída Secador u5=',fi5
write(*,*) 'Vazão de Ar Total Saída Secador v=',V,' [m3/h]'
write(*,*) 'Vazão de água na Fuel Cell =',m_H2OLfc,' [m3/h]'
write(*,*) 'Temperatura na Entrada Equip Frigorifico T16=',T(16),' (Celsius)'
write(*,*) 'Temperatura na Entra Fuel Cell Sai Equip Frig T17=',T(17),' (Celsius)'

```

```

write(*,*) 'Temperatura na Saída Fuel Cell           T18=',T(18),' (Celsius)'
write(*,*) 'Quantidade de calor no troca com misturador   =',Qm,' [kJ/h]'
write(*,*) 'Quantidade de calor fornecido Equip Frig     =',VVV,' kJ/h'
write(*,*)

pause

!***** AVALIACAO ECONOMICA *****

! Anualização do Custo dos Combustíveis [US$/ano]
Cf1=((n_CH4(1))*8314.4*(273.15+T(1))*1.0e-05)*PGN           !Fornalha
Cf2=We*(PEE/1000.)

!Exaustores
Cf3=((n_CH4(11))*8314.4*(273.15+T(1))*1.0e-05)*PGNcoger   !Microturbinas
Cf4=mGN_fc*PGNcoger

!Célula a Combustível
Cf1a=Cf1*HoraAnual
Cf2a=Cf2*HoraAnual
Cf3a=Cf3*HoraAnualMicro
Cf4a=Cf4*HoraAnualFc*n_fc

! Anualização de Investimento no Secador [US$/ano]
Zs=Isec*((TaxaAmort*(1+TaxaAmort)**TempoAmort)/((1+TaxaAmort)**TempoAmort-1))
! Anualização de Investimento no Queimador [US$/ano]
Zq=Ique*((TaxaAmort*(1+TaxaAmort)**TempoAmort)/((1+TaxaAmort)**TempoAmort-1))
! Custo Anualizado da Secagem da Soja com Gás Natural [US$/ano]
OeMs=12257.85
OeMq=POeMq*((n_CH4(1))*8314.4*(273.15+T(1))*1.0e-05)*HoraAnual

! Anualização de Investimento na Microturbina [US$/ano]
Zm=Imicro*n_turbinas*((TaxaAmortMicro*(1+TaxaAmortMicro)**TempoAmortMicro)/((1+TaxaAmortMicro)**TempoAmortMicro-1))
OeMmicro=POeMmicro*((n_CH4(11))*8314.4*(273.15+T(1))*1.0e-05)*HoraAnualMicro
VendaEnergia=(PotGerMicro*n_turbinas)*(PEVenda/1000)*HoraAnualMicro

! Anualização de Investimento na Célula a Combustível [US$/ano]
Zfc=Ifc*n_fc*((TaxaAmortFc*(1+TaxaAmortFc)**TempoAmortFc)/((1+TaxaAmortFc)**TempoAmortFc-1))
OeMfc=POeMfc*mGN_fc*n_fc*HoraAnualfc
if((PotGerFc*n_fc)-We).lt.0.0) then
VendaEnergiaFc=(PotGerFc*n_fc)*(PEE/1000)*HoraAnualFc
else
VendaEnergiaFc=((PotGerFc*n_fc)-We)*(PEVenda/1000)*HoraAnualFc+(We*(PEE/1000)*HoraAnual) !R$/ano
goto 20000
endif

! Anualização de Investimento no Equipamento Frigorifico WFC e Bombas
20000
Zwfc=Iwfc*NrWFC*((TaxaAmortWfc*(1+TaxaAmortWfc)**TempoAmortWfc)/((1+TaxaAmortWfc)**TempoAmortWfc-1))
OeMWfc=POeMWfc*HoraAnualFc*NrWFC

! Anualização de Investimento nos Trocadores de Calor e Bombas
if((n_fc.eq.0.0).or.(NrWFC.eq.0.0)) then
Ztc2=0.0
OeMTc2=0.0
else
Ztc2=(Itc2*((TaxaAmortTc2*(1+TaxaAmortTc2)**TempoAmortTc2)/((1+TaxaAmortTc2)**TempoAmortTc2-1)))+NrWFC*(Itc2*((TaxaAmortTc2*(1+TaxaAmortTc2)**TempoAmortTc2)/((1+TaxaAmortTc2)**TempoAmortTc2-1)))
OeMTc2=POeMtc2*HoraAnualFc+NrWFC*POeMtc2*HoraAnualFc
goto 21000
endif

21000 Cp_soja=(Cf1a+Cf2a+Cf3a+Cf4a-VendaEnergia-
VendaEnergiaFc)+(Zs+Zq+Zm+Zfc+Zwfc+Ztc2)+(OeMs+OeMq+OeMmicro+OeMfc+OeMWfc+OeMtc2)

write(*,*) '***** RESUMO ANALISE TECNICA DA SECAGEM *****'
write(*,3100) T(3)
3100 format (' Temperatura Entrada Ar Secador           [graus Celsius] T3=',f10.2)
write(*,3200) T(5)
3200 format (' Temperatura Saída Ar Secador "Saturado" [graus Celsius] T5=',f10.2)
write(*,3300) fi5
3300 format (' Umidade do Ar na Saída Secador           u5=',f10.2)
write(*,3400) V
3400 format (' Vazão de Ar Total Saída Secador           [m3/h]           V=',f10.2)
write(*,3410) n_CH4(1)*8314.3*(273.15+T(1))*1.e-05
3410 format(' Consumo GN na Fornalha           [m3/h]           =',f10.2)
write(*,3600) We

```

```

3600 format (' Consumo de Energia Elétrica [kWh/h] =',f10.2)
write(*,3420) n_turbinas
3420 format (' Quantidade de Microturbinas =',f10.2)
write(*,3430) n_CH4(11)*8314.3*(273.15+T(1))*1.e-05
3430 format (' Consumo GN Microturbina [m3/h] =',f10.2)
write(*,3650) PotGerMicro*n_turbinas
3650 format (' Geração de Energia Elétrica da(s) microturbinas [kWh/h] =',f10.2)
write(*,3450) n_fc
3450 format (' Quantidade de Fuel Cell =',f10.2)
write(*,3440) mGN_fc*n_fc
3440 format (' Consumo GN Fuel Cell [m3/h] =',f10.2)
write(*,3660) PotGerFc*n_fc
3660 format (' Geração de Energia Elétrica da(s) Fuel Cell [kWh/h] =',f10.2)
write(*,3770) NrWFC
3770 format (' Quantidade de Equipamento(s) Frigorifico(s) =',f10.2)
write(*,*) '*****'
CT=((n_CH4(1)+n_CH4(11))*8314.4*(273.15+T(1))*1.0e05)+mGN_fc*n_fc+((n_CH4(11))*8314.4*
(273.15+T(1))*1.0e-05)*n_turbinas
write(*,3500) CT
3500 format (' Consumo Total de Gas Natural [m3/h] =',f10.2)
write(*,3700) CT/(m_soja_9/1000.)
3700 format (' Consumo Especifico GN/tsoja_seca [m3/tsoja_seca] =',f10.3)
write(*,*) '*****'

