

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE EXERGÉTICA, TERMOECONÔMICA E
AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA.
ESTUDO DE CASO: USINA TERMOELÉTRICA UTE - RIO
MADEIRA**

SÍLVIA PALMA ROJAS

ORIENTADOR: ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA PIRES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS**

PUBLICAÇÃO: DM-109

BRASÍLIA, 19 de MARÇO de 2007

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE EXERGÉTICA, TERMOECONÔMICA E AMBIENTAL DE
UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA. ESTUDO DE CASO:
USINA TERMOELÉTRICA UTE - RIO MADEIRA**

SÍLVIA ILENA PALMA ROJAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

**Prof. Armando de Azevedo Caldeira Pires, PhD (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Carlos Gurgel Veras (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Gil Anderi da Silva (PIQ-USP)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 19 DE MARÇO DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

PALMA, SÍLVIA ROJAS

ANÁLISE EXERGÉTICA, TERMOECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA. ESTUDO DE CASO: USINA TERMOELÉTRICA UTE - RIO MADEIRA [Distrito Federal] 2007. (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2007).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Termoeconomia

2. Exergia

3. Exergoeconomia

4. Análise ambiental

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PALMA, SÍLVIA ROJAS (2007). “**ANÁLISE EXERGÉTICA, TERMOECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA. ESTUDO DE CASO: USINA TERMOELÉTRICA UTE - RIO MADEIRA**”. Publicação DM-109, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 176p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Sílvia Ilena Palma Rojas.

TÍTULO: Análise Exergética, Termoeconômica e Ambiental de um Sistema de Geração de Energia. Estudo de Caso: Usina Termoelétrica UTE - Rio Madeira.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida, à Universidade de Brasília, permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias, somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Sílvia Ilena Palma Rojas

DEDICATÓRIA

A meu esposo e família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por ser meu grande e forte pilar. E, a todos os que colaboraram, de alguma maneira, com o desenvolvimento deste trabalho; com especial atenção, à empresa Eletronorte e sua equipe que possibilitaram a elaboração desta dissertação, e a Dona Edir Marques por sua ajuda incondicional.

RESUMO

ANÁLISE EXERGÉTICA, TERMOECONÔMICA E AMBIENTAL DE UMA USINA TERMOELÉTRICA. ESTUDO DE CASO: USINA TERMOELÉTRICA UTE - RIO MADEIRA DA ELETRONORTE

Autor: Sílvia Palma Rojas

Orientador: Armando de Azevedo Caldeira Pires

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, 19 de Março de 2007

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de três análises: uma análise exergética, uma exergoeconômica e outra ambiental baseada no conceito de exergia. Realizou-se uma quarta análise, definida como análise bibliográfica, baseada em exergia e suas respectivas técnicas.

Primeiramente, é desenvolvida uma revisão histórica do surgimento da exergia junto com uma pesquisa bibliográfica do conceito, no mundo. A análise bibliográfica contabiliza o número de publicações apresentadas à comunidade científica desde o ano de 1940 até o ano de 2005. De maneira individual, também, se desenvolve uma análise bibliográfica no Brasil, contabilizando as publicações de teses e dissertações sobre o tema de exergia, desde o ano de 1990 até o ano de 2004.

Este estudo apresenta a base teórica para o entendimento e aplicação de uma análise exergética, termoeconômica e ambiental em sistemas energéticos. Esta teoria é aplicada em uma das unidades da UTE - Rio Madeira, usina que é parte do sistema Acre - Rondônia da Eletronorte, localizada no município de Porto Velho, Estado de Rondônia, Brasil.

A análise exergética apresenta os valores exergéticos dos fluxos do sistema, localiza e quantifica as irreversibilidades e perdas dos componentes, bem como suas eficiências exergéticas. Como se estuda um sistema já existente, a análise termoeconômica quantifica e localiza os custos de cada fluxo do sistema, baseado apenas no custo relativo do combustível - óleo diesel - que entra na unidade, sem tomar em consideração as cargas relativas ao capital de custos. Através da análise ambiental, se apresentam dois indicadores exergéticos de impacto no meio ambiente, úteis para a avaliação e comparação da performance ambiental da unidade em estudo com outras unidades de geração.

Palavras-chave: exergia, exergoeconomia, termoeconomia, impacto ambiental, indicadores exergéticos.

ABSTRACT

EXERGETIC, THERMOECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF A POWER GENERATION PLANT. CASE STUDY: RIO MADEIRA THERMOELETRIC POWER PLANT

Author: Sílvia Palma Rojas

Director of Thesis: Armando de Azevedo Caldeira Pires

Mechanical Engineering Postgraduate Program

Brasilia, March 19th, 2007

This work mainly discusses the theory and application of three analyses based on the concept of exergy. In a chapter 4 called “*Estudo de Caso*” an exergetic and thermoeconomic analysis on a real power generation system are carried out, and an environmental analysis on that system is executed in the chapter 5. This real power generation system is the gas turbine unit LM-6000 GE installed in the Rio Madeira Power Plant, located in Porto Velho, Rondônia, Brazil.

This dissertation also makes a review about exergy through a chronological history, and shows results of a bibliographic analysis on exergy by three graphics, where one of them is related to Brazilian results. This bibliographic analysis quantifies the number of published works all over the world since the decade of 1940 until 2005, and the Brazilian analysis quantifies the number of thesis and dissertations published from 1990 until 2004.

The exergetic analysis shows the exergetic values of every flow, and quantifies and identified the irreversibilities and losses for each component of the system. Since this study is developed on an *existing system*, the exergoeconomic analysis quantifies and identified costs for each flow based on just fuel cost, and the capital cost of all components represents sunk costs, capital cost is ignored for this evaluation.

In the last stage of this work, environmental analysis indicates two important exergetic indexes of environmental impacts. These indexes aid to assess the environmental performance of the studied system and compare it with other power plants performance.

Keywords: exergy, exergoeconomic, thermoeconomic, environmental impact, exergetic indexes

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E EXERGIA	4
1.2 – OBJETIVO DA PESQUISA	5
1.3 - METODOLOGIA DE TRABALHO	6
2 – RETROSPECTIVA HISTÓRICA	8
2.1 - INTRODUÇÃO	8
2.2 - SURGIMENTO DO CONCEITO DE EXERGIA	9
2.3 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA ANÁLISE EXERGÉTICA E SUAS RESPECTIVAS TÉCNICAS	15
2.4 - ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DO CONCEITO DE EXERGIA E SUAS RESPECTIVAS TÉCNICAS	19
2.4.1 - Análise de resultados	20
3 – ASPECTOS CONCEITUAIS	25
3.1 - BASE TEÓRICA DO MÉTODO DE EXERGIA	25
3.1.1 - Componentes da exergia	27
3.1.1.1 – Exergia - componente físico	28
3.1.1.2 - Exergia – componente químico	32
3.2 – BASE TEÓRICA DA ANÁLISE EXERGÉTICA	34
3.2.1 - Representação pictórica do balanço exergético.	40
3.3 - INTRODUÇÃO DO MÉTODO DO CUSTO EXERGÉTICO - ECT	41
3.4 - TEORIA DA ANÁLISE TERMOECONÔMICA - EXERGOECONÔMICA	45
3.4.1 - Análise exergoeconômica para sistemas já existentes	54
4 – ESTUDO DE CASO	58
4.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA	58
4.2 – ANÁLISE EXERGÉTICA	62
4.2.1 - Representação gráfica do balanço exergético	71
4.2.2 – Análise de resultados	72
4.3 - ANÁLISE EXERGOECONÔMICA	77
4.3.1 – Análise de resultados	87

5 - ANÁLISE AMBIENTAL - EXERGIA COMO INDICADOR DE IMPACTO AMBIENTAL	90
5.1 – EXERGIA COMO INDICADOR DE IMPACTO AMBIENTAL	94
5.1.1 – Métodos de análise ambiental	97
5.2 – INDICADORES EXERGÉTICOS	99
5.3 – ESTUDOS DE CASO	102
5.3.1 – Análise comparativa da LM-6000 com cinco plantas de geração de energia	102
5.3.2 – Análise comparativa do sistema LM-6000 para os valores mínimos, médios e máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas	106
5.3.3 – Análise de resultados	108
6 - CONCLUSÕES	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICES	121
APÊNDICE A – BIBLIOGRAFIA MUNDIAL SOBRE O CONCEITO DE EXERGIA E TÉCNICAS RESPECTIVAS, DESDE 1993 ATÉ 2005	122
APÊNDICE B - FOLHAS DE CÁLCULO- ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA, SOFTWARE ENGINEERING SOLVER ENGINEERING (EES)	160
B1 - Análise exergética	161
B2 - Análise exergoeconômica – método Exergetic Cost Theory (ECT)	166
B3 - Análise exergoeconômica – Método Exergoeconômico (ME)	168
ANEXOS	170
Anexos 1 – VALORES DE EXERGIA QUÍMICA PADRÃO DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS	171

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Figura comparativa do número de publicações por década, desde 1940 até o período de tempo de 2000 ao 2005	21
Figura 2.2 - Figura representativa do comportamento do número de publicações, desde o ano de 1993 até o ano de 2005	23
Figura 2.3 - Figura representativa do comportamento do número de teses e dissertações no Brasil, desde o ano de 1990 até 2004	23
Figura 3.1 - Fuels e Produtos encadeados num sistema	36
Figura 3.2 - Representação gráfica Grassmann-Sankey para um sistema simples	41
Figura 3.3 - Exemplo ilustrativo de um balanço de exergia (sem dimensões), representado mediante um diagrama de Pie	41
Figura 4.1 - Sistema Acre-Rondônia da Eletronorte	58
Figura 4.2 - Níveis típicos de operação do sistema turbina a gás LM-6000	61
Figura 4.3 - Diagrama de fluxo do sistema LM-6000 analisado	62
Figura 4.4 - Matriz de incidência Fuel do sistema LM-6000	66
Figura 4.5 - Matriz de incidência Produto do sistema LM-6000	67
Figura 4.6 - Matriz de incidência Resíduo do sistema LM-6000	67
Figura 4.7 - Matriz de incidência da unidade LM-6000	68
Figura 4.8 – Caracterização exérgica do sistema LM-6000, por meio do Diagrama de Grassmann	72
Figura 4.9 – Valores exérgicos para diferentes valores de variáveis termodinâmicas conhecidas, segundo níveis típicos de operação	75
Figura 4.10 – Destruição de exergia dos componentes para diferentes valores de variáveis termodinâmicas conhecidas, segundo os níveis típicos de operação	76
Figura 4.11 - Análise comparativa das eficiências exérgicas dos componentes para diferentes valores de variáveis termodinâmicas conhecidas, segundo os níveis típicos de operação	77
Figura 4.12 - Matriz complementar do sistema LM-6000	79
Figura 4.13 - Exclusividade da matriz de incidência A	79
Figura 5.1 - Incremento das concentrações dos três mais significantes gases de efeito estufa	94
Figura 5.2 - Comparação de exergia aprisionada e exergia livre	95
Figura 5.3 - Representação de como um decréscimo na eficiência exérgica de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a destruição de ordem/ criação de caos	96

Figura 5.4 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a degradação de recursos	96
Figura 5.5 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a emissão da exergia dos resíduos	97
Figura 5.6 - Principais etapas de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	98
Figura 5.7 - Representação esquemática do impacto de um processo de conversão de energia sobre o meio ambiente	100
Figura 5.8 - Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado, com secador de combustível	103
Figura 5.9 – Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado, sem secador de combustível	104
Figura 5.10 - Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	104
Figura 5.11 - Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	104
Figura 5.12 - Balanço exergético de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo	105
Figura 5.13 - Balanço exergético da usina termoelétrica UTE – Rio Madeira, sistema LM-6000	105
Figura 5.14 - Balanço exergético da LM-6000 para os valores mínimos	107
Figura 5.15 - Balanço exergético da LM-6000 para os valores máximos	107
Figura 6.1 – Diagrama de fluxo do sistema LM-6000 com recuperação da exergia resíduo	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Palavra exergia em diferentes línguas	3
Tabela 1.2 - Tabela Comparativa dos Conceitos de Exergia e Energia	5
Tabela 3.1 - Eficiência exergetica de diferentes componentes mecânicos	39
Tabela 3.2 - Custos termoeconômicos, relações termoeconômicas auxiliares e equações de balanço de custos para diferentes componentes mecânicos	49
Tabela 4.1 - Variáveis termodinâmicas conhecidas para a análise exergetica	63
Tabela 4.2 - Equações para o cálculo da exergia química e física específica de cada fluxo	64
Tabela 4.3 – Resultados da análise termodinâmica para o sistema LM-6000	65
Tabela 4.4 - Definição dos Produtos, Fuels e Resíduos de cada subsistema do sistema LM-6000	66
Tabela 4.5 - Diagrama de fluxo e eficiência exergetica de cada componente da LM-6000	70
Tabela 4.6 - Valores dos fluxos exergeticos, destruição de exergia e eficiência de cada componente da unidade LM-6000, para as condições estabelecidas	70
Tabela 4.7. Relação de exergia destruída e exergia resíduo	71
Tabela 4.8 - Valores mínimos, médios e máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas	74
Tabela 4.9 - Variáveis termoeconômicas para a unidade LM-6000	82
Tabela 4.10 - Balanço do custo termoeconômico de cada componente do sistema LM-6000	82
Tabela 4.11 - Custo termoeconômico Fuel e Produto, e custo exergetico unitário Fuel e Produto de cada componente do sistema	86
Tabela 4.12 - Custo termoeconômico, custo exergetico unitário, custo termoeconômico da exergia destruída e relação de custos combustíveis de cada componente, ME - método exergetico	87
Tabela 5.1 - Valores de exergia de entrada, de saída e destruição e perda de exergia para uma comparação da unidade LM-6000 com cinco arranjos de uma planta de cogeração	103
Tabela 5.2 - Valores da eficiência ambiental e da taxa de poluição global para as seis plantas de geração de energia	106
Tabela 5.3 - Valores de exergia de entrada, de saída e destruição e perda de exergia para uma comparação da unidade LM-6000, segundo os valores mínimos, médios e máximos das variáveis termodinâmicas	107
Tabela 5.4. - Valores da eficiência ambiental e da taxa de poluição global para os três valores de variáveis termodinâmicas conhecidas do sistema LM-6000	108

NOMENCLATURA

Símbolos Latinos

- B Exergia [kJ]
- b Exergia específica [kJ/kg]
- B* Custo exergético [kJ]
- c Custo exergoeconômico unitário [R\$/GJ]
- c* Custo termoeconômico unitário [R\$/GJ]
- c^ Custo exergoeconômico unitário para sistemas já existentes [R\$/GJ]
- c^* Custo termoeconômico unitário para sistemas já existentes [R\$/GJ]
- C_p Calor específico a pressão constante [kJ/kg-K]
- C_v Calor específico a volume constante [kJ/kg-K]
- D Destruição de exergia [kJ]
- F Fluxo exergético Fuel [kJ]
- F* Custo exergético Fuel [kJ]
- H Entalpia [kJ]
- h Entalpia específica [kJ/kg]
- I Irreversibilidade [kJ]
- k Relacionado a componente ou subsistema (k-componente/k-subsistema)
- m Massa [kg]
- M Massa molar [kg/kmole]
- n Número de itens
- n Número de moles
- P Fluxo exergético Produto [kJ]
- p Pressão [kPa]
- P* Custo exergético Produto [kJ]

Q	Calor [kJ]
R	Constante de gás perfeito [kJ/kg-K]
r	Diferença de custos
R	Fluxo Resíduo [kJ]
R	Indicador ambiental
R_{pol}	Taxa de poluição global
R_{rec}	Taxa de recurso
S	Entropia [kJ/K]
s	Entropia específica [kJ/kg-K]
T	Temperatura [K]
U	Energia interna [kJ]
u	Energia interna específica [kJ/kg]
V	Volume [m ³]
v	Volume específico [m ³ /kg]
W	Trabalho [kJ]
X	Fração molar [kmole]
y	Taxa de exergia – destruída e resíduo
Y*	Amortização exergética dos componentes [kJ]
Z	Amortização exergoeconômica dos componentes [R\$/seg]

Símbolos Gregos

f	Fator exergoeconômico
δ	Eficiência de malfunção
η	Eficiência exergética
θ	Relação combustível
κ	Consumo exergético unitário

- κ^* Custo exergético unitário
- μ potencial químico [kJ/kmol]
- π Custo termoeconômico [R\$]
- $\hat{\pi}$ Custo termoeconômico para um sistema já existente [R\$]
- φ Relação para combustíveis industriais
- ψ Eficiência racional

Vetores e matrizes

A Matriz de custo de um sistema (mxm)

A, A_F, A_P, A_R Matrizes de incidência, Fuel, Produto e Resíduo (nxm)

B Vetor de valores exergéticos (mx1)

B* Vetor custo exergético (mx1)

c Vetor custo exergoeconômico unitário (mx1)

c* Vetor custo termoeconômico unitário (mx1)

c[^] Vetor custo exergoeconômico unitário, para sistemas já existentes (mx1)

c^{^*} Vetor custo termoeconômico unitário, para sistemas já existentes (mx1)

D Vetor destruição de exergia (nx1)

F Vetor exergético combustível (nx1)

F* Vetor custo exergético Fuel (nx1)

P Vetor exergético Produto (nx1)

P* Vetor custo exergético Produto (nx1)

R Vetor exergético Resíduo (nx1)

Y* Vetor amortização exergética dos componentes (nx1)

Z Vetor amortização exergoeconômica dos componentes (nx1)

α Matriz complementar [(m-n-e)x m]

κ Vetor consumo exergético unitário (mx1)

- κ^* Vetor custo exergetico unitário (mx1)
- π Vetor custo termoeconômico (mx1)
- $\hat{\pi}$ Vetor custo termoeconômico, para sistemas já existentes (mx1)
- ω Valoração econômica dos Fuels externo

Subscritos

- 0 Estado de referência
- 00 Estado morto
- amb Ambiental
 - c Combinado
- CC Câmara de combustão
- D Diagonal
- desat. Desativação
 - e Entrada
- ext Externo
 - f* Física
 - F Relativo ao fluxo Fuel
- ger Geração
- HPC Compressor de alta pressão
- HPT Turbina de alta pressão
 - i,j* relativo a um fluxo
- int Interno
- inv Investimento
 - j* Relativo a uma substância
 - k* Cinética
 - k* Relativo a componente ou subsistemas
- LPC Compressor de baixa pressão

LPT	Turbina de baixa pressão
M	Manutenção
M	Mecânica
m	Relativo a fluxos, forma matricial
n	Relativo a subsistemas, forma matricial
O	Operação
OM	Operação e Manutenção
P	Relativo ao fluxo Produto
pol	Poluição
pot	Potencial
prep	Preparação
q	Química
Q	Relativo a calor
R	Relativo ao fluxo Resíduo
rec	Recurso
rec. nat	Recursos Naturais
rev	Reversível
s	Saída
sat	Saturado
sist	Sistema
T	Térmica
tot	Total
W	Relativo a trabalho

Superescritos

- Quantidade molar

\wedge	Variável de sistema já existente
\cdot	Taxa de variação [unidades/seg]
0	Estado de referência padrão
00	Estado morto padrão
-1	Inversa matricial
tot	Total
ΔP	Componente de pressão
ΔT	Componente térmico

Notações especiais

%	Porcentagem
<	Menor que
>	Maior que
\pm	Mais ou menos que
Σ	Soma
\leq	Menor ou igual que
\geq	Maior ou igual que
d	Variação diferencial
x	Símbolo de multiplicação matricial
LN	Logaritmo natural
Δ	Variação

Abreviaturas

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AECV	Avaliação Exergética de Ciclo de Vida
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Câmara de Combustão
ECT	Exergetic Cost Theory
EES	Engineering Equation Solver
HPC	Compressor de Alta Pressão
HPT	Turbina de Alta Pressão

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCA	Life Cycle Assessment
LPC	Compressor de Baixa Pressão
LPT	Turbina de Baixa Pressão
ME	Método Exergoeconômico
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OPEA	Organização de Países Exportadores de Petróleo
PLT	Primeira Lei da Termodinâmica
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
TFA	Thermoeconomic Functional Analysis
HRSG	Heat Recovery Steam Generator
VCN	Valor Calorífico Neto

1 - INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, muitas das preocupações sociais, econômicas e ambientais estão relacionadas à produção de energia e aos sistemas energéticos, sendo estes o coração de debates sócio-políticos, econômicos e ambientais. Como definem Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004), a introdução de energia disponível “limpa” e barata tem a capacidade de arruinar governos, de trazer prosperidade econômica aos países pobres, de oferecer saneamento básico e melhorar os benefícios de saúde, como, também, reduzir a quantidade de poluentes que entram em nossa atmosfera, em forma de gases de efeito estufa e metais pesados, produzidos pelas atividades antropogênicas. Devido à sua relevância, a comunidade científica e engenheiros têm focado seus esforços em obter novos e melhores métodos de produção de energia e sistemas relacionados.