pause

write(*,*) '***** RESUMO ANALISE ECONOMICA *****'
write(*,2000) Cfla
2000 format (' Custo Anualizado do Gas Natural na Fornoalha [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2050) Cf3a
2050 format (' Custo Anualizado do Gas Natural na(s) Microturbina(s) [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2060) Cf4a
2060 format (' Custo Anualizado do Gas Natural na(s) Fuel Cell [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2100) Cf2a
2100 format (' Custo Anualizado da Energia Elétrica [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2200) Zs
2200 format (' Custo Anualizado do Investimento no Secador [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2300) Zq
2300 format (' Custo Anualizado do Investimento no Queimador [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2350) Zm
2350 format (' Custo Anualizado do Investimento na(s) Microturbina(s) [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2360) Zfc
2360 format (' Custo Anualizado do Investimento na(s) Fuel Cell [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2370) Zwfc
2370 format (' Custo Anualizado do Investimento no(s) Equip Frig [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2355) Ztc2
2355 format (' Custo Anualizado do Investimento nos Trocadores Calor [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2400) OeMs
2400 format (' Custo Anualizado da Operação e Manutenção no Secador [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2500) OeMq
2500 format (' Custo Anualizado da Operação e Manutenção no Queimador [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2540) OeMmicro
2540 format (' Custo Anualizado da Operação e Manutenção Microturbina [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2570) OeMfc
2570 format (' Custo Anualizado da Operação e Manutenção Fuel Cell [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2580) POeMWfc*HoraAnualFc*NrWFC
2580 format (' Custo Anualizado da Operação e Manutenção Equip Frig [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2590) OeMTc2
2590 format (' Custo Anualizado da Operação e Muna Trocadores Calor [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2550) VendaEnergia
2550 format (' Venda de Energia Elétrica Gerada pela Microturbina(s) [US$/ano] =',f10.2)
write(*,2560) VendaEnergiaFc
2560 format (' Venda de Energia Elétrica Gerada pela(s) Fuel Cell [US$/ano] =',f10.2)
write(*,*)
'*****'
pause

write(*,*) ' DADOS PARA ANALISE TERMONECONOMICA '
write(*,*) ''

do 8888 i=1,n
if((i.eq.7.).or.(i.eq.8.).or.(i.eq.9.)) then
call ANEXL (m_soja(i),n_H2OL(i),T(i),mdot(i),Edot(i),Exdot(i),cps)
else if ((i.ge.14).and.(i.le.18)) then
call ANEXL (0.0,n_H2OL(i),T(i),mdot(i),Edot(i),Exdot(i),cps)
else

```

```

                call
ANEXG(n_CH4(i),n_CO2(i),n_H2OG(i),n_O2(i),n_N2(i),T(i),mdot(i),Edot(i),Exdot(i),Y_CH4(i),Y_CO2
(i),Y_H2OG(i),Y_O2(i),Y_N2(i))
        end if

        if ((i.ge.12).and.(i.le.19).and.(n_fc.lt.1.)) then
            mdot(i)=0.0
            Edot(i)=0.0
            Exdot(i)=0.0
        endif

        if ((i.ge.10).and.(i.le.11).and.(n_turbinas.lt.1.)) then
            mdot(i)=0.0
            Edot(i)=0.0
            Exdot(i)=0.0
        endif

        if ((Exdot(i).gt.-1.).and.(Exdot(i).lt.0.05)) then
            Exdot(i)=0.0
        endif

        if (mdot(i).eq.0.0) then
            Edot(i)=0.0
            Exdot(i)=0.0
        endif
write(*,2222) i,T(i),mdot(i),Edot(i),Exdot(i)
2222 format(I3,' T=',f9.3,' mdot=',f9.3,' Edot=',f9.3,' Exdot=',f9.3)

8888 continue
        QQ0=m_soja(9)*(h_soja(T(9),cps)-h_soja(T(7),cps))
        QQ1=((n_H2OL(7)-n_H2OL(9))*(h_H2OG(T(6))-h_H2OL(T(7))))
        QQ2=-n_H2OL(9)*(h_H2OL(T(9))-h_H2OL(T(7))) !kJ/h
        QQ=QQ0+QQ1+QQ2 !kJ/h
        QQ=QQ*24/1000. !kJ/dia
        QQ=QQ/4.1868 !Mcal/dia
!
!0101 write(*,0101) QQ
!0101 format (' Energia Necessária Secagem Soja =',f20.2,' [Mcal/dia]')
!
        stop
        END

!***** Funções para calculo da ENTALPIA

        real FUNCTION h_H2OL(X) ! kJ/kmol
        real X,Y
        Y=X+273.15
        h_H2OL=75.336*Y-20578.3+0.27
        END FUNCTION

        real FUNCTION h_H2OG(X) ! kJ/kmol
        real X,Y
        Y=X+273.15
h_H2OG=143.05*Y-(183.54/1.25)/100.** (0.25)*Y**(1.25)+(82.751/1.5)/100.** (0.5)*Y**(1.5)-
(3.6989/200)*Y**(2)-11038.+45017.95
        END FUNCTION

        real FUNCTION h_CO2(X) ! kJ/kmol
        real X,Y
        Y=(X+273.15)
h_CO2=-3.7357*Y+(30.529/1.5)/100.** (0.5)*Y**(1.5)-
(4.1034/200.)*Y**(2)+(0.024198/(3*100.** (2)))*Y**(3)-6653.-.28
        END FUNCTION

        real FUNCTION h_O2(X) ! kJ/kmol
        real X,Y
        Y=(X+273.15)
h_O2=37.432*Y+(0.020102/(2.5*(100.** (1.5))))*(Y**(2.5))+(178.57/(0.5*(100.** (-1.5))))*(Y**(-
0.5))- (236.88/(100.** (-2.)))*(Y**(-1.))-23171.-.47
        END FUNCTION

        real FUNCTION h_N2(X) ! kJ/kmol
        real X,Y
        Y=(X+273.15)
h_N2=39.060*Y+(512.79/(0.5*(100.** (-1.5))))*(Y**(-0.5))- (1072.7/100.** (-2.))*Y**(-

```

```

1)+(820.40/2)/100.**(-3.)) *Y**(-2)-38949.-.51
END FUNCTION

real FUNCTION h_CH4(X) ! kJ/kmol
real X,Y
Y=(X+273.15)
h_CH4=-672.87*Y+(439.74/1.25)/100.**(.25)*Y**(1.25)-
(24.875/1.75)/100.**(.75)*Y**(1.75)+(323.88/0.5)/100**(-0.5)*Y**(0.5)-38547.-.25
END FUNCTION

real FUNCTION h_soja(X,cps)
real X,cps
h_soja=cps*X ! kJ/kg
END FUNCTION

real FUNCTION psat(X) ! kPa
real X,Y
Y=(X+273.15)/647.0
psat=22100.0*exp(5.3727*(1.0-1.0/Y)+0.344*(7.49408-
11.18177*Y**3+3.68769*Y**6+17.92998*log(Y)))
END FUNCTION

real FUNCTION Qe(X)
real X
Qe=(-0.3086*(X**2)+67.116*X-3321.1)*0.252*4.1868*1000
END FUNCTION

!***** Subrotina ANEXG - CALCULO DE VAZAO MASSICA, FLUXO DE ENERGIA E FLUXO DE EXERGIA

subroutine
ANEXG(n_CH4,n_CO2,n_H2OG,n_O2,n_N2,T,m_dot,E_dot,Ex_dot,Y_CH4,Y_CO2,Y_H2OG,Y_O2,Y_N2)
real n_CH4,n_CO2,n_H2OG,n_O2,n_N2,T,m_dot
real E_dot,Ex_dot,Y_CH4,Y_CO2,Y_H2OG,Y_O2,Y_N2,E_PH, E_CH
real H,H0,S,S0
H=Y_CO2*h_CO2(T)+Y_O2*h_O2(T)+Y_N2*h_N2(T)+Y_H2OG*h_H2OG(T) !kJ/kmol
H0=Y_CO2*h_CO2(25.)+Y_O2*h_O2(25.)+Y_N2*h_N2(25.)+Y_H2OG*h_H2OG(25.) !kJ/kmol
S0=Y_CO2*s_CO2(25.,1.)+Y_O2*s_O2(25.,1.)+Y_N2*s_N2(25.,1.)+Y_H2OG*s_H2OG(25.,1.) !kJ/(kmolK)
!E_CH=Y_CO2*14176.+Y_O2*3951.+Y_N2*639.+Y_H2OG*8636. !kJ/kmol MODELO1 DESGIN (2* OPCÃO)
E_CH=Y_CO2*19870.+Y_O2*3970.+Y_N2*720.+Y_H2OG*9500. !kJ/kmol MODELO2 DESIGN
m_dot=((n_CH4*16.+n_CO2*44.+n_H2OG*18.+n_O2*32.+n_N2*28.)/3600.) !kg/s
E_dot=((n_CH4*(h_CH4(T)+13257.*4.18*16.)+(n_CO2+n_O2+n_N2+n_H2OG)*H)/3600. !kJ/s
if ((Y_CO2.eq.0.0).and.(Y_CH4.eq.0.0)) then
S=Y_O2*s_O2(T,1.)+Y_N2*s_N2(T,1.)+Y_H2OG*s_H2OG(T,1.) !kJ/(kmolK)
E_CH=E_CH+298.*8.3*(Y_O2*log(Y_O2)+Y_N2*log(Y_N2)+Y_H2OG*log(Y_H2OG)) !kJ/kmol
E_PH=H-H0-298.*(S-S0) !kJ/kmol
Ex_dot=((n_H2OG+n_O2+n_N2)*(E_PH+E_CH))/3600. !kJ/s
else if (Y_CH4.eq.0.0) then
S=Y_CO2*s_CO2(T,1.)+Y_O2*s_O2(T,1.)+Y_N2*s_N2(T,1.)+Y_H2OG*s_H2OG(T,1.) !kJ/(kmolK)
E_PH=H-H0-298.*(S-S0) !kJ/kmol
E_CH=E_CH+298.*8.3*(Y_CO2*log(Y_CO2)+Y_O2*log(Y_O2)+Y_N2*log(Y_N2)+Y_H2OG*log(Y_H2OG))
Ex_dot=((n_CO2+n_H2OG+n_O2+n_N2)*(E_PH+E_CH))/3600. ! kJ/s
else if (Y_CO2.eq.0.0) then
S=Y_O2*s_O2(T,1.)+Y_N2*s_N2(T,1.)+Y_H2OG*s_H2OG(T,1.) !kJ/(kmolK)
E_PH=H-H0-298.*(S-S0) !kJ/kmol
E_CH=E_CH+298.*8.3*(Y_O2*log(Y_O2)+Y_N2*log(Y_N2)+Y_H2OG*log(Y_H2OG)) !kJ/kmol
Ex_dot=((n_H2OG+n_O2+n_N2)*(E_PH+E_CH)+n_CH4*824348.)/3600. !kJ/s
endif
return
end

!***** Subrotina ANEXL - CALCULO DE VAZAO MASSICA, FLUXO DE ENERGIA E FLUXO DE EXERGIA

subroutine ANEXL (m_soja,n_H2OL,T,m_dot,E_dot,Ex_dot,cps)
real m_soja,n_H2OL,T,m_dot,E_dot,Ex_dot,cps
m_dot=(m_soja+n_H2OL*18.)/3600. ! kg/s
E_dot=(m_soja*h_soja(T,cps)+n_H2OL*h_H2OL(T))/3600. ! kJ/s
Ex_dot=((m_soja*(cps*(T-25.0)-
298.15*(cps*log((T+273.15)/(273.15+25.))))+n_H2OL*psi_H2OL(T,1.0))/3600.) ! kJ/s
return
end

!***** Funções para calculo da ENTROPIA

real FUNCTION s_H2OG(T,Y)
real T,Y,TT

```

```

TT=T+273.15
s_H2OG=143.05*log(TT)-232.16*(TT**0.25)+16.55*(TT**0.5)-0.036989*TT+Y*0.0
END FUNCTION

real FUNCTION s_H2OL(T,Y)
real T,Y
s_H2OL=-0.0004*(T**2)+0.2728*T+Y*0.0
END FUNCTION

real FUNCTION s_CO2(T,Y)
real T,Y,TT,TETA
TT=T+273.15
TETA=TT/100
s_CO2=-3.7357*log(TETA)+61.058*(TETA**0.5)-4.1034*TETA+0.012099*(TETA**2)+Y*0.0
END FUNCTION

real FUNCTION s_O2(T,Y)
real T,Y,TT,TETA
TT=T+273.15
TETA=TT/100
s_O2=37.432*log(TETA)+0.0134*(TETA**1.5)+119.0467*(TETA**(-1.5))-118.44*(TETA**(-2.))+Y*0.0
END FUNCTION

real FUNCTION s_N2(T,Y)
real T,Y,TT,TETA
TT=T+273.15
TETA=TT/100
s_N2=39.060*log(TETA)+341.86*(TETA**(-1.5))-536.35*(TETA**(-2.))+273.46667*(TETA**(-3.))+Y*0.0
END FUNCTION

!***** Funções para calculo da EXERGIA

real FUNCTION psi_H2OG(T,Y)
real T,Y,h_H2OG,s_H2OG
psi_H2OG=h_H2OG(T)-h_H2OG(25.0)-298.*(s_H2OG(T,Y)-s_H2OG(25.,.019))
END FUNCTION

real FUNCTION psi_H2OL(T,Y)
real T,Y,h_H2OL,s_H2OL
psi_H2OL=h_H2OL(T)-h_H2OL(25.0)-298.*(s_H2OL(T,1.)-s_H2OL(25.,1.))+Y*0.0
END FUNCTION

real FUNCTION psi_CO2(T,Y)
real T,Y,h_CO2,s_CO2
psi_CO2=h_CO2(T)-h_CO2(25.0)-298.*(s_CO2(T,Y)-s_CO2(25.,.0003))
END FUNCTION

real FUNCTION psi_O2(T,Y)
real T,Y,h_O2,s_O2
psi_O2=h_O2(T)-h_O2(25.0)-298.*(s_O2(T,Y)-s_O2(25.,.2059))
END FUNCTION