Como denotam Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004), a palavra certa para a potência adquirida nesses sistemas não é energia; o termo mais preciso seria exergia, que se define como a máxima quantidade de energia útil, que pode ser obtida de um desequilíbrio entre um sistema e o meio de referência estabelecido. O método exergia é a ferramenta que cientistas e engenheiros utilizam para contabilizar as ineficiências e perdas dos sistemas, assim como para dar uma visão dos melhoramentos que poderiam ser efetuados sobre o sistema.

O método de exergia tem suas origens há quase dois séculos, quando o francês Sadi Carnot, apresentou o conceito de trabalho máximo em (1824) e o estadunidense William Gibbs começou a estudar uma propriedade termodinâmica, definida como a energia disponível de um corpo e seu meio (1876). Desde suas origens, e de maneira paralela, nos Estados Unidos como na Europa, diferentes termos foram utilizados para conceituar a exergia. Em 1956, Zaron Rant sugeriu uma palavra que poderia ser usada mundialmente e propôs o nome de exergia no artigo *Exergie, ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit* (Exergia, uma nova palavra para trabalho disponível), apresentando seus fundamentos e a maneira de como ela foi estruturada. Wall (1986) apresenta, na sua tese de doutorado, um trecho original do artigo escrito por Zaron Rant (1956), onde ele explica e justifica a palavra exergia.

[...] Aus diesen Forderungen geht hervor, daß „ie“ die zweckmäßigste Nachsilbe sein wird. Da es sich bei dem untersuchten Begriff um eine Arbeit handelt, muß als Stammsilbe (als *genus proximum*) das griechische Wort *erg* (*on*) hierfür erscheinen. Nun ist noch die richtige Vorsilbe zu wählen, die die spezifische Eigenart, die *differentia specifica*, hervorhebt. Hierfür gilt die Forderung, daß der neue Begriff die Arbeit bezeichnen soll, die aus einem System herausgeholt werden kann. „Aus“ heißt auf Griechisch „ek“ vor Konsonanten bzw. „ex“ vor Vokalen.

Damit lautet der neue Begriff *Exergie*: er erfüllt praktisch alle aufgestellten Forderungen, und der Buchstabe *x* unterscheidet ihn klar vom verwandten Begriff der *Energie*, so daß trotz der Analogie in der Wortbildung jede Verwechslung ausgeschlossen bleibt. Der Ausdruck kann in jede germanische, romanische oder slawische Sprache eingeführt werden, er lautet z.B. auf deutsch *Exergie*, auf english *exergy*, auf französisch *exergie*, auf spanisch *exergia*, auf italienisch *essergia* und auf slawisch *eksergija*. (Wall, G. 1986, pag. 11)

Baseado nesse artigo, Rivero, R. et al. (1990) explicam que Rant sugeriu a palavra *exergia* para ser usada mundialmente, com o argumento de que a palavra deveria ter origem greco-latina e cumprir as seguintes disposições:

1. A palavra deve ser curta para facilitar a derivação de outras palavras. Esta regra é básica para as línguas românicas e eslavas, ao contrário das línguas germânicas (em particular do alemão), em que a possibilidade de gerar novas expressões, com a união de várias palavras, é restrita. Na maioria dos casos, as palavras se modelam com prefixos ou sufixos de uma palavra primitiva de radical único; por isso, não é conveniente gerar palavras com mais de um radical;
2. A palavra deve ser compreensível por si mesma e dar uma idéia clara do conceito que pretende representar. Para lograr isto, a palavra requer, ao menos, três partes: o “*genus proximum*” (gênero próximo), a “*differentia specifica*” (diferença específica) e a terminação. O “*genus proximum*” deve ser uma palavra raiz que mais se aproxime ao conceito. A “*differentia specifica*” deve marcar a diferença entre as palavras que contenham a mesma raiz. E, por último, a terminação é requerida pelas línguas vivas como um elemento pelo qual a palavra pode ser classificada no vocabulário, de forma adequada;
3. A palavra deve fazer parte de um grupo de outras existentes e que estejam estritamente relacionadas entre si. No caso da palavra *exergia*, as magnitudes termodinâmicas seriam: “*entropia*”, “*entalpia*”, “*anergia*”, etc;
4. As palavras devem estar relacionadas etimologicamente com outras que sejam suficientemente distintas entre si, para não se confundirem; e

5. A palavra deve ser agradável ao ouvido.

Rivero, R. et al. (1990) explicam que, segundo as disposições, a raiz, como "*genus proximum*", deve ser a palavra grega "erg", pelo conceito de trabalho. A "*differentia specifica*" deve evidenciar que se trata do trabalho disponível em um sistema, que pode ser libertado ao exterior. Isto se alcança mediante a partícula grega "ek", ao estar antes de uma consoante, ou "ex", ao estar antes de uma vogal, significando, em qualquer caso, "para fora". Finalmente, a terminação adequada à língua portuguesa é "ia", para que a palavra faça parte do grupo ao qual pertence: entalpia, entropia, anergia.

Conseqüentemente, a palavra que se obtém é "exergia", que é curta, compreensível por si mesma e agradável ao ouvido, além de ser constituída pelos três fragmentos requeridos. Ao mesmo tempo, se inclui no grupo de palavras com as quais está mais relacionada, sendo, no entanto, diferente o suficiente para não se confundirem. A palavra pode ser usada nas línguas românicas, germânicas e eslavas. Na tabela (1.1), a palavra exergia é mostrada em diferentes línguas.

Língua	Palavra
Alemão	Exergie
Eslavo	Eksergija
Espanhol	Exergia
Francês	Exergie
Inglês	Exergy
Italiano	Essergia
Polaco	Egzergia
Português	Exergia
Russo	Eksergiva

Tabela 1.1 - Palavra exergia em diferentes línguas

Fonte: *Terminología para la aplicación del método de Exergia* (Rodríguez, R. et al., 1990)

O conceito de exergoeconomia foi proposto por Tsatsaronis, em 1985, como contrapartida à palavra termoeconomia, para especificar a combinação da análise exérgica e econômica. Tsatsaronis (1985a) apontou que a palavra termoeconomia seria ambígua, pois também podia se referir à combinação da análise energética, baseada na Primeira Lei, e a

análise econômica convencional. Por conseguinte, ele propôs usar a palavra termoeconomia de um modo geral, e exergoeconomia, especificamente, para a análise baseada na exergia. A palavra exergoeconomia vem do grego “*ex*” e “*ergo*”, relacionada à extração de trabalho e à economia, formando-se uma palavra adaptável à maioria das línguas vivas.

1.1 - RELAÇÃO ENTRE ENERGIA E EXERGIA

A análise energética é baseada no primeiro princípio da termodinâmica, e tem como objetivo prover a informação necessária para reduzir a perda de calor e melhorar a recuperação de calor. Uma das limitações que esse método contém é a falta de informação disponível sobre a degradação de energia que ocorre no processo, e a quantidade de utilidade ou qualidade de calor, contido nos fluxos que saem do processo como produto, resíduo, aponta Dincer e Cengel (2001).

O método de exergia, como explica Dincer e Cengel (2001), supera as limitações que apresenta a análise baseada na Primeira Lei (da análise energética). Isto porque o conceito de exergia se baseia nas duas primeiras leis da termodinâmica e a análise exérgica pode claramente, indicar a localização da degradação de energia num processo, identificar e calcular a magnitude real das perdas de exergia.

Wall e Gong (2001) - em *On exergy and sustainable development, Part I* - e Dincer e Cengel (2001) - em *Energy, Entropy, Exergy Concepts and their Roles in Thermal Engineering* - fazem, em seus respectivos artigos, uma comparação geral dos conceitos de energia e de exergia, conforme se apresenta na tabela (1.2) a seguir:

Tabela 1.2 - Tabela Comparativa dos Conceitos de Exergia e Energia

Energia	Exergia
Dependente somente de parâmetros dos fluxos de energia e matéria, e independente de parâmetros ambientais.	Dependente dos parâmetros ambientais, dos parâmetros de fluxos de matéria e dos parâmetros de fluxos de energia.
“Nada desaparece”	“Tudo dispersa”
Baseada na PLT	Baseada na PLT (só em processos reversíveis) e na SLT
Energia é sempre conservada, isto é, em balanço; energia nunca pode ser produzida ou consumida.	Exergia sempre é conservada em processos reversíveis e consumida em processos irreversíveis (processos reais), isto é, exergia nunca está em balanço para processos reais.
“Energia é movimento ou capacidade de gerar movimento”	“Exergia é trabalho ou capacidade de produzir trabalho”
$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$	$B = T_0 \cdot \Delta S^{tot}$
Energia tem valor diferente de zero	Exergia é zero quando se encontra em estado de equilíbrio com o meio de referência.
“Tudo é energia”	“Contraste é exergia”
Energia é uma medida de quantidade	Exergia é uma medida de quantidade e de qualidade

1.2 – OBJETIVO DA PESQUISA

Este trabalho é composto por um objetivo geral, e dois objetivos específicos. Como objetivo geral, se tem o estudo do conceito de exergia, mediante a aplicação de uma análise termodinâmica, termoeconômica e ambiental. Baseadas todas no conceito de exergia, e efetuadas sobre a unidade LM-6000, da General Eletric, instalada na usina termoelétrica Rio Madeira, da Eletronorte. As análises exérgica e exergoeconômica são ferramentas úteis para avaliar, de maneira técnica, a performance termodinâmica e econômica de processos. Estes métodos se apresentam, também, como uma ferramenta útil para a otimização do processo e do uso eficiente dos recursos naturais. A análise ambiental apresenta exergia como um

indicador de impacto ao meio ambiente, sendo uma ferramenta útil na procura da otimização do desempenho ambiental de processos energéticos e industriais.

Os objetivos específicos deste trabalho são, primeiramente, a elaboração de uma retrospectiva histórica do conceito de exergia; em seguida, a execução de uma análise bibliográfica do conceito de exergia através da história, baseada nos trabalhos publicados em jornais científicos internacionais e, no Brasil, especificamente, nas teses e dissertações feitas.

1.3 - METODOLOGIA DE TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos, cada um estruturado para o entendimento do método de exergia e suas técnicas.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução do presente trabalho, explicando a base do conceito de exergia e a origem e fundamentação terminológica desta palavra.

O segundo capítulo está composto primeiramente de uma pesquisa histórica, baseada em dados bibliográficos, onde se efetua uma retrospectiva histórica do conceito de exergia e técnicas, apontando, de maneira cronológica, os autores que ajudaram ao desenvolvimento e à implementação do método de exergia e suas técnicas. Dentre os autores que aportaram informação relevante, nesta etapa da pesquisa, destacam-se Tsatsaronis, G. (1993); Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004); Wall, G. (1986) e as biografias desenvolvidas pela Unicamp, obtidas mediante consulta ao respectivo *site* na Internet.

Nesse capítulo, também se apresenta uma pesquisa bibliográfica relacionada com o método de exergia, mostrando as tendências de comportamento do número de trabalhos publicados pela comunidade científica, desde 1940 até o ano de 2005. Esta pesquisa bibliográfica é representada por dois gráficos, um que demonstra o comportamento, ano por ano, e o outro, por décadas. Mediante esses gráficos, podem ser analisadas as tendências de comportamento, segundo a época e a situação mundial. Muitos autores fazem parte desta pesquisa bibliográfica, entre os quais estão Wall, G. (1993) e Cornelissen, R. L. (1994). Estes autores aportam os dados da pesquisa bibliográfica entre os anos de 1940 e 1993. A partir do ano de 1993 até 2005, as informações foram obtidas, em sua maioria, da base de dados da “Elsevier” obtida pelo site www.scirus.com. Por último, o capítulo 2 apresenta a mesma pesquisa bibliográfica, só que relativa ao Brasil, com base nos dados da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, entre 1990 e 2004, cujos resultados também estão representados por gráfico comportamental.

O capítulo 3 apresenta uma pesquisa baseada em dados bibliográficos, onde se definem os aspectos conceituais da palavra exergia e de seus métodos. Os conceitos relativos à exergia são fundamentados nas definições de Kotas (1985). E na definição dos métodos das análises exérgica e exergoeconômica são descritos os métodos de Valero, Muñoz e Lozano (1986) o Exergetic Cost Theory – ECT e de Tsatsaronis e Winhold (1985a) o método exergoeconômico - ME.

No capítulo 4, se desenvolvem as respectivas análises exérgica e exergoeconômica da unidade LM-6000 GE, da usina Rio Madeira. Os cálculos destas análises foram desenvolvidos mediante o software Equation Engineering Solver – EES – versão comercial.

A análise ambiental é desenvolvida no capítulo 5, mediante uma pesquisa baseada em dados bibliográficos, em que se apontam as características que relacionam exergia com impactos ambientais e com desenvolvimento sustentável. Também se apresentam os indicadores exérgicos, que servem de índices comparativos de processos, segundo seu desempenho ambiental. A base teórica desse método é de Makarytchev (1998). Nesse capítulo se realiza ainda uma análise comparativa de seis plantas geradoras de energia, mediante a qual pode-se verificar o desempenho ambiental do sistema LM-6000, com respeito a outros sistemas geradores de energia.

Por último, no capítulo 6, se apresentam as conclusões obtidas do desenvolvimento e dos resultados deste trabalho.

2 – RETROSPECTIVA HISTÓRICA

2.1 - INTRODUÇÃO

Desde 1698, com a invenção da primeira máquina movida a vapor (patenteada em 1705), o ser humano tem estado na constante procura de melhorias na performance das máquinas e tecnologias criadas por ele. Através dessa procura, surgiram as grandes teorias da Ciência, especialmente no século XIX, quando grandes cientistas desenvolveram importantes conceitos, nos quais a ciência moderna está baseada hoje.

Com as evoluções científicas e transformações vivenciadas no século XX, o ser humano foi acrescentando seus objetivos de estudo e pesquisa, e, como consequência, a performance das novas tecnologias começou a ter uma importante relação com o consumo de recursos que faziam essas máquinas funcionarem. Da mesma maneira que os objetivos de estudo do século XIX provocaram o desenvolvimento de importantes teorias e conceitos da ciência, os objetivos do século XX, levaram à criação e ao desenvolvimento de importantes métodos de análises de sistemas energéticos e processos industriais, em busca de seu melhor desempenho e o melhor aproveitamento dos recursos usados nos processos.

O método de exergia se desenvolveu paralelamente na Europa e nos Estados Unidos, em meados do século XX, fundamentado nos conceitos, leis e princípios científicos introduzidos no século anterior. Embora os pilares do método de exergia tenham sido definidos há dois séculos, muitos cientistas e engenheiros o consideraram um método relativamente novo.

A seguir, se apresenta a retrospectiva histórica do surgimento dos conceitos e princípios que abrangem a exergia, apontando os principais autores e obras que contribuíram para o desenvolvimento dos conceitos relativos. A segunda parte desta retrospectiva histórica denota, em ordem cronológica, como aconteceu o surgimento do método de exergia e suas técnicas, quando se deram suas primeiras aplicações, assim como quais foram seus principais autores.

2.2 - SURGIMENTO DO CONCEITO DE EXERGIA

A base do conceito de exergia começa há dois séculos, quando o francês Sadi Carnot introduz a idéia de quantificar o trabalho máximo.

O francês Sadi Carnot (1796-1832), fundador da termodinâmica como disciplina teórica, começou seus estudos termodinâmicos com a intenção de obter máquinas a vapor mais eficientes, assim como as dos ingleses, segundo ele expressa em seu manuscrito *Réflexions* (1824). A obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu - sur les machines propres à développer cette puissance* (Reflexões sobre a força motriz do fogo e sobre as máquinas apropriadas para desenvolver essa força) foi publicada em 1824, tendo sido o único manuscrito de Carnot publicado em vida, aponta Nascimento, K. et al. (2003).

Nesse livro, ele descreve a relação entre calor e trabalho, e explica que todo calorífico (hoje conhecido como calor) de uma máquina térmica se desloca de quente a frio e que algum calorífico (calor) é sempre perdido. Também introduz o novo conceito de um ciclo, e discute a possibilidade de um ciclo reversível.

Outra de suas obras foi *Recherche d'une formule propre à représenter la puissance motrice de la vapeur d'eau* (Pesquisa de uma apropriada fórmula para a representação da força motriz do vapor de água). Nesta publicação, ele tentou expressar matematicamente a força motriz ou trabalho, produzida por um quilograma de vapor. As interpretações das obras de Carnot foram de grande importância na formulação das leis fundamentais da termodinâmica. Nascimento, K. et al. (2003) afirmam que Carnot estava consciente da conservação da energia e do equivalente mecânico do calor, como expressa em sua obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu - sur les machines propres à développer cette puissance*, páginas 19 e 20 da edição original do livro.

A partir de nossas primeiras operações, houve ao mesmo tempo produção de potência motriz e transferência do calorífico do corpo A para o corpo B; por operações inversas, há ao mesmo tempo gasto de potência motriz e retorno do calorífico do corpo B ao corpo A. Mas se tivéssemos agido, em cada caso, com a mesma quantidade de vapor, e se não fosse produzida nenhuma perda de potência motriz nem calorífico, a quantidade de potência motriz produzida no primeiro caso seria igual àquela gasta no segundo, e a quantidade de calorífico passada, no primeiro caso, do corpo A ao corpo B, seria igual à quantidade que passa de volta, no segundo, do corpo B ao corpo A, de modo que poderíamos fazer um número indefinido de operações alternativas desse tipo sem que se tenha, no balanço global, nem potência motriz produzida nem calorífico transferido de um corpo ao outro. (Nascimento, K. et al., 2003, pag. 514).

As publicações de Carnot estiveram na obscuridade por vários anos, até 1834, depois de sua morte, quando Benoit-Pierre-Émile Clapeyron (1799-1864), engenheiro civil francês, publicou uma reformulação analítica de *Réflexions*. A interpretação de Clapeyron contribuiu para que o trabalho de Carnot fosse conhecido pela comunidade científica da época, e deixa ainda mais claro o ponto de vista de Carnot, como apontam Nascimento, K. et al. (2003). Da mesma maneira, Nascimento, K. et al. (2003) inserem em seu artigo parte da interpretação dada por Clapeyron (1834) em *Memoir on the Motive Power of Heat*.

Das passagens anteriores, segue que a quantidade de ação mecânica e a quantidade de calor que passa de um corpo quente para um corpo frio são quantidades da mesma natureza e é possível trocar uma pela outra; do mesmo modo, na mecânica, um corpo que é capaz de cair de uma certa altura e a uma massa movendo-se com uma certa velocidade são quantidades da mesma natureza, que podem ser transformadas uma na outra por meios físicos. (Nascimento, K. et al., 2003, pag. 514)

Benoit-Pierre-Émile Clapeyron teve grande influência no desenvolvimento da termodinâmica, devido ao seu interesse nos fenômenos que se relacionavam com as máquinas a vapor. Fundamentado nos estudos de Carnot, ele introduz o diagrama de pressão-volume para calcular o trabalho, e apresentou, na reformulação analítica de *Réflexions*, uma relação do ciclo de Carnot com o diagrama pressão-volume. Clapeyron também enfatizou a função de Carnot, transpondo o sintético trabalho de Carnot do mundo das máquinas a vapor para o domínio da teoria matemática dos gases. Clapeyron teve o mérito de haver estabelecido e demonstrado, de forma clara e rigorosa, a equação dos gases perfeitos, que se determinou como a equação de Clapeyron. Esta relação permite determinar a variação de entalpia associada à mudança de fase, apenas a partir do conhecimento da pressão, temperatura e volume.

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} = \frac{\Delta h}{T \cdot \Delta v} \quad (2.1)$$

A Primeira Lei da Termodinâmica (PLT) foi desenvolvida pelo cientista alemão Julius Robert Mayer. Conhecida, também, como a lei da conservação da energia, é considerada como uma das conquistas mais importantes da Física, visto que este conceito forma a coluna vertebral da Física moderna (Clerk Bennett, na biografia de Mayer). Mayer baseou a PLT na enunciação da equivalência entre calor e energia mecânica (trabalho), que define que ambas

são formas de energia, princípio demonstrado no seu documento *Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur* (Observações sobre as forças da natureza inanimada), em 1842. Nascimento et al. (2003) apontam que os textos históricos constataam que Mayer pode ser considerado o pai da Primeira Lei da Termodinâmica, e isso pode ser sustentado mediante todos seus documentos sobre a conservação da energia e o enunciado de equivalência. Vários documentos concedem também esse mérito a mais dois cientistas, James Prescott Joule (1818-1889) e a Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Para vários cientistas, Joule ficou com a maior parte do reconhecimento, posto que estabeleceu, de forma mais precisa e explícita, o enunciado da equivalência, dando fundamentação mais rigorosa à PLT.

O físico inglês Prescott Joule foi um importante experimentalista do século XIX, que teve a fama de executor de experiências, envolvendo a transformação de trabalho em calor. E é apontado como o cientista que desenvolveu a teoria cinética do gás (1845), a qual define que o calor é obtido mediante deslocamentos moleculares (Wall, G., 1998, pag. 19).

Entre 1850 e 1851, William Thomson - conhecido como Lord Kelvin - e Rudolf Clausius desenvolveram, de maneira paralela, as premissas e enunciados que formularam a Segunda Lei da Termodinâmica (SLT), com base nos trabalhos de Carnot e Clapeyron.

Rudolf Clausius (1822-1888) foi um pesquisador alemão que contribuiu muito para o desenvolvimento da Física e foi uns dos primeiros cientistas em aceitar que havia duas leis. A maior herança deixada por ele, conforme Alcenir Tarcísio Barbarini (Unicamp), foi indubitavelmente, o conjunto de idéias sobre a irreversibilidade, relacionadas ao conceito de entropia, que conduziram à formulação da Segunda Lei da Termodinâmica. O documento mais famoso de Clausius foi *Über die bewegende Kraft der Wärme* (Sobre a força móvel do calor) publicado em 1850, onde ele pronunciou que suposições da teoria calorífica, expressas nos trabalhos de Carnot, de Clapeyron e de outros cientistas da época, eram falsas, embora o princípio dos trabalhos estivesse correto. E refez o enunciado das duas leis da termodinâmica para substituir as suposições falsas da teoria calorífica, além de dar uma explicação sobre a natureza do calor livre e calor latente.

Clausius, na década de 1850, começou também a dar uma interpretação matemática à “perda calorífica” definida na teoria calorífica, questionando-se a natureza da inerente perda de calor, quando é feito trabalho (W).

Em 1865, ele denominou o conceito de entropia e declarou a Primeira e a Segunda Lei da seguinte forma: “Die Energie der Welt ist constant; die Entropie strebt einen Maximum zu” (“A energia do universo é constante” - “A entropia do universo tende a aumentar”).

Clausius propôs o nome de entropia, baseado na palavra grega “τροπή” (trope) que quer dizer transformação, escolhendo-a, por parecer similar à palavra energia e pela relação entre elas, em suas definições físicas.

Kim (1983) em seu trabalho *Clausius's endeavor to generalize the second law of thermodynamics*, declarou que:

[...]Clausius first stated the basic idea of the second law of thermodynamics. He used it in showing that for a 'Carnot cycle', which transmits heat between two heat reservoirs at different temperatures and at the same time converts heat into work, the maximum work obtained from a given amount of heat depends solely upon the temperatures of the heat reservoirs and not upon the nature of the working substance. (Kim, 1983, pag. 256-273).

Expresso, no português, como:

[...] Clausius primeiro estabeleceu a idéia básica da Segunda Lei da Termodinâmica. E por meio dela, ele demonstrou que, para um ciclo de Carnot - que transmite calor entre dois reservatórios quentes a diferentes temperaturas, e ao mesmo tempo converte calor em trabalho - o trabalho máximo obtido de uma quantidade de calor depende somente da temperatura do reservatório quente e não da natureza do fluido de trabalho.

Barbarini (Unicamp) registra, também que só depois de ter apresentado o documento *Die mechanische Wärmetheorie*, em 1887, Clausius chega a expressar a equação clássica da termodinâmica como se conhece, atualmente:

$$dQ = dU + dW \quad (2.2)$$

Onde dQ é o incremento do calor adicionado, a dU a energia no corpo e dW é o trabalho externo, variáveis definidas por Clausius.

William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907) - originário da Irlanda - além de contribuir com a formulação da Segunda Lei da termodinâmica, como se especificou anteriormente, introduz a escala de temperatura absoluta, conhecida como Kelvin (K). Eric W. Weisstein (2006) expõe, na biografia de William Thomas, que ele sustentou que a chave na

interpretação da Segunda Lei da Termodinâmica foi a explicação dos processos irreversíveis. E apontou que, se a entropia sempre aumenta, o universo poderia eventualmente alcançar um estado de temperatura uniforme e máxima entropia, não sendo possível extrair trabalho algum. Ele chamou esse fenômeno como calor morto do universo. Kelvin e Rankine propuseram uma teoria termodinâmica baseada na primazia do conceito de energia, sobre o qual Kelvin acreditava que toda física deveria ser baseada, e estabeleceu que as duas leis da termodinâmica expressam a capacidade de não destruição e dissipação da energia. No ano de 1848, Thomson propôs a escala de temperatura absoluta baseado em seus estudos da teoria do calor.

Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004) definem que, a partir da década de 1870, começa um período de considerável crescimento no campo da ciência, época em que os destacáveis trabalhos de Willard Gibbs (1961) abrem o caminho para o estudo e desenvolvimento de numerosas áreas da termodinâmica, incluindo os métodos para a realização da análise da Segunda Lei e o cálculo do trabalho disponível.

Com base no trabalho de Clausius, Josiah Willard Gibbs (1839–1903), notável físico-químico estadunidense, contribuiu, enormemente, para o desenvolvimento de estudos teóricos da termodinâmica.

No ano de 1873, ele fez a publicação de sua mais importante obra, chamado *Graphical Methods in the thermodynamics of fluids*, onde explica, magnificamente, sobre quão úteis os métodos gráficos são na termodinâmica, e expressa que a entropia é um dos conceitos essenciais para o estudo de um sistema termodinâmico, tão essencial como energia, temperatura, pressão e volume, desenvolvendo uma relação que contém somente as variáveis de estado do sistema.

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV \quad (2.3)$$

Mediante essa expressão, Gibbs derivou a função matemática de trabalho disponível (exergia), expressa como:

$$B = U + p_0 \cdot V - T_0 \cdot S + \sum_j X_j \cdot \mu_{j,0} \quad (2.4)$$

B =exergia, U = energia intrínseca ou interna, p_0 = pressão do meio de referência, V = volume, T_0 =temperatura do meio de referência, S = entropia, X = fração molar, μ = potencial químico.

No mesmo ano, Gibbs também publicou seu trabalho: *A method of geometrical representation of the thermodynamics properties of substances by means of surfaces*, onde introduz a representação gráfica em três dimensões. Nesse trabalho ele estabeleceu um método para representar a relação entre entropia, energia e volume como uma superfície, e descreveu a superfície da energia dissipada.

Gibbs considera a quantidade máxima de trabalho mecânico que pode ser alcançada por um corpo, sem experimentar transferência de calor ou troca de volume. Denominou essa quantidade de “energia disponível do corpo”, segundo Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004).

Em 1876, publicou a primeira parte de sua mais famosa obra *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances*, onde revelou alguns resultados sobre o potencial químico e os fundamentos teóricos do conceito da exergia, que denomina como “*Available Energy of the body and medium*” (energia disponível do corpo e do meio). Em 1878, publicou a segunda parte desta obra, estendendo os domínios a serem estudados, como problemas de fenômenos químicos, elásticos, eletromagnéticos e eletroquímicos num sistema simples. Gibbs foi o primeiro a expor, matematicamente, a relação entre química, eletricidade, energia térmica e capacidade para trabalho.

Sobre essa obra o próprio Gibbs escreveu:

[...]É uma dedução naturalmente sugerida pelo aumento geral de entropia que acompanha as mudanças ocorridas em qualquer sistema material isolado, que quando a entropia é levada a um máximo valor, o sistema estará em equilíbrio. Embora este princípio tenha tido atenção dos físicos quanto a seu significado, sua importância parece não ter sido devidamente apreciada. Pouco tem sido feito para desenvolver o princípio como um fundamento para a teoria geral de equilíbrio termodinâmico. (Renato Galvão da Silveira Mussi – Unicamp)

Outro importante cientista que contribuiu para a termodinâmica e para o desenvolvimento do conceito de exergia, foi James Maxwell (1831-1879), físico e matemático escocês, que reconheceu, com muito entusiasmo, o trabalho de Gibbs.

Uma das contribuições fundamentais de Maxwell, para o desenvolvimento da termodinâmica, foi ter provido uma base matemática para a teoria cinética dos gases. Em 1870, ele publicou o livro *Theory of Heat*, onde expressou seu ponto de vista sobre as

limitações da Segunda Lei. Maxwell, além de ter trabalhado em várias áreas das ciências, foi reconhecido como o pai do eletromagnetismo.

Segundo as formulações matemáticas e conceituais da Segunda Lei, pode-se destacar que as primeiras contribuições do conceito de exergia foram evidentemente devidas a Clausius, WillianThomson e, principalmente, a J.W. Gibbs e Maxwell.

A partir dos trabalhos apresentados por eles, outros cientistas continuaram a pesquisar sobre o conceito de exergia e a publicar artigos a respeito, como o francês M.J Gouy, que, em 1889, propôs, no artigo *Sur l'énergie utilisable et le potentiel thermodynamique*, o nome de energia utilizável, como a nova função termodinâmica para descrever o fato que somente uma fração de energia térmica pode ser convertida em energia mecânica. Como Gouy, também publicaram trabalhos os engenheiros Aurel Stodola (1898), G.A. Goudenough (1911) e M.G Darrieus (1930).

2.3 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA ANÁLISE EXERGÉTICA E SUAS RESPECTIVAS TÉCNICAS

Em que pesem as grandes contribuições para o desenvolvimento da análise da Segunda Lei prescritas nos trabalhos de Gibbs, Maxwell, Gouy, Darrieus e outros cientistas da época, os avanços sobre esta ferramenta termodinâmica foram limitados e escassos no final do século XIX e começo do século XX, até a década de 1930. De maneira paralela, na Europa como nos Estados Unidos, Joseph H Keenan (1900-1977) - professor e pesquisador do Massachusetts Institute of Technology (MIT) - e Fran Bošnjaković (1902-1993) - professor e pesquisador croata, que trabalhou na Alemanha - começaram a publicar trabalhos referentes ao conceito de exergia. Na Europa, Bošnjaković (1935) marcou o começo do desenvolvimento, com a frase "*Fight the Irreversibilities*". Bošnjaković propôs a aplicação prática do conceito de exergia, que ele denominava "*Technldche Arbeitsfahigkeit*" (Capacidade de trabalho técnico).

O estadunidense Kennan adaptou o conceito de Gibbs de "*Available Energy of the body and medium*", que ele chamou de disponibilidade "*Availability*", a processos de engenharia. Keenan sugeriu usar o conceito de exergia para, apropriadamente, distribuir os custos à eletricidade e ao vapor que se produzia numa planta cogenerativa, apontando que o valor econômico do vapor de água estava na sua exergia e não na energia, aponta Tsatsaronis, G. (1993). Os estudos do professor Kennan contribuíram, de grande maneira, para o desenvolvimento da termoeconomia.

No ano de 1951, o professor Keenan publicou um artigo no *Journal of Applied Physics*, intitulado *Availability and irreversibility in thermodynamics*, onde, segundo Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004), Keenan confiou na Segunda Lei e nos resultados de Gibbs para obter uma expressão de trabalho máximo. Ele desenvolveu expressões para a “*Availability*” de vários tipos de sistemas, para as irreversibilidades quantificáveis e para os coeficientes de rendimento.

Vários estudiosos da área da termodinâmica, da época, deram diferentes nomes a esta função termodinâmica, como: “*trabalho técnico máximo*”, denominado pelo alemão E. Schmidt, em 1953; “*energia não degradada em calor*”; pelo francês Gibert, em 1955; e “*ectalpia*” (rendimento calórico), palavra denominada pelo alemão U. Grigull, em 1945. Já em meados da década de 1950, os especialistas no tema começaram a propor termos com aceitação mundial e, em 1956, o engenheiro esloveno Zaron Rant (1904- 1972) propôs exergia no artigo *Exergie, ein neues Wort für technische Arbeitsfähigkeit* (Exergia, uma nova palavra para trabalho disponível), explicando os fundamentos da palavra e a sua estrutura. Em 1965, H.D. Baehr, pesquisador alemão e colega de Rant, complementou a definição de exergia, expressando que “*Die Exergie ist der unbeschränkt, d.h. in jede andere Energieform umwandelbare Teil der Energie*” (Exergia é a parte da energia totalmente convertível, isto é, essa parte que pode ser convertida em qualquer outra forma de energia).

O termo “*exergia*” foi ganhando, aos poucos, a aceitação mundial que se esperava. Só nos Estados Unidos houve resistência com relação ao uso dessa palavra. Os estudiosos estadunidenses sugeriram outros termos para definir essa propriedade termodinâmica. Os termos mais usados nos Estados Unidos foram essergia (essência da energia) e energia disponível.

A análise termoeconômica surgiu conjuntamente com a evolução da análise exergetica nos processos industriais. Uma das primeiras, ou senão a primeira proposta para a análise de custos baseada em exergia, foi a dada por Keenan. A maioria dos trabalhos de Keenan tinha relação com as propriedades do vapor, com a performance das turbinas a vapor e com os fundamentos da termodinâmica, entre outros temas. Ele é referido como sinônimo das tabelas de vapor, segundo Shapiro (1979), por ter sido autor ou co-autor de sucessivas melhorias nas tabelas de propriedade do vapor, publicadas em 1930, 1936, 1939 e 1969. Keenan também foi co-autor das tabelas das propriedades termodinâmicas do ar e dos gases.

Todo este envolvimento nos problemas e no mundo do vapor foi o que o levou, em 1932, a avaliar o custo de venda de vapor e de eletricidade produzidos em instalações de

cogeração. Logrado (2000) explica, na sua tese, que a prática comum, nessa época, era fazer essa avaliação fundamentada no conteúdo energético do vapor, obtendo um custo para energia elétrica muito inferior aos das instalações que produziam só energia elétrica. Keenan indicou que o valor do vapor e da eletricidade está associado não a seu conteúdo energético, mas à “disponibilidade” desse conteúdo. Embora seus resultados e proposta tenham sido lógicos, sua metodologia não se padronizou.

Em 1949, Benedict & Gyftpaoulos apresentaram, num seminário do MIT, segundo Logrado (2000), um trabalho que mostrava a utilização do conceito de exergia para a quantificação dos custos associados às irreversibilidades numa planta de separação de gases, e como esse processo podia ser utilizado para a otimização de alguns parâmetros da planta. Esse trabalho não foi publicado, na época, aponta Tsatsaronis (1993), mas só trinta anos mais tarde (1980). El-Sayed & Gaggioli apontam, no artigo publicado em 1989, no *Journal Energy Res. Technol.* que, se o trabalho de Benedict & Gyftpaoulos houvesse sido publicado no ano de 1949, poderia ter acelerado o desenvolvimento e uso da termoeconomia à luz da SLT, segundo Logrado (2000).

Tsatsaronis (1993) afirma que, até finais da década de 1950, se começou o desenvolvimento formal das bases da moderna termoeconomia, mediante dois grupos de pesquisas, um formado por Myron Tribus e Robert Evans, pesquisadores da UCLA, e outro grupo, por E.F. Obert e R.A. Gaggioli, pesquisadores da Universidade de Wisconsin.

Tribus e Evans estavam avaliando os processos de dessalinização através da análise exérgica, quando introduziram a palavra de termoeconomia. Eles desenvolveram a idéia de determinar custos aos fluxos exérgicos e formularam um balanço de custos para cada componente de um sistema. Em 1962, eles publicaram, pela primeira vez, o relatório de seu trabalho - *A contribution to the theory of thermoeconomic* - introduzindo a palavra termoeconomia em suas metodologia de cálculo.

Segundo Tsatsaronis (1993), o grupo composto por Obert e Gaggioli, aplicou a contabilidade de custos à seleção de tubos de vapor e seu isolamento.

O desenvolvimento da termoeconomia se deu em estudos de diferentes sistemas. Na Europa, conforme dados do artigo de Tsatsaronis (1993), Bergman e Schmidt determinaram custos à exergia destruída de cada componente de uma planta termoelétrica, num estudo de otimização de aquecedores de alimentação de água. Fratzcher e Klöditz, como aponta Tsatsaronis (1993), se basearam no trabalho de Evans e Tribus e o aplicaram ao projeto de um

trocador de calor regenerativo. Szargut, segundo Tsatsaronis (1993), usou a contabilidade de custos numa planta de cogeração.

A metodologia usada por Evans e Tribus foi formalizada somente em 1970, num trabalho de El-Sayed e Evans, *Thermodynamics of heat Power Systems*, que marcou a introdução de métodos de cálculo de otimização, segundo Tsatsaronis (1993). Desde a formalização deste método em 1970, até agora, tem-se desenvolvido várias metodologias de análise termoeconômica, todas elas com o objetivo comum de determinar os custos baseados na SLT.

Embora existam vários métodos termoeconômicos, se tem claro que existem dois grupos principais: o método de contabilidade de custos, conhecido como Teoria de Custos Exergéticos, ECT - denominada na língua inglesa como Exergetic Cost Theory - que usa os custos médios como uma base para a valoração racional de custos; e o método de otimização - Análise Funcional Termoeconômica, TFA - conhecido na língua inglesa como Thermoeconomic Functional Analysis, que utiliza os custos marginais para minimizar os custos dos produtos de um sistema ou componente.

Valero, Lozano e Muñoz, da Universidade de Zaragoza, desenvolveram, em 1986, a linha de cálculo do método “*Teoria de Custo Exergético*” (ECT), apresentado em três artigos *A General Theory of Exergy Saving I, II, III*, num simpósio da Associação Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME). Valero, Torres e Lozano (1989) explicam que essa teoria foi baseada nos prévios trabalhos desenvolvidos por Tsatsaronis e Winhold (1985a) e Gaggioli e seguidores (1979,1983).

A otimização termoeconômica mais completa, foi a “*Análise Funcional Termoeconômica*” (TFA), que, segundo Valero, Torres e Lozano (1989), foi desenvolvida por vários pesquisadores como Evans, et al (1980), Frangopoulos (1984), Von Spakovsky (1988), Tribus e Al-Sayed (1970), usando como base o trabalho apresentado por Tribus (1965). Este método tenta a otimização de um *design* de uma planta não existente, minimizando uma função objetiva, e utilizando a otimização dos multiplicadores de Langrange para calcular os custos marginais.