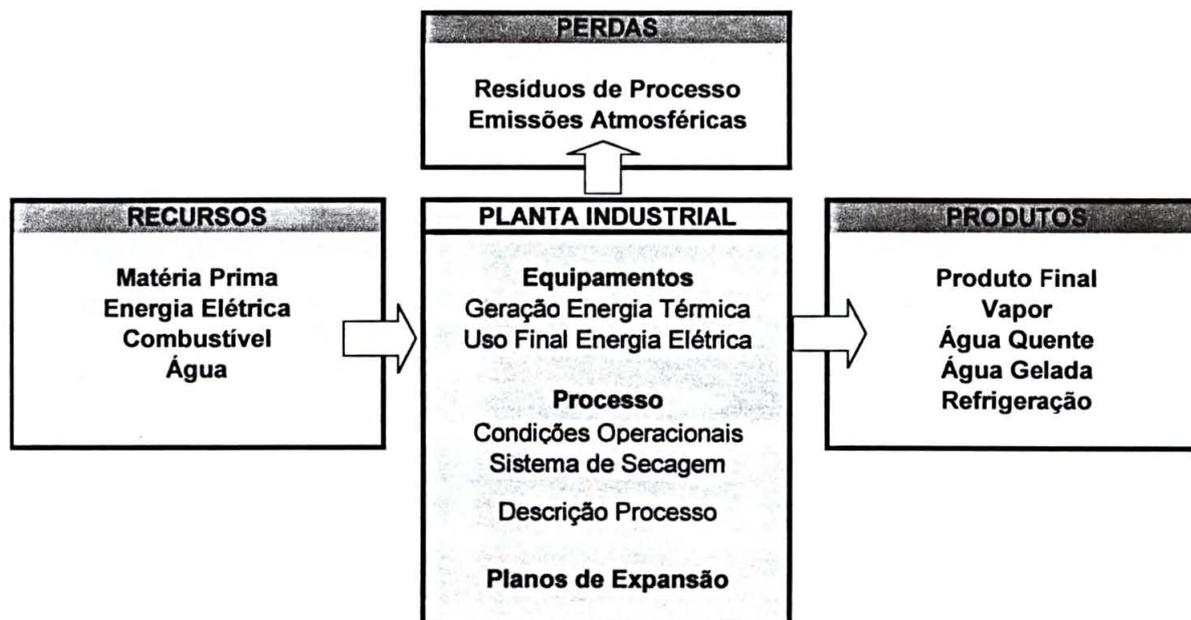
real FUNCTION psi_N2(T,Y)
real T,Y,h_N2,s_N2
psi_N2=h_N2(T)-h_N2(25.0)-298.*(s_N2(T,Y)-s_N2(25.,.7748))
END FUNCTION