Outra das metodologias existentes é o “*método exergoeconômico*” - ME - desenvolvido por Tsatsaronis e Winhold (1985a) e apresentado também no capítulo 8 do livro *Thermal Design and Optimization* que Tsatsaronis publicou em conjunto com Bejan e Moran, em 1996. Por último, também se tem o “*Método Último em Primeiro em Sair*” (Last in first out).

Cada um dos métodos termoeconômicos existentes apresenta diferentes nomenclaturas, símbolos, conceitos e termos, fator que tem pesado negativamente no entendimento e no rápido desenvolvimento da termoeconomia, afirma Tsatsaronis (1993). Entre os símbolos dados ao conceito de exergia estão A , B , E , Ex , Φ , Ψ , Ξ e ε , aponta Tsatsaronis (1993). Valero e seus colegas da Universidade de Zaragoza têm tentado unificar estas teorias termoeconômicas em uma só doutrina, e assim ajudar ao entendimento e facilitar alguns métodos de cálculo, como explicam no artigo *On the unification of thermoeconomics theories* (1989).

Em 1985, George Tsatsaronis propôs o uso da palavra exergoeconomia, em lugar de termoeconomia, para mais clara caracterização da combinação das análises exérgica e econômica. Exergoeconomia é uma combinação das palavras gregas “*ex*” e “*Ergos*” (extração de trabalho) e análise econômica, e, do mesmo modo que a palavra exergia (Z. Rant), exergoeconomia é uma palavra que pode ser traduzida em muitas línguas. Para Tsatsaronis, o vocábulo de termoeconomia pode ter um sentido ambíguo, por isso deve ser usado de forma mais geral, já que pode ser entendido, também, como a combinação de uma análise termodinâmica, baseada na Primeira Lei, com uma análise econômica convencional.

2.4 - ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DO CONCEITO DE EXERGIA E SUAS RESPECTIVAS TÉCNICAS

A análise bibliográfica desenvolvida nesta dissertação foi baseada, em grande parte, no estudo bibliográfico elaborado por Göran Wall, *Bibliography on Exergy*. Wall quantificou as publicações de artigos relacionados com o conceito de exergia, desde a década de 1940 até o ano de 1992, apresentando pouco mais de 2.800 publicações em um período de 52 anos.

Além da base do trabalho do Wall, também se contou com as informações do trabalho bibliográfico de Cornelissen, R.L. (1994), *Bibliography on Exergy Analysis and Related Techniques – 1985-1994*, com especial atenção às informações dos trabalhos publicados em 1993 e 1994. O trabalho de Cornelissen recopila um conjunto de publicações entre os anos de 1985 e 1994, apresentando um total de 760 publicações.

As informações bibliográficas, a partir de 1993 até o ano de 2005, foram recopiladas pela autora e foram obtidas, em sua maioria, mediante as publicações editadas em diferentes jornais internacionais científicos, muitas das quais fazem parte da base de dados de Elsevier Science Publishing Co. As informações bibliográficas recopiladas, desde 1993 até o ano de

2005 (em 13 anos), somam um total de 999 publicações, que são anexadas no apêndice A deste trabalho.

Os resultados desta bibliografia são mostrados mediante duas figuras (2.1) e (2.2), uma contabilizando as publicações por década e outra contabilizando as publicações por ano, desde 1993 até 2005, respectivamente.

De forma separada, se realizou a análise bibliográfica do conceito de exergia no Brasil, apoiando-se principalmente na base de dados de tese e dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes. Obteve-se a informação de 92 trabalhos publicados em um período de tempo de 15 anos, entre os anos de 1990 e 2004. O resultado desta análise é mostrado na figura (2.3).

2.4.1 - Análise de resultados

Na figura (2.1), se apresenta o número de publicações por década, começando com os dados da década de 1940 até os do período de 2000-2005. A figura mostra um comportamento de crescimento exponencial até a década de 1970, atingindo o apogeu na década de 1980, embora com um número de publicações ligeiramente superior ao da década de 1970.

Para a década de 1990, o interesse de estudos relacionados à exergia decaiu notavelmente, apresentando uma queda de 26,6% com relação ao período anterior (1980). Somente no ano de 1993 se apresentou um número de publicações elevado (ver figura (2.2)), e a maioria delas foi apresentada em congressos internacionais. Já para os seis anos do período 2000-2005, o número de publicações aumentou aproximadamente 19% com relação ao número de publicações do período anterior (1990), apresentando 636 trabalhos publicados. Neste último período, o número de publicações teve um ritmo acelerado de crescimento, especialmente, a partir do 2002 (ver figura (2.2)), em que pese não ter atingido o total de trabalhos publicados no período de 1980. O acréscimo obtido, nesses seis anos, representa 90% do total das publicações dos anos 80.

Desde que exergia se define como a máxima quantidade de energia útil que pode ser obtida do desequilíbrio entre um sistema e o meio de referência estabelecido, seu método permite analisar, amplamente, o desperdício dos recursos das atividades de uma sociedade, sendo um importante indicador de impactos ambiental e econômico, o que possibilita melhorar as performances dos processos e tecnologias dos sistemas econômicos.

Os números apresentados na figura (2.1) mostram que existe uma relação direta entre o número de trabalhos sobre exergia, o comportamento energético mundial e as mudanças de paradigmas da sociedade. No início da década de 1970, mais especificamente no ano de 1973, o mundo vivenciou seu primeiro choque energético ou choque de petróleo. Esta crise aconteceu num momento em que o mundo passava por um período de crescimento econômico, tanto para países de terceiro mundo como do primeiro mundo, embora em níveis diferentes. Isto é induzido pelo baixo preço do petróleo, em grande medida proveniente do Oriente Médio. Esta primeira crise foi ocasionada pelo embargo na exportação de petróleo da Organização de Países Exportadores de Petróleo (OPEA), por muitos dos países produtores árabes, em resposta ao apoio do Ocidente a Israel.

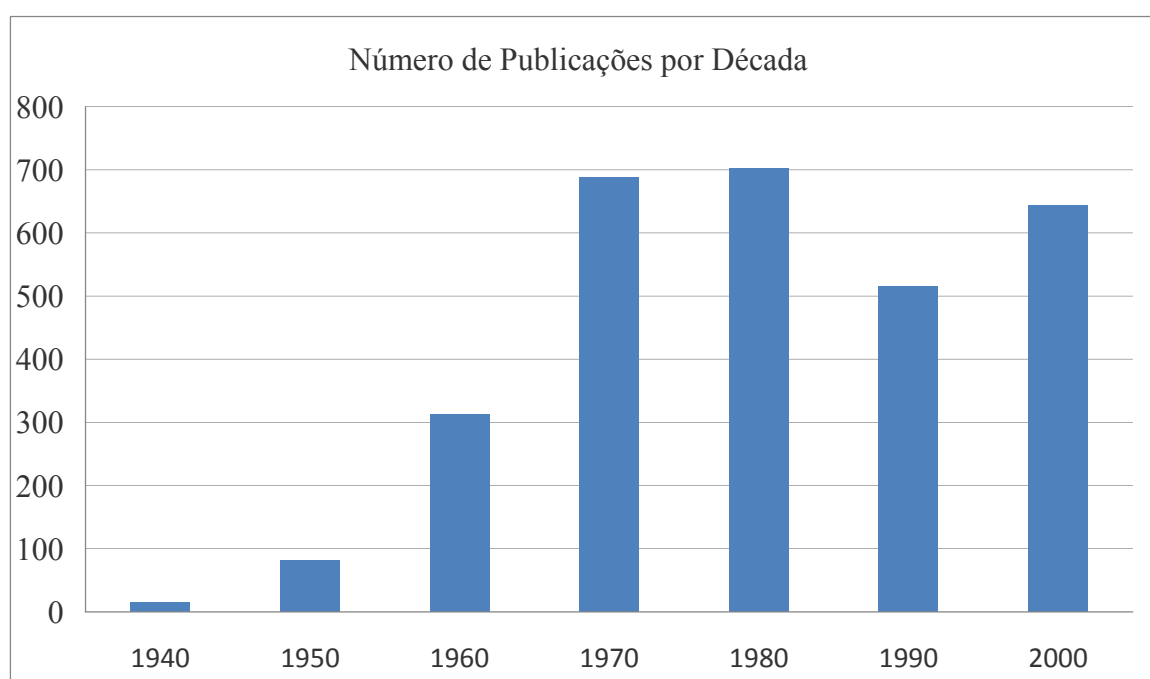


Figura 2.1 - Figura comparativa do número de publicações por década, desde 1940 até o período de tempo de 2000 a 2005

Depois de 1973, o mundo vivenciou mais uma crise de petróleo em 1979, esta devida à revolução iraniana. O profundo impacto no preço do petróleo, na década de 1970, fez com que se iniciasse uma profunda reformulação da trajetória de desenvolvimento tecnológico da sociedade industrial em direção a inovações poupadoras de energia. As organizações político-econômicas da sociedade visaram à necessidade de modificar os métodos de análise energético, decorrente da Primeira Lei, para um método pelo qual fosse possível usar melhor os recursos energéticos e avaliar os impactos ambientais dos processos de uso intensivo de energia. O medo da crise e seu impacto econômico, e as mudanças dos paradigmas sociais,

fizeram com que o círculo científico–tecnológico se interessasse, seriamente, pelo conhecimento e aplicação do método de exergia e, como consequência, o número de publicações sobre a exergia e suas técnicas relativas teve um crescimento pronunciado de aproximadamente 55% no período de 1970 e 1980, com relação ao número de publicações na década de 1960, época em que se vivenciava uma etapa de abundância do petróleo barato.

Na década de 1990, houve a terceira crise de petróleo, ocasionada pela guerra do Golfo, que não provocou o mesmo impacto, mundialmente, como as duas anteriores. Este comportamento se refletiu, diretamente, no número de artigos sobre exergia, publicados nesse período. Embora se reduzissem um pouco, as publicações de trabalhos desenvolvidos sobre exergia e seu método, o tema sempre esteve presente em conferências internacionais e discussões científicas.

O aumento de publicações do período de 2000-2005 foi significativo, a partir do ano de 2002, e ainda mais pronunciado, depois do ano de 2004. Este comportamento reflete novamente, como nos outros períodos, a relação com a situação energética mundial. A nova problemática energética apresentada na atualidade é devida à conscientização dos cientistas e governos, quanto à ameaça de escassez da maior e mais importante fonte energética do mundo, o petróleo, e à conscientização sobre os problemas ambientais gerados pelo estilo de vida do homem e sua tecnologia.

Os artigos, nestes últimos anos têm abrangido, além dos temas relacionados com processos térmicos e químicos, a temas relacionando exergia com outros campos de estudos.

A figura (2.2) representa o comportamento do número de publicações relacionadas à exergia desde 1993 até o 2005, onde se podem denotar os anos com maior número de publicações (1993, 2004 e 2005) e os com menos trabalhos publicados (1994, 1995, 1996).

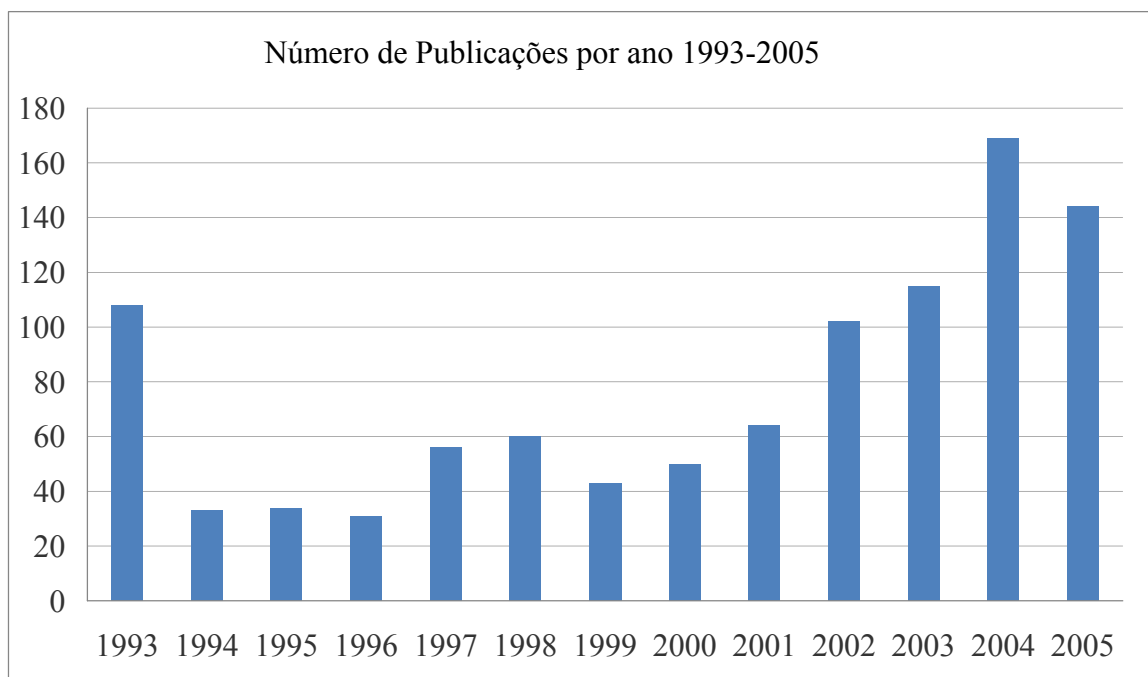


Figura 2.2 - Figura representativa do comportamento do número de publicações, desde o ano de 1993 até o ano de 2005

Na figura (2.3) representam-se os resultados obtidos na análise bibliográfica, referente ao Brasil.

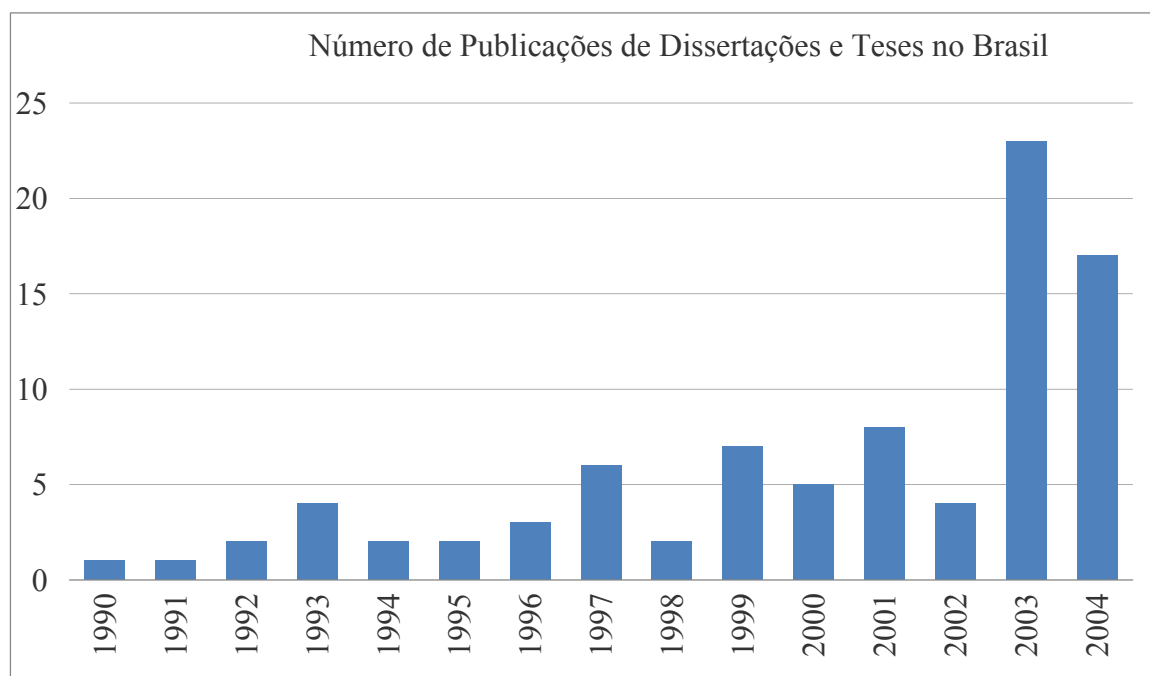


Figura 2.3 - Figura representativa do comportamento do número de teses e dissertações no Brasil, desde o ano de 1990 até 2004

O número de teses relativas ao conceito de exergia e seus métodos elaborados no Brasil foi de 92 trabalhos, entre os anos 1990 e 2004. Na figura (2.3), mostra-se que, na década de 1990 e nos primeiros anos da década de 2000, o interesse pela implementação e estudo do método de exergia era pouco no país, mas, a partir do ano de 2003, essa perspectiva mudou, e o número de trabalhos aumentou significativamente. O ano de 2003 representa o período com o maior número de publicações no Brasil, com um total de 23 teses, seguido pelo ano de 2004, com 17 teses. O número de publicações no mundo, para esta mesma época (1990-2004), foi de 999 trabalhos no total, tendo o Brasil uma participação mundial de 9,7%.

3 – ASPECTOS CONCEITUAIS

3.1 - BASE TEÓRICA DO MÉTODO DE EXERGIA

A energia se manifesta em diferentes formas e cada uma dessas formas tem suas respectivas características e qualidade. Entende-se como qualidade, a capacidade de uma forma de energia para causar mudanças, o que depende da maneira de armazenamento. O armazenamento pode ser ordenado ou desordenado.

As formas de energia ordenada têm uma qualidade invariante e são completamente conversíveis, através de interações de trabalho, a outra forma de energia. Energia potencial e energia cinética são formas de energia ordenadas. Kotas (1985) descreve quatro características de energia ordenada:

1. Conversão de uma forma de energia ordenada em outra forma de energia. Se o processo for reversível, a conversão será completa;
2. Transferência de energia ordenada entre dois sistemas. Manifesta-se, somente, como uma interação de trabalho. O trabalho é uma energia ordenada em trânsito;
3. Transferência reversível de uma energia ordenada. Ocorre sem mudança alguma nas entropias dos sistemas que interatuam e pode ser analisada, somente, com ajuda da Primeira Lei, sem precisar do apoio da SLT;
4. Transferência de energia de alto grau entre dois sistemas. Os parâmetros do meio ambiente não são requeridos para seu cálculo.

Kotas (1985) define que, a qualidade de uma forma de energia desordenada, caracterizada por entropia, é variável e depende da forma de energia e dos parâmetros da energia e do meio de referência.

Entre as formas de energia desordenada estão: a energia interna da matéria, a radiação térmica, a energia química e a energia associada com fluxos turbulentos (forma de energia em trânsito).

Segundo Kotas (1985), para considerar a qualidade variável de diferentes formas de energias desordenadas, precisa-se de um padrão universal de qualidade. O padrão mais natural e conveniente a utilizar é o “*máximo trabalho*” que pode ser obtido de uma forma de energia dada, usando os parâmetros ambientais como estado de referência. Este padrão de

qualidade é conhecido como “*Exergia*”. O pesquisador sueco Göran Wall a define como: “Exergia é trabalho ou capacidade de realizar trabalho” (Wall, 1998, pag. 17).

A exergia é uma propriedade extensiva que pode ser destruída e não é conservada, ao contrário da energia, que não pode ser criada nem destruída, como define a Primeira Lei.

Quando dois sistemas, em diferentes estados, começam a interagir, um trabalho potencial pode ser obtido, até que algum dos sistemas entre em equilíbrio com o outro. Um dos sistemas pode ser chamado estado de referência, meio ambiente ou meio externo e o outro é um sistema qualquer de interesse. O estado de referência é um sistema maior, em estado de perfeito equilíbrio termodinâmico, que não tem gradientes ou diferenças de pressão, temperatura, potencial químico, energia potencial ou cinética. Logo, não é possível produzir trabalho, a partir de alguma forma de interação como, por exemplo, reações químicas, entre as partes do meio externo. Para aplicações reais, o sistema chamado estado de referência, é representado pela atmosfera, pelos mares e oceanos e pela crosta terrestre (Kotas, 1985, pag. 33).

Quando um sistema qualquer entra em equilíbrio com o meio estável de referência, não é possível obter trabalho; este estado é conhecido como estado morto. Neste estado, as condições de equilíbrio mecânico, térmico e químico entre o sistema real e o meio de referência são satisfeitas. Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) definem que também existe um estado morto restrito, onde só as condições de equilíbrio térmico e mecânico podem ser satisfeitas. Quanto maior a magnitude entre os valores das variáveis do fluxo físico e das variáveis do estado de referência, maior será o potencial de trabalho ou valor exergético do fluxo analisado.

Como define Rodriguez, J. M. L. (2005), todo processo real é irreversível. Portanto, se apresenta uma diminuição na quantidade de energia disponível para executar trabalho. Rodriguez também define que essas perdas de disponibilidade ou presença das irreversibilidades internas do processo são o produto de dois fatores, em que:

1. T_0 , temperatura disponível menor para eliminar calor (normalmente temperatura ambiente); e
2. ΔS_T , mudança total de entropia; qualquer processo que se produz espontaneamente, será realizado na direção na que resulta um aumento de entropia.

O teorema de Gouy-Stodola é conhecido também, segundo Rodriguez, J. M. L (2005), como teorema de trabalho perdido. Este teorema estabelece que a destruição de exergia (D) é proporcional ao produto de T_0 e a geração de entropia dentro do sistema.

$$D = W_{perdido} = T_0 \cdot S_{ger} \quad (3.1)$$

Para processos reais, a exergia de entrada de um fluxo é sempre maior que a exergia de saída, sempre e quando não se aplique uma força externa (trabalho) sobre ele, isto é, nesse caso, a exergia de entrada é menor que a exergia de saída. Essa falta de balanço exergético é devida às irreversibilidades presentes dentro do processo.

Tanto a irreversibilidade como a exergia desperdiçada, isto é, resíduos de um processo, representam as perdas exergéticas de um processo. Wall (1998) define que a diferença conceitual destas duas perdas é que as irreversibilidades não têm valor exergético nem efeitos ambientais.

3.1.1 - Componentes da exergia

Na ausência de efeitos nucleares, de magnetismo, de eletricidade e de tensão de superfície, a exergia específica total de um fluxo de matéria pode se dividir em quatro componentes:

$$b_{total} = b_f + b_k + b_{pot} + b_q \quad (3.2)$$

Muitos autores chamam a soma dos três primeiros termos como exergia termomecânica e o último termo é conhecido como exergia química.

Kotas (1985) explica que a energia cinética e potencial de um fluxo são formas de energia ordenada, conseqüentemente são totalmente conversíveis em trabalho. Quando são avaliadas em relação aos dados do meio de referência, essas formas de energia são iguais à exergia cinética b_k e à exergia potencial b_{pot} , respectivamente.

A energia física e a energia química são associadas a baixo grau de energia, ou seja, são formas de energia desordenadas. Os correspondentes componentes de exergia podem ser determinados mediante a avaliação do sistema em estudo e seu sistema de referência.

Quando se assume que a exergia cinética específica e a exergia potencial específica são iguais a zero, considerando um sistema em relativo repouso com o meio de referência, obtém-se a seguinte equação para um volume de controle,

$$b = \frac{(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)}{I} + \frac{\sum_j X_j \cdot (\mu_j - \mu_{(j,0)})}{II} \quad (3.3)$$

A primeira parte da equação, (I) representa o componente físico geral do volume de controle, e a segunda parte da equação (II) representa o componente químico, constituído pelo potencial químico (μ) e a fração molar (X) do fluxo analisado.

3.1.1.1 – Exergia - componente físico

O componente físico da exergia de uma substância ou matéria representa a capacidade de produzir trabalho, mediante o desequilíbrio térmico e mecânico da substância com o meio ambiente. Kotas (1985) define a exergia física como a máxima quantidade de trabalho obtível, quando um fluxo é trazido desde seu estado inicial, cuja temperatura e pressão são definidos por T e p respetivamente, até o estado de referência definido por p_0 e T_0 , mediante processos físicos envolvendo somente, interações térmicas com o meio ambiente.

A exergia física específica de um fluxo é a soma de seu componente térmico – que resulta da diferença de temperatura entre o fluxo e o meio de referência – e componente mecânico – que resulta da diferença de pressão entre o fluxo e o meio de referência.

A exergia térmica não pode ser negativa, embora a exergia mecânica possa obter um valor negativo, quando a pressão do fluxo for menor que a pressão do meio de referência. Para Tsatsaronis (1993), esse valor negativo quer dizer que se deve executar trabalho sobre esse fluxo, para levá-lo ao equilíbrio mecânico com o meio de referência.

$$b_f = b_T + b_M \quad (3.4)$$

A expressão do componente físico pode ser derivada por meio da sua definição em conjunto com uma representação de um componente ideal, onde um fluxo contínuo passa por processos reversíveis. Assumindo que o sistema está em relativo descanso com o meio, ou seja, b_k e b_{pot} são iguais a zero. O fluxo entra no sistema a p e T, e o estado do fluxo de saída corresponde ao estado de referência, T_0 e p_0 . A única interação associada com este processo é a transferência de calor reversível ($q_{reversível}$) para o meio ambiente. (Kotas, 1985, pag.38)

A transferência de calor específica reversível se representa como:

$$(q_0)_{reversível} = T_0 \cdot (s_0 - s) \quad (3.5)$$

Balço energético do sistema:

$$(q_0)_{rev} - (w_s)_{rev} = h_0 - h \quad (3.6)$$

A quantidade de trabalho máximo reversível $(w_s)_{reversível}$, representada na equação (3.6), é a exergia total do fluxo contínuo (b_f) e assim das equações (3.5) e (3.6), obtém-se a expressão da exergia física específica para um volume de controle:

$$b_f = T_0 \cdot (s_0 - s) - (h_0 - h) \quad (3.7)$$

A exergia física específica é comumente representada da seguinte maneira:

$$b_f = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)$$

O componente físico da exergia específica de um gás ideal num volume de controle é representado mediante a combinação de várias equações, tendo como base fundamental a equação (3.7), que representa a exergia física. Para um gás ideal, a variação de entropia pode ser representada integrando a equação de estado de um gás ideal,

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.8)$$

com a expressão $dS = \frac{1}{T} \cdot dU + \frac{P}{T} \cdot dV$, conhecida como equação de Gibbs, e, segundo define Kotas (1985), pode ser usada para calcular a variação de entropia de uma substância compressível de composição invariável. Mediante essa combinação se obtém:

$$s - s_0 = C_p \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (3.9)$$

Como w_{rev} é o máximo trabalho disponível, representado por b_f , e a variação de entalpia é representada por:

$$\Delta h = C_p \cdot (T - T_0)$$

Obtém-se a expressão da exergia física para um gás ideal:

$$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (3.10)$$

Se o fluxo estudado fosse uma mistura de gases ideais, o calor específico da mistura, C_p , poderia ser obtido mediante a equação:

$$C_p = \sum_j X_j \cdot c_{p,j} \cdot \frac{M_j}{m} \quad (3.11)$$

As definições anteriores foram desenvolvidas para fluxos contínuos, chamados também sistema de volume de controle. Essas definições aplicam-se ainda para a exergia em um sistema fechado, tendo em consideração só pequenas modificações, isto é, como num sistema fechado em que só existem duas interações, trabalho e calor. Para fluxos estacionários, a exergia total também pode se dividir em componentes, como mostra a equação (3.4).

Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) derivaram a expressão de exergia física de um sistema fechado (massa de controle), mediante um sistema combinado fechado reversível, onde somente interações de trabalho podem ser desenvolvidas, atravessando a fronteira do sistema combinado. Não existe nenhuma interação de calor para ou desde o sistema combinado. Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) estabelecem que, apesar das variações de volume do sistema fechado e do meio ambiente que poderiam ocorrer, o volume total do sistema combinado permanece constante. Isto porque a fronteira do sistema combinado é localizada de tal forma que isso ocorra, assegurando que o trabalho desenvolvido seja disponível, meramente, para levantar uma massa.

Mediante as características mencionadas do sistema combinado, o balanço de energia se reduz à seguinte equação:

$$\Delta U_c = Q_e - W_c \quad (3.12)$$

$$W_c = -\Delta U_c$$

A variação da energia interna do sistema combinado está composta pela variação da energia interna do sistema fechado e do meio ambiente:

$$\Delta U_c = (U_0 - U) + \Delta U_{meio} \quad (3.13)$$

Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) explicam que, embora a temperatura, a pressão e a composição do meio ambiente sejam variáveis, cujos valores permanecem fixos, a variação da energia interna do meio ambiente está relacionada com a variação da entropia e volume do mesmo:

$$\Delta U_{meio} = T_0 \cdot \Delta S_{meio} - p_0 \cdot \Delta V_{meio} \quad (3.14)$$

A variação do volume do meio ambiente tem magnitude igual e oposta à variação do volume do sistema fechado:

$$\Delta U_{meio} = -(V_0 - V)$$

Como no sistema fechado combinado descrito não existe transferência de calor atravessando a fronteira, o balanço de entropia do sistema combinado se reduz à geração de entropia, isto é, quando o sistema fechado entra em equilíbrio com o meio ambiente.

$$\Delta S_c = S_{ger} = (S_0 - S) + \Delta S_{meio} \quad (3.15)$$

Mediante a combinação destas equações, e considerando a geração de entropia zero para a obtenção do máximo trabalho obtenível, a expressão do componente físico para o sistema fechado combinado se expressa como:

$$B_f = (U - U_0) + p_0 \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (S - S_0) \quad (3.16)$$

Segundo Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), para expressar a exergia física específica estacionária de um gás ideal, se combina a equação (3.16) dividida pela massa (propriedades

específicas) com a equação do estado do gás ideal - $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ - e a relação de gás perfeito, e se obtém:

$$b_f = C_p \cdot T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - LN \left(\frac{T}{T_0} \right) + \frac{k-1}{k} \cdot \left[LN \left(\frac{p}{p_0} \right) + \frac{T}{T_0} \cdot \left(\frac{P_0}{p} - 1 \right) \right] \right) \quad (3.17)$$

onde a relação de calor específico igual:

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

3.1.1.2 - Exergia – componente químico

O componente químico da exergia representa a capacidade de um fluxo de produzir trabalho, devido a seu desequilíbrio químico com o meio ambiente ou estado de referência. Kotas (1985) define a exergia química como a máxima quantidade de trabalho obtível quando a substância em consideração é trazida desde o estado ambiental (T_0 e p_0) ao equilíbrio termodinâmico completo com o meio de referência, mediante processos que envolvem transferência de calor e intercâmbio de substâncias só com o meio ambiente.

Para obter a máxima quantidade de trabalho, os processos deveriam ser reversíveis; e para um processo reversível, o estado inicial é o estado ambiental, definido pelas variáveis T_0 e p_0 , e o estado final é o estado morto, definido por T_0 e a pressão parcial (p_{00}) da substância de referência gasosa, também considerada como componente da atmosfera, explica Kotas (1985).

Segundo as características descritas acima, os estados inicial e final são definidos mediante a mesma temperatura (T_0). Um processo isotérmico reversível pode ser usado para reduzir a substância de T_0 e P_0 a T_0 e P_{00} , de tal forma que o processo satisfaça a condição de reversibilidade, “transferência de calor só com o meio ambiente” (Kotas 1985, pag. 45).

A exergia química molar para um gás ideal é:

$$\bar{b}_q = \bar{R} \cdot T_0 \cdot LN \left(\frac{p_0}{p_{00}} \right) \quad (3.18)$$

Existem valores padrões de exergia química de substâncias inorgânicas que foram já computados e tabulados, baseados num estado padrão definido pelos valores padrões de temperatura e pressão, 25°C e 1 atm, respectivamente.

Para o cálculo da exergia química de misturas de fluxos gasosos, onde se assume, que se comportam como uma mistura de gases ideais, como, por exemplo, combustíveis gasosos e produtos de combustão, entre outros, se aplica a seguinte equação:

$$b_q = \sum_j X_j \cdot \bar{b}_{q,j} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_j X_j \cdot \ln(X_j) \quad (3.19)$$

onde x_j representa a fração molar dos componentes da mistura, e $b_{q,j}$ a exergia química padrão, tabulada.

Na maioria dos processos industriais utiliza-se diferentes substâncias que não são consideradas como substâncias de referência, isto porque não estão representadas nas concentrações do meio de referência. O cálculo de exergia química de substâncias industriais é diferente ao cálculo de substâncias de referência, conforme representado nas equações anteriores. O método de cálculo da exergia química de combustíveis industriais, que se apresenta neste trabalho, foi obtido do livro *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis* de Kotas (1985).

A exergia química de combustíveis gasosos pode ser obtida mediante a equação (3.20), onde a composição química da substância pode ser determinada e os dados termoquímicos para os componentes podem ser calculados:

$$\bar{b}^q = -\Delta\bar{h}^0 + T_0 \cdot \Delta\bar{s}^0 + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \left(v_{O_2} \cdot \ln \frac{P_{O_2}^{00}}{P^0} - \sum_k v_k \cdot \ln \frac{P_k^{00}}{P^0} \right) \quad (3.20)$$

Para combustíveis líquidos e sólidos, a determinação de algumas das propriedades apresentadas na expressão anterior é muito difícil, isto porque estes combustíveis são soluções de numerosos compostos químicos usualmente de natureza desconhecida. Szargut e Styrylska, apud Kotas (1985), assumem que a relação de exergia química com o valor calorífico *neto* (VCN), para combustíveis industriais sólidos e líquidos, é a mesma que para substâncias químicas puras, tendo a mesma relação de componentes químicos. Essa relação é expressa como:

$$\varphi = \frac{b^0}{(VCN)^0} \quad (3.21)$$

Para substâncias orgânicas *dry* - contidas em combustíveis fósseis sólidos compostos de carbono - C, hidrogênio - H, oxigênio - O e nitrogênio - N, com uma relação de massa entre oxigênio e carbono menor que 0.667 ($o/c < 0.667$) - φ é igual a:

$$\varphi_{dry} = 1,0437 + 0,1882 \cdot \frac{h}{c} + 0,0610 \cdot \frac{o}{c} + 0,0404 \cdot \frac{n}{c} \quad (3.22)$$

onde c, h, o e n são as frações de massa de C, H, O e N respectivamente. A precisão é estimada para ser melhor que $\pm 1\%$.

Para combustíveis fósseis sólidos, incluindo madeira, com a relação de massa entre oxigênio e carbono de $2,67 > o/c > 0,667$, φ é igual a:

$$\varphi_{dry} = \frac{1,0438 + 0,1882 \cdot h/c - 0,2509 \cdot (1 + 0,7256 \cdot h/c) + 0,0383 \cdot n/c}{1 - 0,3035 \cdot \frac{o}{c}} \quad (3.23)$$

e a precisão é estimada para ser $\pm 1\%$.

Para combustíveis líquidos, a relação é expressa como:

$$\varphi = 1,0401 + 0,1728 \cdot \frac{h}{c} + 0,0432 \cdot \frac{o}{c} + 0,2169 \cdot \frac{s}{c} \cdot \left(1 - 2,0628 \cdot \frac{h}{c}\right) \quad (3.24)$$

nesta expressão, o efeito do enxofre foi incluído na correlação e a precisão é estimada para ser $\pm 0.38\%$.

3.2 – BASE TEÓRICA DA ANÁLISE EXERGÉTICA

Neste seção, se apresenta a base teórica do método de exergia, baseada no método de Tsatsaronis e Winhold (1985 a) – “*método exergoeconômico*” (ME) e na de Valero, Muñoz e Lozano (1986) – “*Exergetic Cost Theory*”(ECT). Ambas seguem a mesma linha de

contabilidade de custos, somente apresentando diferenças na execução dos cálculos desenvolvidos de forma escalar e matricial, respectivamente.

O método de exergia é uma técnica baseada no conceito de exergia, que visa o uso mais efetivo dos recursos energéticos. Tsatsaronis (1993) aponta que a análise exérgica provê:

1. Uma medida para avaliar a magnitude da energia não aproveitada em relação à energia fornecida ou transformada na planta total e no componente analisado;
2. Uma medida de qualidade da energia, desde o ponto de vista termodinâmico; e
3. Uma variável para definir racionalmente as eficiências para sistemas energéticos.

Mediante a localização, medição e conhecimento das causas das irreversibilidades e perdas exérgicas, pode-se melhorar os novos *designs* de sistemas energéticos e aumentar a eficiência dos sistemas já existentes.

O método de exergia, desenvolvido por Valero e colegas (1986), nos artigos *A General Theory of Exergy Saving I, II, III*, estabelece que qualquer sistema, por mais complexo que seja, com suas fronteiras definidas e com seus subsistemas especificados, pode ser representado por uma matriz de incidência \mathbf{A} (nxm). A matriz relaciona os subsistemas, os fluxos físicos, assim como a direção destes fluxos, e reflete o nível de agregação do sistema analisado. Quando um fluxo está entrando a um m-subsistema, ele é representado pelo dígito 1; quando um m-fluxo está saindo do n-subsistema, ele é representado pelo dígito -1; e se o m-fluxo não tem relação física com o n-subsistema, ele é representado pelo dígito zero.

Quanto maior precisão se deseja nos resultados de uma análise exérgica, menor deve ser o nível de agregação definido. Geralmente, o mínimo nível de agregação é definido como nível de componente.

$$\mathbf{Ax}\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{D}} \quad (3.25)$$

O vetor $\dot{\mathbf{B}}$ contém os valores exérgicos dos fluxos e o vetor $\dot{\mathbf{D}}$ contém os valores de destruição de exergia dos subsistemas.

Para cada subsistema e sistema, existem fluxos físicos que são caracterizados neste trabalho como: fluxos combustíveis (Fuel – F) e fluxos produtos (Produto – P). O Fuel é o insumo ou recurso gasto no processo para gerar o produto desejado. O Produto é o propósito produtivo das unidades do processo. Tanto F como P, são expressos em termos de exergia.

Todos os processos que compõem um sistema estão encadeados; os recursos que se utilizam num processo têm sido produzidos em algum outro processo que, por sua vez, tem consumido recursos que são produtos de processos anteriores.

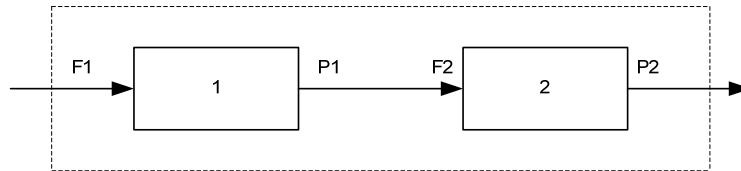


Figura 3.1 - Fuels e Produtos encadeados num sistema
 Fonte: Curso de termoeconomia (Valero e Torres, 2000, pag 6)

A destruição de exergia - expressa também em termos de exergia (MW) - é representada no teorema de Gouy-Stodolo, descrito na equação (3.1), e é equivalente ao seguinte balanço de exergia:

$$\dot{F} - \dot{P} - \dot{D} = 0 \quad (3.26)$$

Nos sistemas reais, existem também os fluxos que não são estritamente energéticos, mas são parte do resultado do processo. Estes fluxos são chamados de Resíduos. Valero e Torres (2000) classificam os produtos Resíduos em três classes, segundo a sua natureza: perdas, resíduos e subprodutos.