real FUNCTION psi_CH4(T,Y)
real T,Y
psi_CH4=(13257.*4.18)*16.+T*0.0+Y*0.0
END FUNCTION

```

**ANEXO 1 – PLANILHA DE CAMPO PARA AVALIAÇÃO GLOBAL DE
PLANTA INDUSTRIAL COM USO DO SOFTWARE *ANEX***

SÍNTESE SOBRE PLANILHA DE LEVANTAMENTO DE DADOS PARA ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA



**PLANILHA RESUMIDA DE LEVANTAMENTO DE DADOS
PARA ANÁLISE ENERGÉTICA & EXERGÉTICA - GLOBAL DA PLANTA INDUSTRIAL**

INFORMAÇÃO DA PLANTA

Nome : _____
 Atividade Principal : _____
 Contato : _____ e-mail: _____
 Telefone: _____ Fax : _____

DETALHES DE INFORMAÇÃO DO CONSUMIDOR

Localização da unidade a ser avaliada : _____
 Idade da instalação : _____ Vida útil da instalação: _____
 Horas de Operação Anual (@ especificar sábados e domingos) _____

GÁS NATURAL

Já Utiliza Gás Natural: SIM NÃO Alto Médio Baixo
 Se Sim, Qual o grau de satisfação em relação ao energético anterior:

RECURSOS**1 - MATÉRIA PRIMA**

1.1 - Tipo / Manufatura (Soja etc.)				
1.2 - Fornecedor / Procedência				
1.3 - Umidade (%)				
1.4 - Consumo Anual (indicar unidade)				

2 - ENERGIA ELÉTRICA UTILIZADA (fornecer faturas de energia elétrica da concessionária, se possível for)

2.1 - Fornecedor / Procedência (Concessionária, Geração Própria)				
2.2 - Demanda Máxima (kW)				
2.3 - Demanda Média Média (kW)				
2.4 - Consumo Anual (kWh/ano)				
2.5 - Preço Médio da Energia Elétrica (R\$/MWh)				
2.6 - Despesas Anual de Energia Elétrica (R\$/ano)				

3 - COMBUSTÍVEL

3.1 - Tipo (Gás Natural, Lenha, Óleo BPF etc.)				
3.2 - Fornecedor / Procedência				
3.3 - Aplicação (Geração de Vapor, Aquecimento, Refrigeração etc.)				
3.6 - Pressão de Trabalho (indicar unidade)				
3.7 - Umidade (%) (@quando for o caso)				
3.8 - Consumo Anual (indicar unidade)				
3.9 - Preço Médio do Combustível (indicar unidade)				
3.10 - Despesas Anual do Combustível (R\$/ano)				

PRODUTOS**4 - PRODUTO FINAL**

8.1 - Tipo (cimento, soja, madeira beneficiada, etc.)				
8.2 - Umidade (%) (@ quando for o caso)				
8.3 - Temperatura (°C) (@ quando for o caso)				
8.4 - Produção Anual (indicar unidade)				
8.5 - Capacidade Máxima (indicar unidade)				

USO DE ENERGIA**5 - GERAÇÃO DE ENERGIA (Caldeira, Aquecedores, Refrigerados, Chillers, Secadores de Soja etc.)**

13.1 - Tipo (Caldeira, Secadores de Soja etc.)				
13.2 - Fabricante / Modelo				
13.3 - Produto (Vapor, Água Quente, Água Gelada, Refrigeração etc.)				
13.4 - Identificação de Combustível (@ vincular ao combustível no produto)				
13.5 - Capacidade Máxima (indicar unidade)				
13.6 - Consumo Anual de Combustível (indicar unidade)				
13.7 - Pressão de Trabalho (indicar unidade)				
13.8 - Temperatura de Entrada do Processo (°C)				
13.9 - Temperatura de Saída do Processo (°C)				
13.10 - Vida Útil do Equipmaneto (anos)				
13.11 - Operação (h/ano)				

PROCESSO**6 - SISTEMA DE SECAGEM**

16.1 - Tecnologia do Processo de Secagem (Fluxo Contínuo, Estático etc.)				
16.2 - Meses de Utilização do Sistema de Secagem				
16.3 - Vida Útil dos Equipamentos Existentes (anos)				
16.4 - Distância do Sistema de Secagem até possível entrada do Gás Natural				

17 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL

17.1 - Tipo de Combustível no Processo (@ associar com combustível e energia elétrica, quando for o caso)	Secagem (Lenha, Óleo BPF, Eletricidade etc.)			
	Esmagamento (Eletricidade, Vapor etc.)			
	Refinamento (Eletricidade, Vapor etc.)			
	Hidrogenação (Margarina)			
17.2 - Capacidade Instalada (toneladas de soja seca)	Secagem			
	Esmagamento			
	Refinamento			
	Hidrogenação (Margarina)			
17.3 - Tipo de Equipamento Utilizado (Fabricante/Modelo)	Secagem			
	Esmagamento	Preparação		
		Extração		
	Refinamento			
	Hidrogenação (Margarina)			

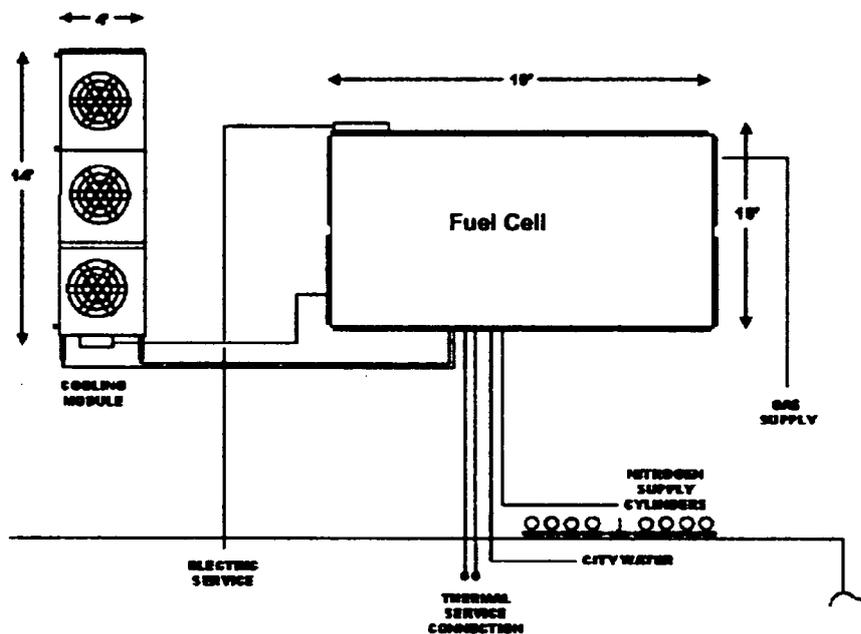
ANOTAÇÕES (Indicadores de Processo: Exemplo: na extração é 40 kWh/t_{soja seca})

--

ANEXO 2 – CÉLULA DE COMBUSTÍVEL PC25™C - ONSI CORPORATION

PC25C Performance Data

Feature	Characteristics
Rated Electrical Capacity	200 kW/235kVA
Voltage and Frequency	480/277 V, 60 Hz, 3 phase 400/230 V, 50 Hz, 3 phase
Fuel Consumption	Natural gas: 2050 cf/h @ 4-14" water pressure Anaerobic digester gas: 3200 cf/hr at 60% CH ₄
Efficiency (LHV Basis)	87% Total: 40% Electrical, 50% Thermal
Emissions	< 2 ppmv CO, < 1 ppmv NOx and negligible SOx (on 15% O ₂ , dry basis)
Thermal Energy Available	Standard: 900,000 Btu/hr @ 140F High heat options: 450,000 Btu/hr @ 140F and 450,000 Btu/hr @ 250F
Sound Profile	Conversational level (60dBA @ 30 ft.), acceptable for indoor installation.
Modular Power	Flexibility to meet redundancy requirements as well as future growth in power requirements.