As perdas são fluxos que não têm utilidade alguma e são eliminados, sem produzir algum prejuízo ou precisar de mais recursos externos, incluindo investimentos e equipamentos. Os resíduos não têm utilidade, mas a diferença, é que produzem prejuízos, tanto nas instalações como no seu entorno. Para que ditos fluxos sejam eliminados ou convertidos em perdas, é preciso o consumo de recursos energéticos e econômicos. Os subprodutos são considerados muitas vezes inúteis, desde o ponto de vista de sua anterior utilização, e sempre têm um custo não competitivo, já que, de outra forma seria objetivo principal do processo (Produto). Muitas vezes, estes subprodutos podem ser reutilizados, trazendo benefícios ao sistema.

De maneira geral, estes produtos Resíduos se representam com um R sem especificar detalhadamente sua natureza.

$$\dot{F} - \dot{P} - \dot{R} = \dot{D} \quad (3.27)$$

$\dot{F} - \dot{P} - \dot{R} = \dot{D}$ representa os fluxos físicos de cada subsistema em forma vetorial.

Conhecendo os fluxos físicos que interatuam em cada componente ou subsistema, a matriz de incidência definida na equação (3.25) pode ser obtida por:

$$A = A_F - A_P - A_R \quad (3.28)$$

A análise exergética, como definem Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), introduz a eficiência exergética como um parâmetro para avaliar, verdadeiramente, a performance de um componente de um sistema energético ou do sistema completo, de acordo com o enfoque termodinâmico.

A eficiência exergética, conhecida como eficiência da Segunda Lei, mede o grau de perfeição do processo ou sistema energético, mostrando qual porcentagem de exergia do Fuel do k-componente pode ser encontrada na exergia do Produto do mesmo k-componente. Esta variável é importante tanto do ponto de vista termodinâmico quanto econômico e é expressa como:

$$Eficiência (\eta) = \frac{\dot{P}}{\dot{F}} \quad (3.29)$$

A eficiência exergética ajuda a definir o F e o P para o sistema analisado, podendo ser expresso, também como:

$$\eta = 1 - \frac{\dot{D} - \dot{R}}{\dot{F}} \quad (3.30)$$

Valero e colegas apresentam, no seu trabalho, a variável chamada consumo exergético unitário, o qual é o inverso da eficiência exergética, que indica a quantidade de F consumido por unidade de Produto obtido.

$$k = \frac{1}{\eta} = \frac{\dot{F}}{\dot{P}} \quad (3.31)$$

Para todo componente de um sistema, se designa uma eficiência exergética e um consumo exergético unitário e , como determina a Segunda Lei, sempre $\eta \leq 1$, e porém $k \geq 1$, correspondendo a igualdade a processos interna e externamente reversíveis.

No método de análise exergética apresentado por Bejan, Tsatsaronis, Moran (1996), se identificam outras variáveis, além da eficiência exergética e a destruição de exergia, que são muito úteis na avaliação da performance dos componentes de um sistema, no panorama da termodinâmica. Estas variáveis são definidas como a relação da destruição de exergia, $y_{D,k}$ e a relação de exergia resíduo, y_R , ambas expressam a porcentagem de exergia destruída do k-componente na redução de eficiência total do sistema.

$$\eta = 1 - \sum y_D - \sum y_R \quad (3.32)$$

A relação de destruição de exergia pode ser relacionada à exergia total destruída do sistema e à exergia do Fuel ou do Produto do sistema total. A seguir, se apresentam as relações de destruição de exergia, segundo a exergia total destruída, a exergia do Fuel total e a exergia do Produto total no k-componente, respectivamente:

$$y^*_{D,k} = \frac{\dot{D}_k}{\dot{D}_{tot}} \quad (3.33)$$

$$y_{D,k} = \frac{\dot{D}_k}{\dot{F}_{tot}} \quad (3.34)$$

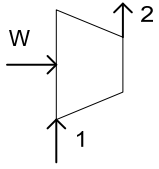
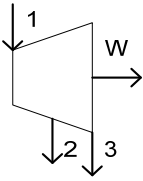
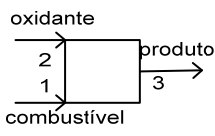
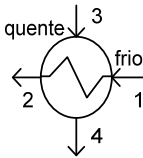
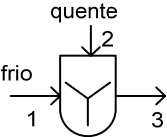
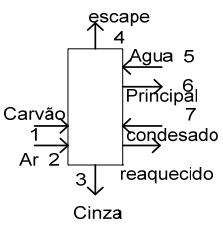
$$y^{**}_{D,k} = \frac{\dot{D}_k}{\dot{P}_{tot}} \quad (3.35)$$

Estas variáveis podem ser usadas para comparações de performance entre vários componentes do mesmo sistema. As duas últimas relações servem, também, para comparar componentes semelhantes de diferentes sistemas, que usam o mesmo combustível ($y_{D,k}$) ou produzem um idêntico produto ($y^{**}_{D,k}$).

A relação de exergia resíduo é obtida mediante a relação da taxa de exergia Resíduo de um k-componente pela taxa total de exergia combustível, fornecido ao sistema completo.

$$y_R = \frac{\dot{R}}{\dot{F}_{tot}} \quad (3.36)$$

Tabela 3.1 - Eficiência exergetica de diferentes componentes mecânicos

Componentes	Representação gráfica	Eficiência exergetica (η)
Compressor		$\frac{\dot{B}_2 - \dot{B}_1}{\dot{W}}$
Turbina		$\frac{\dot{W}}{\dot{B}_1 - \dot{B}_2 - \dot{B}_3}$
Câmara de combustão		$\frac{\dot{B}_3}{\dot{B}_1 + \dot{B}_2}$
Trocador de calor		$\frac{\dot{B}_2 - \dot{B}_1}{\dot{B}_3 - \dot{B}_4}$
Misturador		$\frac{\dot{B}_3}{\dot{B}_1 + \dot{B}_2}$
Caldeira		$\frac{(\dot{B}_6 - \dot{B}_5) + (\dot{B}_8 - \dot{B}_7)}{(\dot{B}_1 + \dot{B}_2) - (\dot{B}_3 + \dot{B}_4)}$

Fonte: Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996)

3.2.1 - Representação pictórica do balanço exerético.

Existem diferentes métodos para representar, graficamente, o balanço exerético obtido de uma análise exerética. Entre os diagramas mais utilizados estão o diagrama de Grassmann, o diagrama de Sankey e o diagrama de Pie. Mediante os diagramas de fluxo exerético, segundo Wall, G. e Gong, M. (1997), podem-se conhecer:

1. As eficiências exeréticas de cada processo do sistema;
2. As diferentes exergias de entrada e saída;
3. A procedência dos fluxos exeréticos e para onde eles vão; e
4. A quantidade de exergia destruída em cada processo.

O diagrama de Grassmann, segundo Kotas (1985), poderia ser considerado como uma adaptação do diagrama de Sankey, usado geralmente para transferência de energia dentro de uma planta. Muitos pesquisadores, como Göran Wall, chamam essa combinação do diagrama de Grassmann e Sankey, como diagrama de Grassmann-Sankey ou diagrama de fluxos exeréticos.

O diagrama de Grassmann é uma ferramenta útil para representar os fluxos exeréticos, as irreversibilidades e os Resíduos de cada subsistema do sistema. Em sistemas mais complexos, explica Kotas (1985), este diagrama pode ser muito valioso, porque ele mostra não só as perdas, mas também as divisões dos fluxos de exergia e a recirculação da exergia, mostrando, ainda, como a parte da exergia original de entrada se dissipa nas sucessivas etapas. Por último, este diagrama é representado por um retângulo que mede a magnitude do fluxo de exergia na entrada e na saída de cada subsistema, assim como do sistema total.

O balanço de exergia de um sistema com multicomponentes pode ser representado também por um diagrama Pie. Este é representado por ângulos, onde um círculo interno de 360° representaria a entrada exerética e as porções angulares de um círculo externo representariam as diferentes irreversibilidades presentes nos componentes, até chegar à porção que representa a saída exerética. Este diagrama não provê informação sobre os fluxos de recirculação de exergia e de divisão de fluxos, como o diagrama de Grassmann-Sankey, mas, segundo Kotas (1985), é mais simples de se construir e as magnitudes relativas podem ser mostradas com maior exatidão.

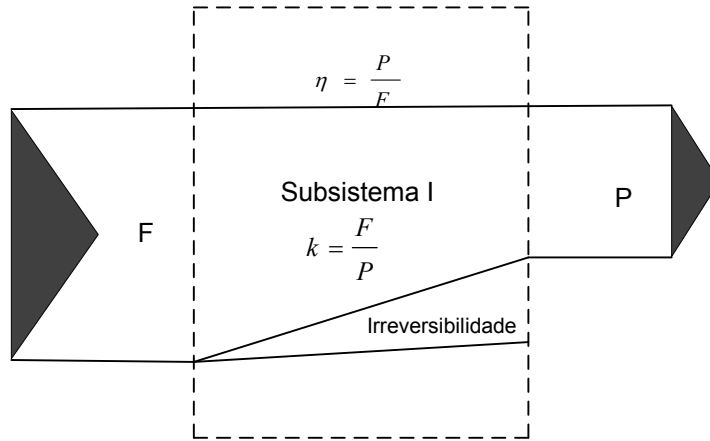


Figura 3.2 - Representação gráfica Grassmann-Sankey para um sistema simples
 Fonte: *Análises Termoeconomico de um Sistema de Cogeneración* (Lozano, Serra e Valero 1993)

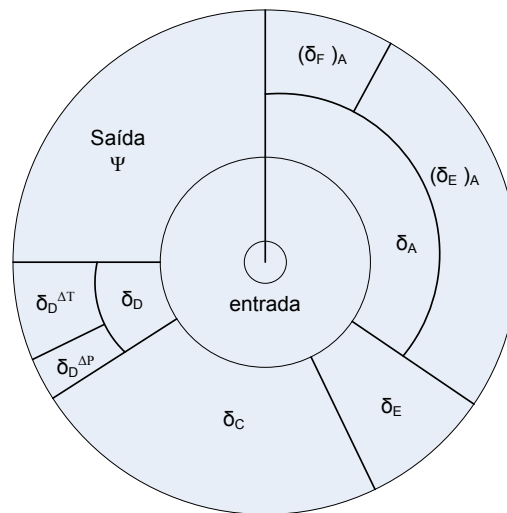


Figura 3.3 - Exemplo ilustrativo de um balanço de exergia (sem dimensões), representado mediante um diagrama de Pie
 Fonte: *The Exergy Method of Thermal Plants Analysis* (Kotas 1985)

3.3 - INTRODUÇÃO DO MÉTODO DO CUSTO EXERGÉTICO - ECT

A exergia é considerada como a mais adequada propriedade termodinâmica para associar com custos, isto porque ela contém informação da Segunda Lei e quantifica a qualidade da energia. A contabilidade exergética é definida por Valero e Torres (2000) como uma técnica numérica que permite quantificar os custos, a partir dos valores exergéticos dos fluxos, F, P e R. Esta metodologia formula um procedimento de determinação de custos, baseado na repercussão dos custos dos recursos de cada componente. O método ECT (Exergetic Cost Theory) apresenta uma nova função termodinâmica chamada custo exergético.

Uma das variáveis importantes nesse método é o custo exerético. O custo exerético de um fluxo físico, se define como a quantidade de recursos externos, quantificados como exergia, necessários para obter um determinado produto por unidade de tempo.

$$\dot{B}^* = \dot{B} + \sum_{\text{processo}} i \quad (3.37)$$

Existe um balanço de custo exerético para cada subsistema definido:

$$\sum_i^e \dot{B}_i^* = \sum_i^s \dot{B}_i^* \quad (3.38)$$

Cada fluxo físico de um subsistema definido se associa a um gasto unitário de recursos. Este é chamado por custo exerético unitário. Valero, Muñoz e Lozano (1986) o definem como a quantidade de exergia gasta pelo sistema para produzir uma unidade de exergia desse m-fluxo.

Cada componente do sistema se associa a dois custos exeréticos unitários, F^* e P^* , ou com três, se algum tipo do fluxo Resíduo estiver presente no processo.

$$k^* = \frac{\dot{B}^*}{\dot{B}} \quad (3.39)$$

$$k^* = \frac{\dot{F}^*}{\dot{F}} \quad (3.40)$$

$$k^* = \frac{\dot{P}^*}{\dot{P}} \quad (3.41)$$

$$k^* = \frac{\dot{R}^*}{\dot{R}} \quad (3.42)$$

Mediante a integração das equações de custo exerético unitário e a equação de balanço de custo exerético, se obtém a seguinte equação de balanço:

$$\sum_i^e k_i^* \cdot \dot{B}_i = \sum_i^s k_i^* \cdot \dot{B}_i \quad (3.43)$$

O custo exergético para os e-fluxos externos, que entram no sistema, isto é, óleo diesel que entra na câmara de combustão, é igual a seu valor exergético, visto que o sistema não teve nenhum custo exergético para produzi-lo,

$$\dot{F}^* = \dot{F} \quad (3.44)$$

pelo conseguinte:

$$k^* = 1$$

Desde que o sistema pode ser definido mediante uma matriz de incidência A , o balanço de custo exergético pode ser representado como:

$$AX\dot{B}^* = 0 \quad (3.45)$$

Como também pode ser expresso por:

$$\bar{A}x\dot{B}^* + \bar{Y}^* = 0 \quad (3.46)$$

Onde,

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} A \\ \alpha \end{pmatrix} \text{ e } \bar{Y}^* = \begin{pmatrix} Y^* \\ -\dot{B}_{ext} \end{pmatrix}.$$

Y^* representa o vetor de amortização exergética e α representa a matriz complementar.

Como explicam Valero, Muñoz e Lozano (1986), o vetor de amortização exergética leva em conta a distribuição por unidade de tempo de produção do custo exergético de cada subsistema, isto é, quantidade de exergia que foi necessária para produzir cada subsistema.

Valero, Muñoz e Lozano (1986) definem que o vetor de amortização exergética não é considerado na maioria das análises de custos e, como resultado, o vetor de custo exergético

obtido é consequência, somente, da destruição de exergia devida às ineficiências de cada processo e não à exergia que foi necessária para produzir cada subsistema.

$$\bar{Y}^* = \begin{pmatrix} 0 \\ -\dot{B}_{ext} \end{pmatrix}$$

A equação de balanço de custo exergético, relacionada à matriz de incidência **A**, provê um conjunto de n equações lineares para solucionar o problema. Sem dúvida, como na maioria dos sistemas reais, o número de fluxos “m” é maior que o número de subsistemas “n”. Para solucionar esta equação matricial, se requer m-n equações adicionais. Estas equações requeridas adicionais formam uma matriz complementar, denotada como α , cujo tamanho seria $[(m - n) \times m]$, e um vetor ω , cujo tamanho seria $[(m - n) \times 1]$.

Como num sistema se tem e-fluxos externos entrando, isto é, combustível que alimenta a câmara de combustão, cujos custos exergéticos são conhecidos, $\omega_i \equiv B_i$, onde “i=1 a e”. Tomando em conta esses e-fluxos externos as equações requeridas adicionais seriam $(m - n - e)$.

Com a definição da matriz complementar, o sistema adquire uma forma quadrada, conformada por m equações lineares e m incógnitas.

A construção da matriz complementar α de cada sistema está fundamentada em cinco proposições formuladas por Valero, Lozano e Muñoz (1986), em sua teoria de contabilidade de custos:

Proposição 1FP: define que a exergia de qualquer Fuel ou Produto é, usualmente, positiva, e o custo exergético é uma propriedade conservativa, permitindo estabelecer tantas equações de balanço de custo exergético quanto os subsistemas que compõem a instalação.

$$\sum_i \dot{B}_i^* = 0$$

$$\dot{F} > 0; \dot{P} > 0$$

Proposição 2F: Em condições normais, num subsistema genérico, cada Fuel tem um custo exergético unitário maior ou igual a um, e igual a cada fluxo que o compõe, isto é, se o Fuel estivesse composto pelos fluxos i e j, $F(i-j)$, sendo $i > j$

$$k_F^* = k_i^* = k_j^*$$

$$k_P^* > k_F^*$$

Proposição 2P: Em ausências de avaliação externa, todo produto de um mesmo componente tem o mesmo custo exergético unitário. Em condições normais, todo custo exergético unitário é igual ou maior que um.

$$k_P^* = k_{P,I}^* = k_{P,II}^*$$

$$k_P^* \geq 1$$

Proposição 1R: Na ausência de qualquer avaliação externa, os fluxos de Resíduos ou perdas, como os gases de exaustão, tem um custo exergético nulo.

$$k_R^* = 0$$

$$\dot{R}^* = 0$$

Proposição 5: Na ausência de valoração externa, o custo exergético dos fluxos externos que entram na planta é igual a sua exergia.

$$\dot{F}_{ext}^* = \dot{F}_{ext}$$

3.4 - TEORIA DA ANÁLISE TERMOCONÔMICA - EXERGOCONÔMICA

A base teórica da análise termoeconômica, apresentada neste trabalho, é uma apresentação de dois métodos: o de Tsatsaronis e Winhold (1985a) que desenvolveram um método de cálculo escalar, baseado nas equações de balanço de cada componente, e o de Valero, Lozano e Muñoz (1986) que desenvolveram um método rigoroso e sistemático para a determinação do custo dos fluxos, isto com cálculos matriciais.

A termoeconomia é um ramo da engenharia que estabelece uma relação entre os conceitos e variáveis da termodinâmica e da economia, que provê informação não disponível em análises energéticas e avaliações econômicas convencionais. As considerações termodinâmicas da termoeconomia podem ser baseadas tanto na PLT como na SLT. A análise baseada na Primeira Lei é característica, porque considera a quantidade energética do fluxo

para obter os resultados, enquanto a baseada na Segunda Lei considera a qualidade energética do fluxo, conhecida como exergia, para seus cálculos.

Neste trabalho se utilizará a palavra exergoeconomia para especificar a parte da termoeconomia baseada no segundo princípio da termodinâmica, como tem definido Tsatsaronis em seus trabalhos.

A exergia é considerada como a única base racional para determinar custos das ações recíprocas que um sistema térmico experimenta com seu meio externo e das fontes de irreversibilidades internas do sistema. Em uma análise exergoeconômica, se quantificam os custos a partir dos valores exergéticos dos fluxos F, P. Esta metodologia formula um procedimento de determinação de custos, baseado na repercussão dos custos dos recursos de cada componente.

Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) apresentam quatro objetivos de uma análise termoeconômica:

1. Calcular individualmente os custos de cada um dos produtos gerados por um sistema;
2. Entender o processo de formação de custos e o fluxo de custos no sistema;
3. Otimizar variáveis específicas em um só componente; e
4. Otimizar o sistema completo.

A análise econômica fornece à exergoeconomia os valores monetários associados com os custos de investimento, manutenção, operação e combustível. Esses valores monetários, com exclusão do custo relacionado ao combustível, são conhecidos como capital de custos, que é representado como a soma do custo de investimento (\dot{Z}_{inv}) e o custo de operação e manutenção ($\dot{Z}_{O,M}$). O custo de capital (\dot{Z}_k) de cada componente varia - dependendo do objetivo da análise exergoeconômica - de zero a seu valor máximo, $0 \leq \dot{Z}_k \leq \dot{Z}_{inv,k} + \dot{Z}_{OM,k}$, isto é, para sistemas já existentes o custo de capital de investimento de cada componente é igual a zero, e o efeito dos custos de operação e manutenção dependerão do julgamento do encarregado da análise.

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_{inv,k} + \dot{Z}_{OM,k} \quad (3.47)$$

Quando o objetivo da análise exergoeconômica inclui o cálculo do custo do Produto ou a comparação de alternativas técnicas para um novo sistema ou componente, são considerados os dois componentes do capital de custos.

Os custos numa planta variam ano a ano. Quando se analisa uma planta, numa panorâmica de custos, deve-se usar uma aproximação de nivelção de custos (cost levelization approach). No enfoque econômico da exergoeconomia, os custos de investimento e operação de cada k-componente de uma planta devem ser calculados para cada ano de vida útil da planta, isto com a ajuda de presunções econômicas. A aproximação de nivelção de custos utiliza a aritmética do valor presente para converter uma série de transações a uma anuidade equivalente (Tsatsaronis e Winhold 1985a).¹

O balanço de custo para um sistema completo pode ser expresso como:

$$\dot{\pi}_{(P,tot)} = \dot{\pi}_{(F,tot)} + \dot{Z} \quad (3.48)$$

A taxa do custo termoeconômico para obter o produto P, $\dot{\pi}_{P,tot}$ é igual à taxa do custo termoeconômico do combustível, $\dot{\pi}_{(F,tot)}$, usado para produzir o Produto mais a taxa de capital de custo, \dot{Z} . A taxa do custo termoeconômico de um fluxo físico é a quantidade de unidades monetárias por unidade de segundo requeridas para produzir esse fluxo. Por exemplo, no Brasil, as unidades da taxa do custo termoeconômico seriam R\$/seg.

Para um volume de controle, existe um número de transferências exérgicas entrando e saindo do sistema, assim como destruições de exérgia causadas pelas irreversibilidades internas do sistema. As taxas do custo termoeconômico dos fluxos exérgicos de entrada e saída, de trabalho e transferência de calor são representados como:

$$\dot{\pi}_s = c_i \cdot \dot{B}_i = c_i \cdot (\dot{m}_i \cdot b_i) \quad (3.49)$$

$$\dot{\pi}_e = c_e \cdot \dot{B}_e = c_e \cdot (\dot{m}_e \cdot b_e) \quad (3.50)$$

$$\dot{\pi}_Q = c_Q \cdot \dot{B}_Q \quad (3.51)$$

$$\dot{\pi}_W = c_W \cdot \dot{B}_W \quad (3.52)$$

¹ Se recomenda o capítulo 7 do livro de Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996)

As variáveis c_s , c_e , c_W e c_Q são definidas como os custos exergoeconômicos unitários dos respectivos fluxos físicos; e o custo exergoeconômico unitário é definido como o custo, em unidades monetárias, por GJ de cada unidade de fluxo, como, por exemplo, R\$/GJ.

Combinando os conceitos de custo termoeconômico e custo exergoeconômico unitário, se obtém:

$$\dot{\pi}_P = c_P \cdot \dot{P} \quad (3.53)$$

$$\dot{\pi}_F = c_F \cdot \dot{F} \quad (3.54)$$

O método de custo exergético formula o balanço de custos de maneira individual para cada k-componente do sistema. O balanço de custos do k-componente é definido mediante a soma de todos os fluxos exergéticos que saem igual à soma de todos os fluxos exergéticos que entram, mais as taxas de cargas apropriadas ao capital de custos do k-componente:

$$\sum_s \dot{\pi}_{s,k} + \dot{\pi}_{W,k} = \dot{\pi}_{Q,k} + \sum_e \dot{\pi}_{e,k} + \dot{Z}_k \quad (3.55)$$

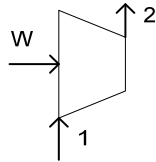
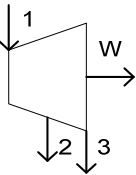
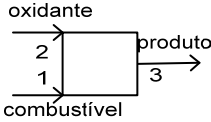
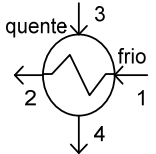
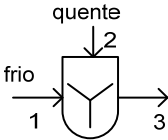
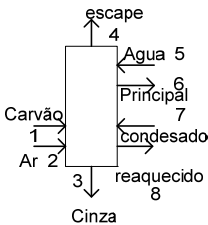
Quando um k-componente recebe trabalho, isto é, um compressor ou uma bomba, o termo de custo termoeconômico do W, $\dot{\pi}_{W,k}$, do k-componente se deslocaria até o lado direito da expressão com signo positivo. Igualmente a expressão de custo termoeconômico de uma transferência de calor $\pi_{Q,k}$ apareceria com signo positivo ao lado esquerdo da expressão, se a transferência de calor ocorresse desde o k-componente.

Combinando a equação (3.55) com as equações (3.49)-(3.52), se obtém:

$$\sum_s (c_s \cdot \dot{B}_s)_k + c_{W,k} \cdot \dot{W}_k = c_Q \cdot \dot{B}_{Q,k} + \sum_e (c_e \cdot \dot{B}_e)_k + \dot{Z}_k \quad (3.56)$$

Os custos exergoeconômicos unitários dos fluxos de entrada podem se assumir como variáveis conhecidas, supondo que já foram calculados no balanço de custo do k-componente que antecede o componente estudado, onde os fluxos de saída do k-componente é o fluxo de entrada do componente analisado. Ficam como incógnitas só as variáveis de custos exergoeconômicos unitários dos fluxos de saída do componente analisado.

Tabela 3.2 - Custos termoeconômicos, relações termoeconômicas auxiliares e equações de balanço de custos para diferentes componentes mecânicos

Componentes	Representação gráfica	Custo termoeconômico de produto	custo termoeconômico de combustível	Relações termodinâmicas auxiliares
Compressor		$\dot{\pi}_2 - \dot{\pi}_1$	$\dot{\pi}_W$	-
Turbina		$\dot{\pi}_W$	$\dot{\pi}_1 - \dot{\pi}_2 - \dot{\pi}_3$	$c_2=c_3=c_1$
Câmara de combustão		$\dot{\pi}_3$	$\dot{\pi}_2 + \dot{\pi}_1$	-
Trocador de calor		$\dot{\pi}_2 - \dot{\pi}_1$	$\dot{\pi}_3 - \dot{\pi}_4$	$c_4=c_3$
Misturador		$\dot{\pi}_3$	$\dot{\pi}_2 + \dot{\pi}_1$	-
Caldeira		$(\dot{\pi}_6 - \dot{\pi}_5) + (\dot{\pi}_8 - \dot{\pi}_7)$	$(\dot{\pi}_1 + \dot{\pi}_2) - (\dot{\pi}_3 + \dot{\pi}_4)$	$\frac{\dot{\pi}_6 - \dot{\pi}_5}{\dot{B}_6 - \dot{B}_5} = \frac{\dot{\pi}_8 - \dot{\pi}_7}{\dot{B}_8 - \dot{B}_7}$

Fonte: *Thermal Design and optimization* (Bejan, Tsatsaronis e Moran 1996)

Na tabela (3.2) representam-se os custos termoeconômicos, relações termoeconômicas auxiliares e equações de balanço de custos para diferentes componentes mecânicos. Na última coluna da tabela, encontram-se as relações termodinâmicas auxiliares.

Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) definem os princípios aplicados para a formulação das relações auxiliares, que são:

1. Quando a definição de Produto de um componente envolve, somente, um fluxo exergético, o custo exergoeconômico unitário desse fluxo de saída é calculado mediante um balanço de custos. As relações de saída são formuladas para os restantes fluxos exergéticos, que são usados na definição de Fuel, associados ao componente em consideração;
2. Quando o fluxo Produto de um componente envolve m-fluxos exergéticos, m-1 relações auxiliares relacionadas a esses fluxos exergéticos Produto serão formuladas;
3. Quando o fluxo Fuel de um componente envolve uma diferença entre os estados de entrada e de saída de um mesmo fluxo exergético, o custo exergoeconômico unitário desse fluxo permanece constante.

Para todo componente com m fluxos de saída se requerem m-1 relações auxiliares para resolver o balanço de custos. No caso de ter só um fluxo de saída, nenhuma relação auxiliar é requerida.

O método de Valero, Muñoz e Lozano (1986), o ECT, expressa $\boldsymbol{\pi}$ como o vetor de custo termoeconômico dos m fluxos do sistema e pode ser calculado mediante o produto da matriz diagonal \mathbf{c}_D que contém o custo exergoeconômico unitário de cada m-fluxo e o vetor dos valores exergéticos \mathbf{B} dos m-fluxos do sistema.

$$\boldsymbol{\pi} = \mathbf{c}_D \mathbf{X} \mathbf{B} = \mathbf{B}_D \mathbf{X} \mathbf{c} \quad (3.57)$$

Equivalentemente, o custo termoeconômico pode ser representado pelo produto da matriz diagonal \mathbf{B}_D dos valores exergéticos dos m fluxos com o vetor de custos exergoeconômicos unitários dos respectivos fluxos.

O cálculo de custos termoeconômicos, através da matriz de incidência, pode ser como:

$$\bar{\mathbf{A}} \mathbf{x} \boldsymbol{\pi} + \dot{\mathbf{Z}} = 0 \quad (3.58)$$

Onde,

$$\dot{Z} = \frac{\dot{Z}}{(-c_{F,ext} \cdot \dot{F}_{ext})}$$

Deduz-se que o custo termoeconômico é afetado pelo vetor de fluxo de custo de capital \dot{Z} e pelo vetor $c_{F,ext} \cdot \dot{F}_{ext}$, que representa o custo do combustível externo entrando na instalação pela exergia desse combustível.

Quando o custo de capital se assume como zero, permite-se que o preço do combustível externo seja interpretado como um fator econômico de peso, que avalia a unidade de exergia, dependendo da classe de combustível consumido.

$$\dot{Z} = \frac{0}{(-c_{F,ext} \cdot \dot{F}_{ext})}$$

Os custos termoeconômicos Fuel e Produto, de cada componente, se calcula mediante as expressões:

$$\dot{\pi}_F \equiv A_F \chi \dot{\pi} \quad (3.59)$$

$$\dot{\pi}_P \equiv A_P \chi \dot{\pi} \quad (3.60)$$

Dessa maneira,

$$\dot{\pi}_F - \dot{\pi}_P + \dot{Z} = 0 \quad (3.61)$$

O custo termoeconômico, associado ao Resíduo, representa a perda monetária associada aos fluxos exergéticos (massa ou fluxo energético) do sistema, rejeitados ao meio externo. Incluindo esta nova variável ao balanço de custos do k-componente, se obtém:

$$\dot{\pi}_{P,k} = \dot{\pi}_{F,k} - \dot{\pi}_{R,k} + \dot{Z}_k \quad (3.62)$$

Mediante esta equação, pode-se concluir que quanto menor for o custo termoeconômico, associado ao fluxo Resíduo, maior será o custo termoeconômico do Produto do k-componente.

Quando a análise exergoeconômica tem como objetivo entender o processo de formação de custos, avaliar o rendimento de cada componente individual e otimizar variáveis específicas de *design* no k-componente, todos os fluxos exergéticos Resíduos têm um custo que deveria ser calculado, em que a perda monetária é associada ao valor exergético do resíduo do k-componente analisado.

$$\dot{\pi}_{R,k} = c_{F,k} \cdot \dot{R}_k \quad (3.63)$$

Quando o objetivo é calcular os custos dos produtos totais da planta, o método mais fácil é assumir que o custo termoeconômico, associado ao Resíduo, é zero, para todos os fluxos resíduos da planta, sendo este custo transferido, automaticamente, aos produtos finais da planta.

$$\dot{\pi}_R = 0 \quad (3.64)$$

Se a análise exergoeconômica for para otimizar a planta total, se assume que o fluxo exergético Resíduo do k-componente pode ser desconsiderado para reduzir o gasto do capital, $\dot{\pi}_{R,k} = 0$.

O custo termoeconômico, associado à destruição de exergia em cada processo, é também importante nesta análise. É um custo que não se quantifica, diretamente, e que só pode ser revelado mediante a análise exergoeconômica. Através das equações (3.27) e (3.62), e eliminando as variáveis F_k e P_k , respectivamente, se obtém as seguintes expressões:

$$c_{P,k} \cdot \dot{P}_k = c_{F,k} \cdot \dot{P}_k + (c_{F,k} \cdot \dot{R}_k - \dot{\pi}_{R,k}) + \dot{Z}_k + \langle c_{F,k} \cdot \dot{D}_k \rangle \quad (3.65)$$

$$c_{P,k} \cdot \dot{F}_k = c_{F,k} \cdot \dot{F}_k + (c_{P,k} \cdot \dot{R}_k - \dot{\pi}_{R,k}) + \dot{Z}_k + \langle c_{P,k} \cdot \dot{D}_k \rangle \quad (3.66)$$

Quando o custo exergoeconômico unitário do combustível (Fuel) do k-componente é independente da destruição de exergia, se obtém:

$$\dot{\pi}_{D,k} = c_{F,k} \cdot \dot{D}_{D,k} \quad (3.67)$$

Igualmente, se se assumir que o custo exergoeconômico unitário do Produto do k-componente é independente da destruição de exergia, se obtém:

$$\dot{\pi}_{D,k} = c_{P,k} \cdot \dot{D}_{D,k} \quad (3.68)$$

Para instalações reais, estas suposições não são estritamente satisfeitas, mas são aproximações dos valores dos custos exergoeconômicos unitários dos fluxos exergéticos destruídos no k-componente (Bejan, Tsatsaronis e Moran, 1996).

Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) estabelecem que, para sistemas bem projetados, a exergia destruída do k-componente afeta diretamente o capital de investimento do mesmo k-componente, e, só em alguns casos, impacta indiretamente o capital de investimento e o custo do combustível (F) dos outros componentes.

Existem duas variáveis importantes na análise termoeconômica, definidos por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996): a diferença relativa de custo (r_k) e o fator exergoeconômico (f_k). A variável de diferença relativa de custo expressa o aumento relativo no custo médio, por unidade de exergia entre combustível (F) e produto (P) do mesmo componente. Esta variável é útil para avaliar e otimizar um componente do sistema. Por exemplo, ao minimizar o valor desta variável, se está otimizando o custo do k-componente:

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{F,k}}{c_{F,k}} \quad (3.69)$$

A diferença relativa de custos, também, pode ser expressa mediante as fontes reais de custo de cada k-componente:

$$r_k = \frac{c_{F,k} \cdot (\dot{D}_k + \dot{R}_k) + (\dot{Z}_{inv,k} + \dot{Z}_{OM,k})}{c_{F,k} \cdot \dot{B}_{P,k}} \quad (3.70)$$

Mediante a combinação da equação (3.70) e a equação que define a eficiência exérgica para o k-componente, a diferença relativa de custos pode ser expressa por:

$$r_k = \frac{1 - \eta_k}{\eta_k} + \frac{\dot{Z}_{inv,k} + \dot{Z}_{OM,k}}{c_{F,k} \cdot \dot{B}_{P,k}} \quad (3.71)$$

O fator exergoeconômico identifica a maior fonte de custos. Este indica a significância relativa das variáveis de custos relativos não exergéticos, como, por exemplo, capital de investimento e gastos de operação e manutenção e a destruição de exergia e o Resíduo.

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z} + c_{F,k} \cdot (\dot{D}_k + \dot{R}_k)} \quad (3.72)$$

3.4.1 - Análise exergoeconômica para sistemas já existentes

Para sistemas existentes, em que o custo de capital de investimento é zero e o custo de capital de manutenção e operação, também, é considerado zero, o fator exergoeconômico desaparece e a diferença relativa de custos deixa de ser uma variável termoeconômica importante para a análise. Isto porque deixa de prover informação, visto que esta só depende da eficiência exergética de cada k-componente.

A análise exergoeconômica para sistemas existentes, em que o custo de capital é zero, é direcionada da mesma maneira que a análise de avaliação de *designs* de novos sistemas, em que as variáveis de capital de custo participam, ativamente, como fonte real de custo.

$$\dot{Z}_k = 0 \quad (3.73)$$

O balanço de custos do k-componente existente é expresso como:

$$\sum_s \hat{n}_{s,k} + \hat{n}_{W,k} = \hat{n}_{Q,k} + \sum_e \hat{n}_{e,k} \quad (3.74)$$

De maneira equivalente, o balanço de custos de sistemas já existentes pode ser expresso por:

$$\sum_s (\hat{c}_s \cdot \dot{B}_s)_k + \hat{c}_{W,k} \cdot \dot{W}_k = \hat{c}_Q \cdot \dot{B}_{Q,k} + \sum_e (\hat{c}_e \cdot \dot{B}_e)_k \quad (3.75)$$

Na perspectiva do método de Exergy Costing Theory - ECT, o vetor de custo termoeconômico para sistemas já existentes se obtém mediante a equação matricial:

$$\bar{A}x\hat{\pi} + \hat{Z} = 0 \quad (3.76)$$

onde \bar{A} é a matriz de custos (mxm) do sistema; e o vetor de amortização exergoeconômica de cada componente se expressa como:

$$\hat{Z} = \frac{0}{(-c_{F,ext} \cdot \dot{F}_{ext})}$$

Esta equação expressa, de maneira clara, como o custo termoeconômico - quando o capital de custo é zero – depende, unicamente, do preço do combustível externo e sua exergia total.

O custo termoeconômico da taxa de destruição de exergia do componente k, é denotado como:

$$\hat{\pi}_D = \hat{c}_{F,k} \cdot \dot{D}_k \quad (3.77)$$

O custo termoeconômico, devido à destruição de exergia no k-componente, é afetado, também, pelo custo exergoeconômico do combustível no k-componente. Esta expressão indica como o custo exergoeconômico unitário do combustível em cada k-componente torna-se importante, quando a taxa do custo de capital é igual a zero.

O cálculo do custo termoeconômico Fuel e Produto de sistemas já existentes, é obtido mediante as expressões:

$$\hat{\pi}_{F,k} = \hat{c}_{F,k} \cdot \dot{F} \quad (3.78)$$

$$\hat{\pi}_{P,k} = \hat{c}_{P,k} \cdot \dot{P} \quad (3.79)$$

E, de maneira matricial, se obtém o vetor custo termoeconômico Fuel e Produto de cada componente, pelas seguintes equações matriciais:

$$\hat{\pi}_F = A_F \cdot \hat{\pi}$$

$$\hat{\pi}_P = A_P \cdot \hat{\pi}$$

Por meio do custo termoeconômico do combustível (Fuel) e do Produto de cada componente, se obtém o custo exergoeconômico unitário do Fuel e Produto, respectivamente, de cada componente.

$$\hat{c}_F = \dot{F}_D^{-1} x \hat{\pi}_F \quad (3.80)$$

$$\hat{c}_P = \dot{P}_D^{-1} x \hat{\pi}_P \quad (3.81)$$

Esses custos servem para comparar cada componente do sistema e avaliar qual dos componentes afeta a performance termodinâmica do sistema.

A relação combustível ϑ_k justifica as unidades de exergia do combustível externo que deve ser fornecido ao sistema total para prover o k-componente com uma unidade de exergia combustível F.

$$\vartheta_k = \frac{\hat{c}_{F,k}}{\hat{c}_{F,T}} \quad (3.82)$$

Mediante a monitoração do comportamento dessa relação e a comparação dos valores medidos com os valores projetados, se permite a detecção de falhas nos componentes, assim como a identificação da fonte delas.

Na seção (3.3), se definiu o custo exergético B^* , como a exergia requerida num sistema para gerar o fluxo exergético saindo do k-subsistema (P). E o custo exergético unitário k^* , como a quantidade de unidades de exergia gasta pelo sistema, ao produzir uma unidade de exergia do m-fluxo. Estas variáveis ajudam a avaliar, numa perspectiva diferente, os valores do custo termoeconômico e do custo exergoeconômico unitário da análise, num sistema existente.

O método exergoeconômico (ME) calcula o custo exergético, mediante o custo termoeconômico do m-fluxo e o custo exergoeconômico unitário do combustível externo entrando no sistema.

$$\dot{B}^* = \frac{\hat{\pi}}{\hat{c}_{F,ext}} \quad (3.83)$$

O custo exerético unitário é calculado pelo método exergoeconômico (ME), mediante a relação do custo exergoeconômico unitário do m-fluxo e o custo exergoeconômico unitário do combustível externo entrando no sistema.

$$k^* = \frac{\hat{c}}{\hat{c}_{F,ext}} \quad (3.84)$$

Conhecendo os custos exeréticos de cada fluxo participante no sistema, pode-se calcular o custo termoeconômico unitário, que é o custo em unidades monetárias por GJ de cada unidade de exergia gasta para produzir o m-fluxo.