Flexible Siting Options	Indoor or Outdoor installation, Small footprint
Power Module: Dimensions and Weight	10' x 10' x 18' 40,000 lbs.
Cooling Module: Dimensions and Weight	4' x 14' x 4' 1700 lbs.



ANEXO 3 – DADOS TÉCNICOS DE EQUIPAMENTO FRIGORÍFICO WFC

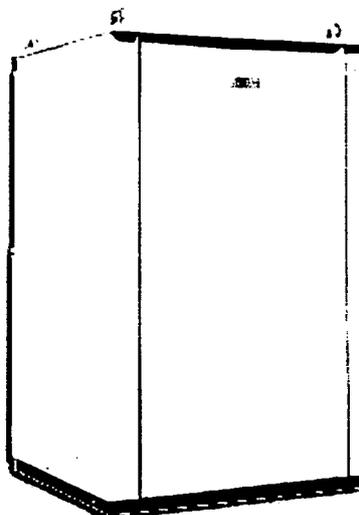
YAZAKI ENERGY SYSTEMS, INC.

Yazaki Energy Systems, Inc.

13740 Omega Road, Dallas, TX 75244-4516

Phone: (972) 385-8725; Fax: (972) 385-1324

<http://www.yazakienergy.com/>



WFC - 10

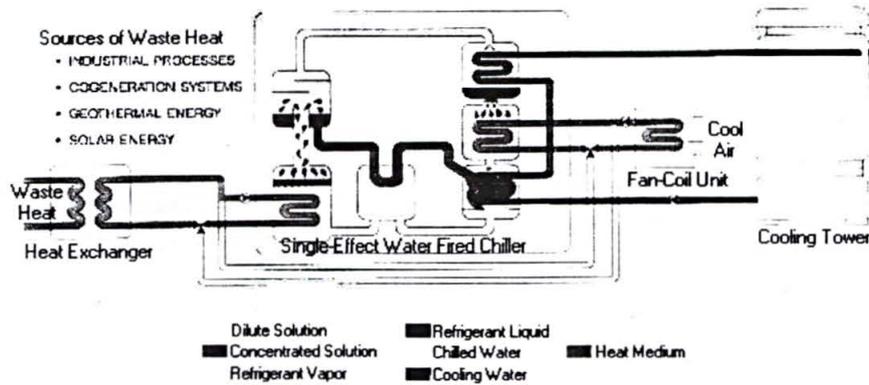
10 RT Cooling Capacity (Single Chiller) or 20, 30, 40, 50 RT (Modular Assemblies)

Yazaki water fired chillers are energized by hot water at 167°F - 212°F to provide chilled water for air conditioning systems or industrial cooling applications. This modular chiller, with nominal cooling capacity of 10 refrigeration tons, may be combined in assemblies when larger capacities are required. The condenser is water cooled and heat is rejected through a cooling tower.

Features:

- The water fired chiller can be energized by hot water supplied from solar collectors, waste heat or cogeneration systems.
- The absorption principle employs no moving parts and results in quiet, trouble free operation.
- Safe, odorless, non-toxic lithium bromide and water, the only working fluids, operate under a vacuum at all times.
- A patented refrigerant storage system ensures efficient cooling performance with variations in hot water temperature.
- Multiple modules can be step controlled, in response to cooling load, to increase part load performance.
- Nominal cooling capacities can be increased by up to 42% when hot water at 210°F is used.
- Transportation and lifting are simplified because of modular construction.
- Cabinets are finished with acrylic enamel paint and weatherproofed for outdoor installation.
- UL Listed

Applications: (Waste Heat Energized Cooling and Heating System - Cooling Operation)



Specifications:

Model	WFC	Modular	Modular Assemblies			
		10	20	30	40	50
Cooling	Capacity (MBH)	119.0	238.1	357.1	476.2	595.2
	Chilled Water Temp. (°F)*	48.2 Outlet, 57.2 Inlet				
Chilled Water	Rated Water Flow (gpm)	26.4	52.9	79.3	105.7	132.1
	Evap. Press Drop (psi)	5.5				
Heat Medium	Heat Input (MBH)	170.1	340.1	510.2	680.3	850.3
	Hot Water Temp. (°F)	190.4 Inlet, 181.4 Outlet				
	Rated Water Flow (gpm)	37.8	75.6	113.4	150.9	188.7
	Gen Press. Drop (psi)	3.9				
Cooling Water	Heat Rejection (MBH)	289.1	578.2	867.3	1156.5	1445.5
	Cooling Water Temp. (°F)	85 Inlet, 94 Outlet				
	Rated Water Flow (gpm)**	64.2	128.5	192.7	256.6	320.8
	Cond. & Abs. Press. Drop (psi)	9.7				
Electrical	Power Supply	208/230V, 60Hz, 1 ph				
	Consumption (W)	30	60	90	120	150
Number of Modules		1	2	3	4	5
Weight	Dry (lb)	1606	3212	4818	6424	8030

MBH = Btu/hr x 10³

NOTES: 1. Specifications are based on water in all circuits and fouling factor of 0.0005 ft²hr°F/Btu.

2. A motorized chilled water bypass valve is optional on modular assemblies and requires a 24V, 50/60 Hz (4.8W) power supply.

* Chilled water outlet temperature is factory set at 46.4°F outlet

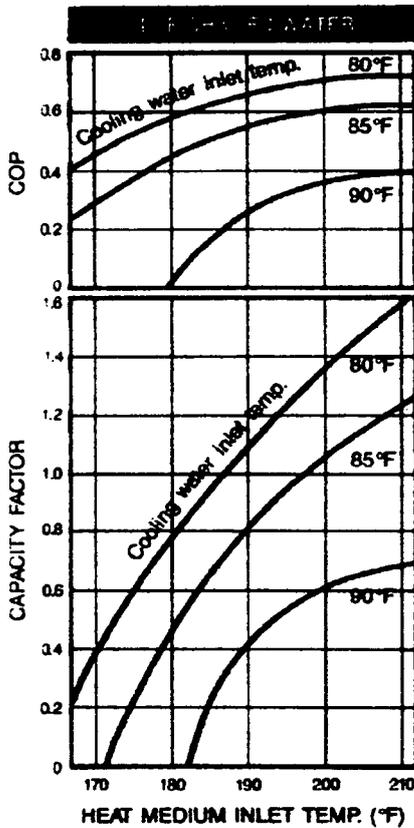
** Minimum cooling water flow.

Performance Characteristics

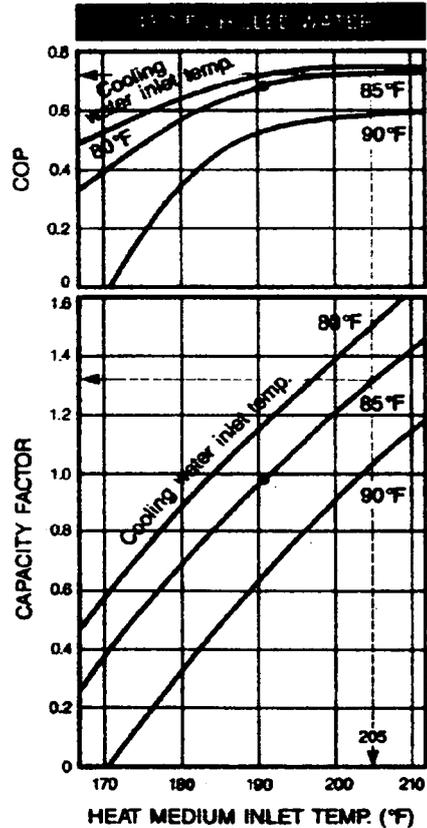
(Performance curves based on standard water flow rates)



Performance Characteristics



● Standard rating condition



Performance curves based on standard water flow rates.

ABSORPTION CHILLER HEAT BALANCE

HEAT IN = HEAT OUT

$$Q_g + Q_c = Q_c$$

Where, Q_g = Heat or fuel input to generator

Q_c = Cooling capacity

Q_c = Heat rejected to cooling tower

COEFFICIENT OF PERFORMANCE (COP)

$$COP = \frac{\text{COOLING CAPACITY}}{\text{HEAT OR FUEL INPUT}}$$

$$COP = \frac{Q_c}{Q_g}$$

COOLING CAPACITY CORRECTION FOR NON-STANDARD CONDITIONS

$Q_c = \text{CAPACITY FACTOR} \times \text{STD. COOLING CAPACITY}$

EXAMPLE

Given design conditions:

Heat medium input temperature	205°F
Cooling water inlet temperature	85°F
Chilled water outlet temperature	46.4°F
Absorption chiller model	WFC-20

1. ACTUAL COOLING CAPACITY AVAILABLE

Referring to the curves for models WFC-10 — WFC-50,

CAPACITY FACTOR = 1.33

$$Q_c = 1.33 \times 238.1 = 316.7 \text{ MBH (28.4 tons)}$$

2. CALCULATE HEAT INPUT

$$Q_g = \frac{Q_c}{COP} = \frac{316.7}{0.73} = 433.8 \text{ MBH}$$

3. CALCULATE HEAT REJECTED TO COOLING TOWER

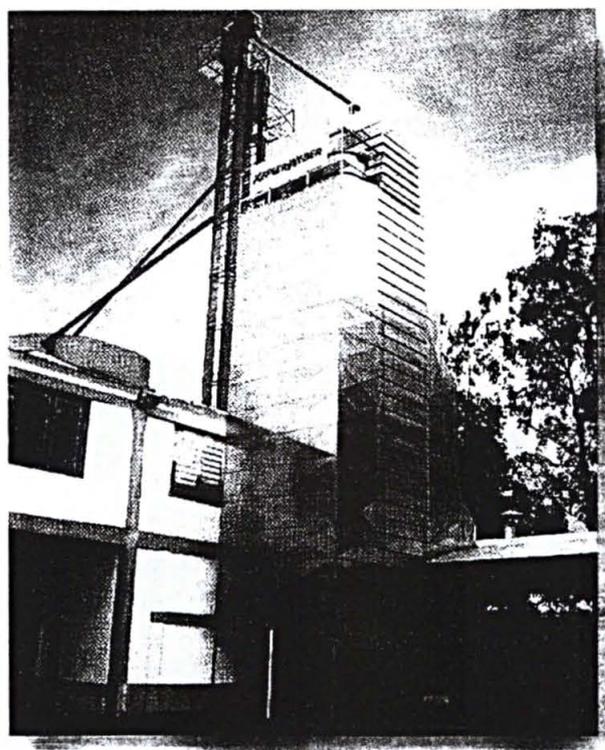
$$Q_c = Q_g + Q_c = 433.8 + 316.7 = 750.5 \text{ MBH}$$

ANEXO 4 – PREMISSAS DE CUSTOS ECONÔMICOS PARA PC25TMC

As seguintes considerações foram efetuadas para a análise termoeconômica da célula de combustível PC25TMC, considerando a estrutura física da figura 16:

- Investimento na célula de combustível de US\$ 1.000.000,00;
- Investimento na Bomba 1 de US\$ 105,82;
- Investimento na Válvula V4 de US\$ 42,32;
- Investimento no Reservatório de US\$ 105,82;
- Investimento na Válvula V1 US\$ 42,32;
- Investimento na Bomba B3 de US\$ 105,82;
- Investimento na Válvula V2 de US\$ 42,32;
- Investimento na Bomba B2 de US\$ 42,32;
- Investimento no Equipamento Frigorífico WFC-10 de US\$ 5.485,63;
- Investimento na Válvula V6 de US\$ 42,32;
- Preço do gás natural de 0,19912 US\$/m³_N;
- Preço médio de energia elétrica de 34,98 US\$/MWh;
- Preço médio da água de alimentação de 0,04 US\$/m³.

**ANEXO 5 – DADOS TÉCNICOS DE SECADORES DE GRÃOS DE SOJA DE
FLUXO CONTÍNUO**



Secador Contínuo de Fluxo Misto

KW 110 R - KW 115 R - KW 125 R

KW 215 R - KW 315 R - KW 325 R e KW 330 R

Secador Contínuo de Fluxo Misto

KW 110R - KW 115R - KW 125R - KW 215R - KW 315R - KW 325R - KW 330R

KEPLERWEBER®

Projetados para processar altas capacidades de soja, trigo, milho, arroz ou cevada, com segurança, economia e respeito ao meio ambiente.

Capacidades

- 10, 20, 30, 40, 60 e 100 toneladas por hora.

Principais Benefícios

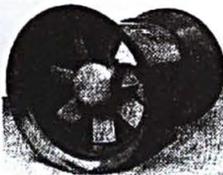
- Exigem menor potência instalada, o que proporciona diminuição de cerca de 33% no consumo de energia elétrica (Kwh).
- Dotados de inédito sistema de circulação de ar, consomem menos lenha ou casca de arroz. Isto concorre para a maior preservação de recursos energéticos naturais, com economia em torno de 18% de combustível.
- Com dutos mais compactos, os secadores KW R necessitam de menor espaço físico para sua instalação, o que permite variadas opções e maior área livre na unidade de armazenagem.
- Os secadores KW R jogam menor quantidade de partículas sólidas no ambiente, sendo esses poluentes depositados na câmara de decantação, de onde são retirados através do sistema de ensaque.
- Difusores galvanizados (fechamento externo) e torre de secagem em chapa preta.



Torre de Secagem



Sistema de Descarga



Ventilador

DISPOSITIVOS QUE ADICIONAM TECNOLOGIA

Torre de Secagem

Constituída de uma câmara de secagem e uma de resfriamento, é montada sobre o sistema de descarga do secador. Formada por dutos dispostos horizontalmente, a câmara de secagem proporciona uma vazão homogênea do ar. Já a câmara de resfriamento, também formada por dutos, é atravessada por um fluxo de ar em condições ambientes. Resfriando a massa de grãos, este fluxo de ar absorve o ar quente do cereal e é então incorporado ao ar quente que vem da fomalha, sendo em seguida conduzido à câmara de secagem. Este processo de circulação e reaproveitamento de ar resulta em considerável economia de combustível e energia. A secagem em coluna se viabiliza mediante a transformação da coluna de resfriamento em câmara de secagem, pela alteração de registros internos no secador. Após passarem pela câmara de resfriamento, os grãos apresentam, na descarga, um diferencial térmico de apenas 5°C a 8°C em relação ao ar ambiente.

Registros de Ar

O sistema exclusivo de ventilação dos secadores KW R possui apenas um conjunto de registros, localizado na fomalha. Para auxiliar na operação dos registros, o secador vem dotado de dois termômetros, estrategicamente localizados e que indicam ao operador a temperatura do ar gerado pela fomalha.

Descarga

Podem ser operadas por dois diferentes sistemas:

Descarga Mecânica - Composta de um conjunto de eclusas rotativas, tem funcionamento intermitente regulável. Localizadas sob os vãos, entre os dutos da fila inferior, as eclusas são acionadas por um motorreductor. Os tempos de funcionamento e paralisação do motorreductor e eclusas são controlados e regulados no quadro de comando, através de temporizador.

Descarga Pneumática - É constituída de um conjunto de bandejas. Um cilindro acionado pneumaticamente determina o movimento das bandejas. Estas abrem totalmente a passagem para o cereal por alguns segundos e depois, por um tempo maior, mantêm a passagem fechada. Estes tempos são controlados por um temporizador.

Obs.: A Descarga Pneumática não se aplica ao secador KW 110R, KW 325R e KW 330R.

Sistema Eletrônico de Controle

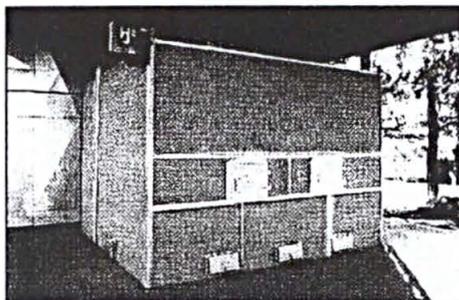
Um avançado aparelho eletrônico executa o controle automático da descarga do secador, proporcionando grande economia de combustível-energia, melhor aproveitamento da capacidade de secagem e mais adequado controle do secador, contribuindo ainda para prevenir incêndios. O painel de controle eletrônico apresenta dados e programações visuais, que são complementados por sistemas de alarme visual ou sonoro, ou ainda pelos dois alarmes simultaneamente.

Ventiladores

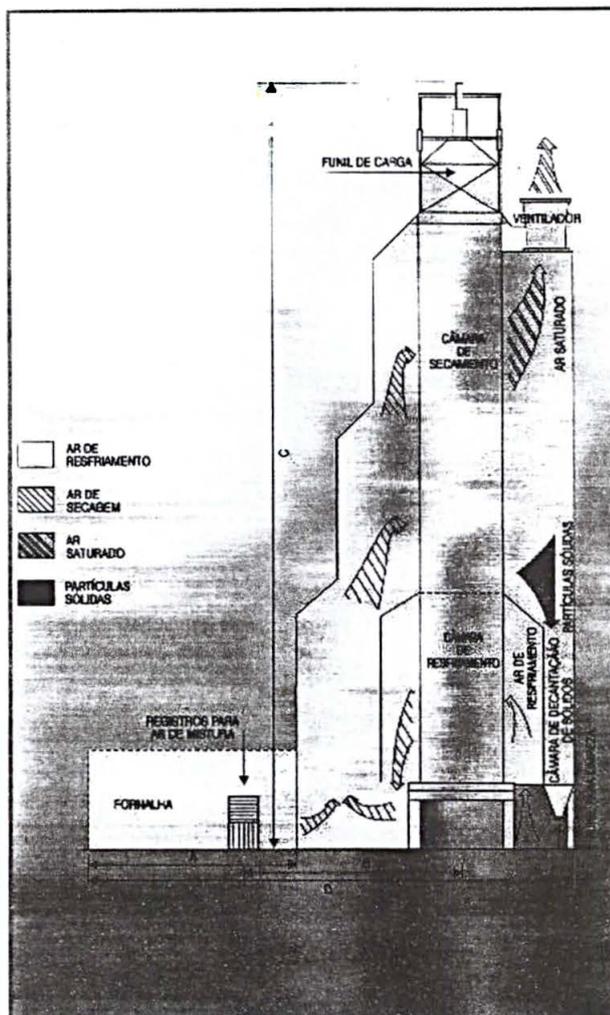
Os secadores KW R vêm equipados com ventiladores axiais de construção leve, que permitem uma maior vazão do ar, com menor potência de acionamento. Por serem leves, os ventiladores encontram-se localizados na parte superior dos secadores, por isso reduzindo a poluição sonora e possibilitando, também, o funcionamento dos difusores como câmaras de precipitação.

Fornalha

Alimentadas com lenha ou casca de arroz, as fornalhas permitem a queima completa destes combustíveis, com a liberação no ambiente apenas de gases isentos de fagulhas e alcatrão.



Fornalha



Dados Técnicos

Modelo	Capacidade Nominal Produto Soja		Condições de Secagem			Potência								Dimensões (mm)			
	Unidade do Grão BU Redução 18% a 13%		Temperatura (°C)	U.R. (%)	Pressão Atmosférica (mm Hg)	Descarga								A	B	C	D
	t/h	Secos/h				Exaustor		Mecânica (eclusas)		Pneumática (bandejas)		Caracol					
			(CV)	(KW)	(CV)	(KW)	(CV)	(KW)	(CV)	(KW)							
KW 110 R	10	167	100	60	760	1x10	1x7,5	1,5	1,1	-	-	-	-	4905	3900	9187	10665
KW 115 R	20	333	100	60	760	1x15	1x11	1,5	1,1	1,0	0,37	4,0	3,0	5290	3900	12328	11050
KW 125 R	30	500	100	60	760	1x25	1x19	1,5	1,1	1,0	0,37	4,0	3,0	6370	4860	15688	12970
KW 215 R	40	667	100	60	760	2x15	2x11	1,5	1,1	1,0	0,37	4,0	3,0	6230	4740	18628	12760
KW 315 R	60	1000	100	60	760	3x15	3x11	1,5	1,1	2,0	0,75	7,5	5,5	7200	4900	19048	13800
KW 325 R	80	1334	100	60	760	3x25	3x19	1,5	1,1	2,0	0,75	10,0	7,5	8590	6780	23248	17710
KW 330 R	100	1667	100	60	760	3x30	3x22	1,5	1,1	2,0	0,75	10,0	7,5	8680	6862	27868	17800

Os dados constantes na tabela são informativos e as fotos, vinhetas e plantas meramente ilustrativas. O fabricante reserva-se o direito de efetuar alterações sem prévio aviso.

ANEXO 6 – DADOS TÉCNICOS DE MICROTURBINAS – CAPSTONE CP-330



Capstone MicroTurbine™

MODEL 330
High Pressure
Gaseous Fuels

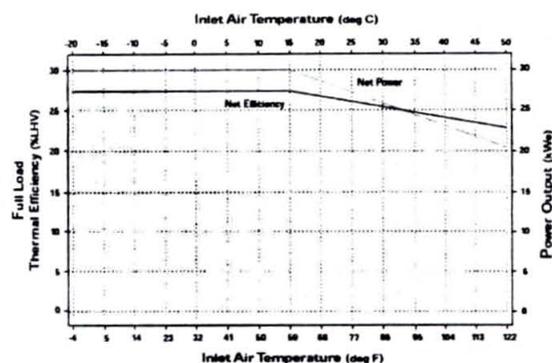
The Product

Features

- 30 kW net (ISO conditions)
- 400-480 VAC, 50/60 Hz
3 phase, 3-wire wye or 4-wire wye,
or corner ground delta, 46A/phase max
- Grid-connect or stand-alone
- Patented air bearings
- Digital power controller
- Air cooled
- Type 3R outdoor enclosure

Benefits

- Ultra-low emissions
- Minimal maintenance
- No liquid lubricants
- No liquid coolants
- Small footprint
- Vibration-free
- Quiet operation
- MultiPac capable
- Optional remote monitoring



Conformance

I.A. Lead (I.A. 2200)
ANSI C84.1
IEEE 519
NFPA 37
NFPA 54
NFPA 70
CAN/CSA-C22.2
No. 100-95



Industrial, walk-in and open packaging options also available.

Performance Specifications Under ISO Conditions (15°C / 59°F @ sea level)

Performance @ 50 or 60Hz	Full-Load Power	Efficiency (LHV)	Heat Rate (LHV)
Natural gas/gaseous propane (52-55 psig)	30 kW net (+/- 1)	27% (+/- 2)	13,300 kJ (12,600 Btu) / kWh

Emissions:

NO_x <9 ppmV @ 15% O₂

Dimensions

H: 1900mm / 74.8"
W: 714mm / 28.1"
D: 1344mm / 52.9"

Intake/Exhaust

Fuel flow (Natural gas/gaseous propane-HHV)	440,000 kJ/hr (420,000 Btu/hr)
Exhaust gas temperature	261°C / 500°F
Total exhaust energy	305,000 kJ/hr (290,000 Btu/hr)

Weight

478 kg / 1052 lb Add 125 kg/280 lb for enclosure option

Typical Sound Level

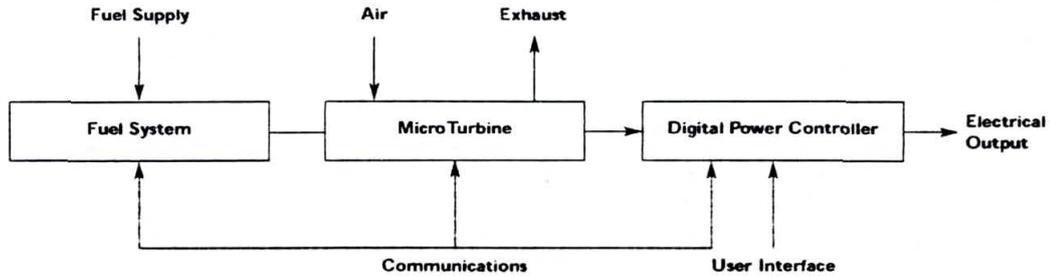
65dBA @ 10 m / 33 ft

All specifications at full-load power. Fuel Heat Content: 26,100 to 93,850 kJ/Nm³ (700 to 2615 Btu/scf) HHV; natural gas, propane, methane, ethane.
Note: The manufacturer reserves the right to change or modify without notice, the design or equipment specifications without incurring any obligation either with respect to equipment previously sold or in the process of construction.

CAPSTONE TURBINE CORPORATION

www.microturbine.com

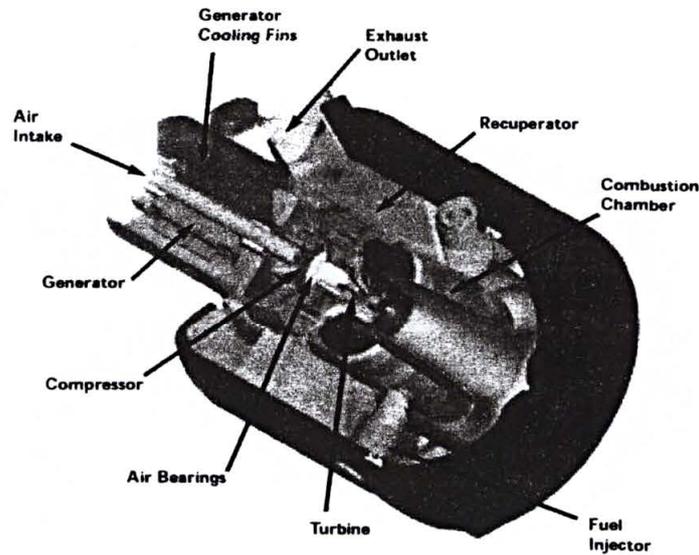
Capstone MicroTurbine™ System



The Capstone MicroTurbine™ system is a compact, low emission, power generator providing electrical power up to 30kW. Solid-state power electronics allow grid-connect operation; stand-alone battery support and automatic grid/stand-alone switching are available options.

The system incorporates a compressor, recuperator, combustor, turbine and permanent magnet generator. The rotating components are mounted on a single shaft, supported by patented air bearings that rotate at up to 96,000 RPM (full load). The generator is cooled by air flow into the gas turbine, thus eliminating the need for liquid cooling. System output is variable frequency (50/60 Hz) AC power. A non-recuperated model is also available.

The Capstone MicroTurbine™ Generator



CAPSTONE TURBINE CORPORATION

21211 Nordhoff Avenue, Chatsworth, CA 91311 Phone: 818-734-5300 Fax: 818-734-5320
www.microturbine.com