O cálculo do custo termoeconômico unitário, via método de cálculo escalar, é obtido mediante a expressão:

$$\hat{\pi} = \hat{c}^* \cdot \dot{B}^* \quad (3.85)$$

E, o cálculo do vetor custo termoeconômico unitário é obtido por meio da expressão:

$$\hat{\pi} = \hat{c}^* \cdot \dot{B}^* \quad (3.86)$$

4 – ESTUDO DE CASO

4.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O método de exergia e exergoeconomia apresentado no capítulo anterior é aplicado numa das unidades da UTE - Rio Madeira, localizada no sistema Acre-Rondônia, da Eletronorte, em Porto Velho, no estado de Rondônia (ver figura 4.1). Esta cidade está localizada numa área geográfica, cujas variáveis ambientais são: temperatura média – 32°C, pressão atmosférica – 101,28 Kpa e umidade relativa média do ar – 82%. Esta região se encontra a uma altitude de 302 ft (92m) do nível do mar.

A seguir se apresenta um mapa representativo do sistema Acre-Rondônia:



Figura 4.1 - Sistema Acre-Rondônia da Eletronorte

A usina UTE - Rio Madeira está composta por quatro turbinas a gás, três das quais são LM-2500 e uma LM-6000, todas do fabricante General Electric, GE. A pedido da gerência de projetos da Eletronorte, sede em Brasília, as análises aqui mostradas foram desenvolvidas sobre a unidade LM-6000.

A unidade LM-6000 é uma turbina a gás aeroderivativa, que está composta por dois compressores, um de baixa e outro de alta pressão; uma câmara de combustão anular e duas turbinas a gás, uma de baixa e outra de alta pressão. A unidade gera 38 MW, tem uma eficiência térmica de 39,1% e utiliza, como combustível, óleo diesel.

A turbina LM-6000 tem uma entrada máxima de ar de $\dot{m}_{ar} 122,8 \text{ kg/seg}$, e entra na turbina de gás, por entradas variáveis. O fluxo de ar é primeiramente esfriado, mediante um trocador de calor anexo a um sistema chiller, que baixa a temperatura de ar de entrada ao plenum e aumenta a eficiência da unidade. Com uma temperatura de entrada de 15°C , o fluxo de ar entra no compressor de baixa pressão (LPT), com uma relação de pressão de 2,4:1. O fluxo de ar, ao sair do LPC, entra diretamente no compressor de alta pressão (HPC) que tem uma relação de pressão de 12:1. A relação de pressão total com o meio externo é de 30:1.

Do compressor de alta pressão (HPC), o ar entra na câmara de combustão anular, onde se mistura com a massa de combustível utilizado (óleo diesel), injetado nos trinta bicos anulares que a unidade possui. O gás quente que resulta da combustão é diretamente direcionado à turbina de alta pressão (HPT), que alimenta o compressor de alta pressão (HPC). O gás expandido entra na turbina de baixa pressão (LPT) que alimenta o compressor de baixa pressão (LPC) e gera a potência de saída da unidade. Por último, os gases de exaustão provenientes do processo da turbina de baixa pressão (LPT) saem para o meio ambiente.

A unidade LM-6000 vem projetada de fábrica para funcionar com vários combustíveis: líquido, gasoso (gás natural) e combustível dual. A unidade também contém o sistema para injeção de água ou de vapor na câmara de combustão. A injeção é feita mediante os trinta bicos anulares que ela possui e serve para a supressão de NOx, formado nesse tipo de processo. A unidade atualmente estudada não utiliza esse sistema.

A unidade LM-6000 contém vários instrumentos de medição, localizados em diferentes pontos específicos do processo. Esses instrumentos ajudam nas medições de variáveis para compará-las com os dados dos níveis típicos de operação do sistema, recomendados pela fábrica, cujos valores se apresentam na figura 4.2. Os dados foram obtidos da tabela 8.1 *typical operating levels* do manual técnico da GE Industrial AeroDerivative, para pacote LM-6000 turbina a gás.

Como primeiro passo de uma análise exergética e exergoeconômica, devem-se estabelecer as suposições e critérios em que as análises estão baseadas, quais sejam:

1. A unidade LM-6000 do UTE - Rio Madeira estava fora de funcionamento, no momento da visita técnica para o desenvolvimento da análise, mas os dados utilizados foram tomados do manual da GE e das informações fornecidos pela equipe da Eletronorte;

2. As variáveis do meio de referência são: pressão - 101,28kPa, temperatura ambiente - 32°C e umidade relativa do ar - 82%;
3. Qualquer efeito de transferência de calor em cada componente se considera como parte da destruição de exergia de dito componente, com exceção do fluxo exergético 6 (ver figura (4.3));
4. A exergia total produzida pelo sistema é de 38MW e a eficiência térmica é de 39,1%;
5. Não se considera efeito nuclear, magnético, elétrico e de tensão de superfície nos fluxos exergéticos;
6. Os componentes de exergia cinética e potencial de qualquer fluxo exergético do sistema se assumem como zero;
7. A composição química molar do combustível óleo diesel, usado na usina, se considera como: carbono - 86,3%; hidrogênio - 12,8% e enxofre - 0,9%. O valor calorífico inferior do óleo diesel se considerou como 42MJ/kg e o valor calorífico superior, como 45,58 MJ/kg;
8. O óleo diesel entra na câmara de combustão a uma temperatura de 65,5°C e a uma pressão de 345 kPa. As relações de pressões são $p_2=2,4*p_1$ ou $p_3=12*p_2$;
9. Assume-se que o ar e os gases de combustão se comportam como gases ideais;
10. A composição molar dos gases de combustão é considerada como: Ar - 0,9047%; N₂ - 75,625%; O₂ - 14,3451%; CO₂ - 4,1161%; H₂O - 4,9669%; SO₂ - 0,0018%; CO - 0,0006%; HC - 0,0002%; NO_x - 0,0397% (dados fornecidos pela GE);
11. A exergia química padrão dos gases de combustão foram tomadas da tabela apresentada em Kotas (1985) ver anexo A. Tsatsaronis (1993) afirma que qualquer efeito de mudança na temperatura e pressão do estado de referência, em relação ao estado de referência padrão ($T_0=298,15K$ e $P_0=1,013bar$), sobre os valores da exergia química padrão das substâncias, pode ser desprezível;
12. A temperatura de saída dos gases de combustão (fluxo 6), para meio ambiente foi estabelecida como 460°C, segundo os dados da equipe da Eletronorte;
13. As fronteiras do sistema excluem o subsistema *chiller* e seus fluxos, tomando em consideração só o fluxo de ar da saída do respectivo componente (ver figura (4.3)). Este subsistema esfria o ar de entrada no LPC e aumenta a geração do sistema a +2 MW. Megawatts utilizados na alimentação do mesmo sistema, segundo dados da Eletronorte;

14. Para resultados mais exatos, define-se o sistema com um nível mínimo de agregação. Cada componente dentro da fronteira do sistema LM-6000 representa um subsistema deste. Para esta análise, denota-se subsistema como sinônimo de componente;
15. O custo de capital relativo ao investimento da unidade LM-6000 é considerado zero para a análise exergoeconômica. Isto porque o sistema em estudo é uma unidade já existente e seu custo de investimento já não representaria um custo real na unidade. Os custos de operação e manutenção foram considerados zero. Isto porque se deseja obter o custo do produto total do sistema, baseado, somente, no custo do combustível - óleo diesel - utilizado atualmente na unidade. Isto permite que o preço do combustível externo seja interpretado como um fator econômico de peso, que avalia a unidade de exergia, dependendo da classe de combustível consumido.

Table 8-1 Typical Operating Levels
Base Load (LM6000 PA Gas Turbine)
Generator Efficiency 98%, Inlet Loss = 4"H₂O; Exhaust Loss 10"H₂O

Parameter	Core Idle	Synchronous Idle	Maximum Base Power	Maximum Operating Limit
Power MW	0	0	41.5-43.3	N/A
WF, (Fuel Flow), lb/hr (kg/hr)	1,350-1,450 (612-657)	4,000-4,200 (1,814-1,905)	17,000-19,000 (7,711-8,618)	21,800 (9,888)
T2 (Inlet Temperature), F (C)	59 (15)	59 (15)	59 (15)	N/A
P0 (Ambient Inlet Pressure), psia (kPa)	14.6 (101)	14.4 (99)	14.4 (99)	N/A
T25 (HPC Inlet Temperature), F (C)	80-100 (27-38)	180-200 (82-93)	210-230 (99-110)	N/A
XN25 (HPC rpm)	6,400-6,700	8,400-8,700	10,300-10,500	10,700
XN2 (LPC rpm)	1,650-1,800	3,600	3,600	3,780
XNSD (LPT rpm)	1,650-1,800	3,600	3,600	3,780
PS3 (HPC Discharge Pressure), psia (kPa)**	50-57 (345-393)	130-143 (896-986)	390-440 (2,689-3,034)	442 (3,047)
T3 (HPC Discharge Temp), F (C) **	360-400 (182-204)	650-750 (343-399)	990-1,008 (532-542)	1,008 (542)
P48 (LPT Inlet Pressure), psia (kPa)	19-23 (131-159)	38-43 (262-296)	95-105 (655-724)	N/A
T48 (LPT Inlet Temp) F (C) **	725-825 (385-441)	950-1,050 (510-566)	1,540-1,610 (838-877)	1,610 (866)

Figura 4.2 - Níveis típicos de operação do sistema turbina a gás LM-6000
 Fonte: GE technical manual (2003)

Para o desenvolvimento das análises, deve-se definir a estrutura lógica do sistema, elaborando um diagrama de fluxos que mostre as fronteiras do sistema e o nível de agregação. Na figura (4.3), se mostra o diagrama de fluxo do sistema LM-6000:

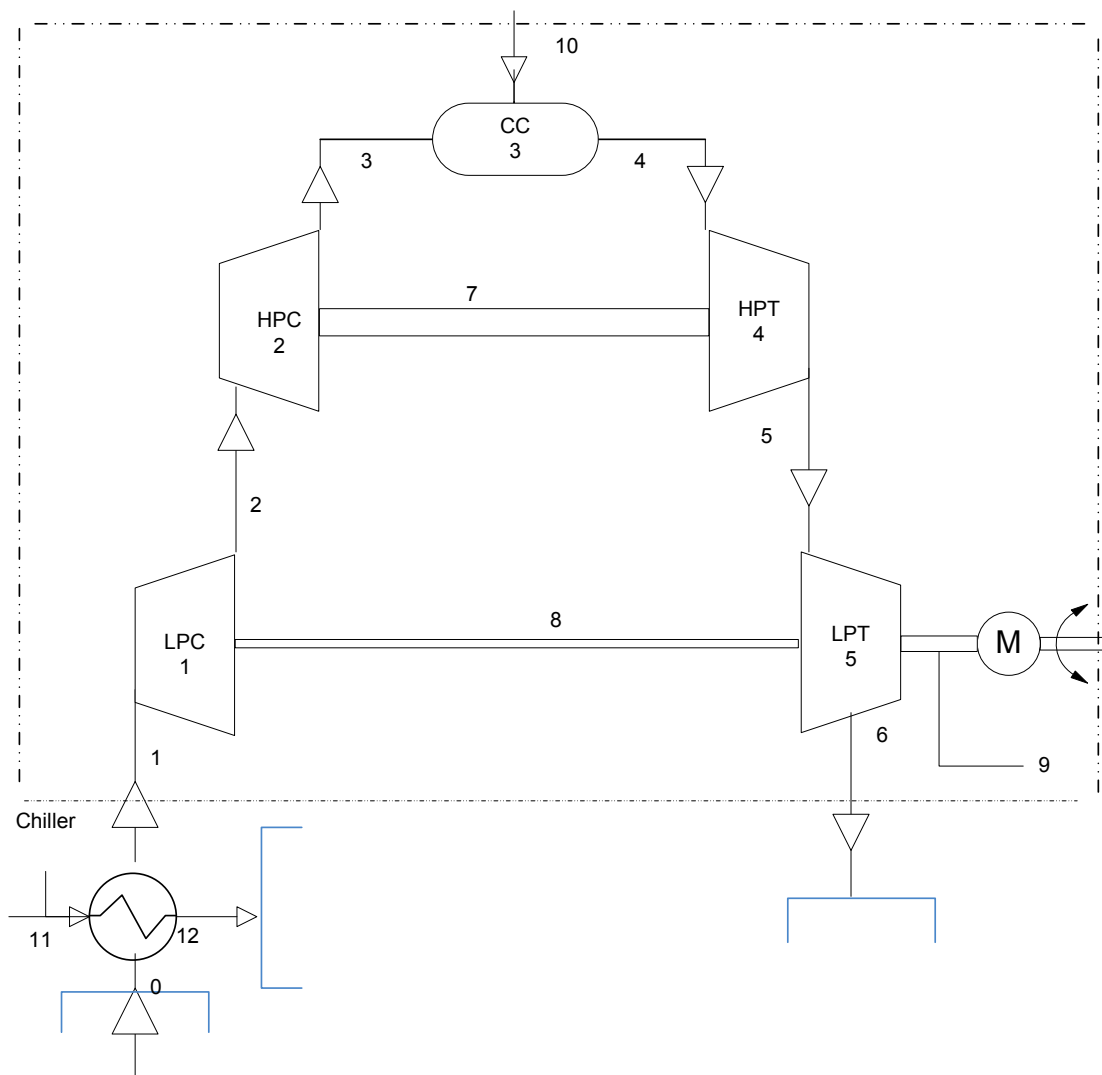


Figura 4.3 - Diagrama de fluxo do sistema LM-6000 analisado²

4.2 – ANÁLISE EXERGÉTICA

Para o desenvolvimento do estudo exergético, é importante a definição das variáveis termodinâmicas respectivas do sistema e do meio de referência. Para o sistema LM-6000, se definiram os valores médios das variáveis conhecidas, segundo os valores típicos de operação (maximum base power) apresentados na figura (4.2), e as variáveis do meio de referência que foram estabelecidas acima, para as condições de Porto Velho, Rondônia.

Na tabela (4.1), se apresentam as variáveis termodinâmicas conhecidas para o desenvolvimento da análise.

² Entenda-se como: LPC=Compressor de pressão baixa, HPC=Compressor de pressão alta, CC= Câmara de combustão, HPT= Turbina de pressão alta, LPT= Turbina de pressão alta.

Tabela 4.1 - Variáveis termodinâmicas conhecidas para a análise exérgica

Item	Variável*	Valor	Descrição
1	T_0	32°C	Temperatura do meio de referência
2	p_0	101,28kPa	Pressão do meio de referência
3	T_1	15°C	Temperatura de entrada no sistema
4	p_1	99kPa	Pressão ambiental de entrada
5	T_2	104,5°C	Temperatura de entrada no HPC
6	T_3	537°C	Temperatura de descarga HPC
7	p_3	2.861,5kPa	Pressão de descarga HPC
8	T_5	857,5°C	Temperatura de entrada LPT
9	p_5	689,5kPa	Pressão de entrada LPT
10	\dot{m}_{10}	2,3kg/s	Caudal mássico do Fuel
11	\dot{m}_1^*	108kg/s	Caudal mássico do ar

Fonte: Manual técnico da GE

*Caudal mássico do ar $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

Mediante a definição e cálculo das variáveis termodinâmicas de cada fluxo participante no sistema e das variáveis do meio de referência (T_0 , p_0), é possível realizar o cálculo correspondente aos valores exérgicos dos fluxos. Na tabela (4.2), se mostra cada uma das equações utilizadas para o cálculo da exergia química e física de cada fluxo exérgico do sistema em estudo.

Tabela 4.2 - Equações para o cálculo da exergia química³ e física específica de cada fluxo

Fluxo	Caraterística do fluxo	Exergia química	Exergia Física
1	ar	0	$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$
2	ar	0	$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$
3	ar	0	$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$
4	Gases de combustão	$b_q = \sum_i X_i \cdot \bar{b}_{q,i} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_i X_i \cdot \ln(X_i)$	$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$
5	Gases de combustão	$b_q = \sum_i X_i \cdot \bar{b}_{q,i} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_i X_i \cdot \ln(X_i)$	$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$
6	Gases de exaustão	$b_q = \sum_i X_i \cdot \bar{b}_{q,i} + \bar{R} \cdot T_0 \cdot \sum_i X_i \cdot \ln(X_i)$	$b_f = C_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$
7	Exergia que alimenta ao HPC	-	-
8	Exergia que alimenta ao LPC	-	-
9	Exergia total de saída	-	-
10	Combustível- óleo diesel	$b_q = \left(1,0401 + 0,1728 \cdot \frac{H}{C} + 0,043 \cdot \frac{O}{C} + 0,2169 \cdot \frac{S}{C} \cdot \left(1 - 2,0628 \cdot \frac{H}{C} \right) \right) \cdot LHV$	desprezível

³ As exergias padrões químicas foram tomadas do livro *The exergy method of Thermal Plant Analysis* (Kotas, 1985)

Na tabela (4.3), apresentam-se os resultados das seguintes variáveis termodinâmicas do sistema: o fluxo de massa; a pressão; a temperatura; a entalpia; a exergia química e física; e a exergia total de cada fluxo participante no processo.

Tabela 4.3 – Resultados da análise termodinâmica para o sistema LM-6000

Fluxo	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	T (K)	\dot{H} (MW)	\dot{B}_q (MW)	\dot{B}_f (MW)	\dot{B} (MW)
0	107,00	101,28	305,15	32,70	0,00	0,00	0,00
1	107,00	99,00	288,15	30,87	0,00	0,162	0,162
2	107,00	237,60	377,65	40,52	0,00	8,87	8,87
3	107,00	2861,50	810,15	89,15	0,00	53,98	53,98
4	109,30	2.314,68	1.475,74	194,00	1,73	128,99	130,72
5	109,30	689,50	1.130,65	147,20	1,73	79,49	81,22
6	109,30	111,06	733,15	97,17	1,73	21,15	22,87
7	0,00	-	-	46,84	-	-	46,84
8	0,00	-	-	11,99	-	-	11,99
9	0,00	-	-	38,00	-	-	38,00
10	2,30	345,00	338,70	105,00	105,00	0,00	105,00

Segundo os resultados da tabela (4.3), os fluxos exergéticos 1 (ar de entrada no sistema), 2 (ar de entrada no HPC) e 3 (ar de entrada na câmara), têm sua exergia química igual a zero, porque se consideram em equilíbrio químico com o meio de referência. Quando um fluxo está em equilíbrio químico ou físico com o meio de referência, não é possível obter trabalho dele, portanto, sua exergia química ou física é igual a zero. Com relação ao fluxo 10-combustível óleo diesel, seu valor exergético físico é desprezível, em comparação com seu grande potencial químico.

Todos os cálculos realizados para a obtenção dos valores das variáveis não conhecidas são apresentados no apêndice B – análise exergética. Os cálculos foram realizados mediante o software EES, Engineering Equation Solver, versão comercial.

Mediante a obtenção dos valores exergéticos dos dez fluxos participantes no sistema LM-6000, podem-se definir os fluxos exergéticos de cada um dos subsistemas. Todos os cinco subsistemas estão compostos de fluxo exergético Fuel (F), fluxo exergético Produto (P) e, somente, o componente número 5 (LPT) apresenta um fluxo Resíduo (R), definido como fluxo 6, como mostra a tabela (4.4).

Na tabela (4.4) mostra-se uma descrição de cada subsistema, com relação a seus fluxos exergéticos participantes: F, P e R.

Tabela 4.4 - Definição dos Produtos, Fuels e Resíduos de cada subsistema do sistema LM-6000

Componente	Descrição	Fuel (MW)	Produto (MW)	Resíduo (MW)
1	LPC	\dot{B}_8	$\dot{B}_2 - \dot{B}_1$	-
2	HPC	\dot{B}_7	$\dot{B}_3 - \dot{B}_2$	-
3	CC	$\dot{B}_3 + \dot{B}_{10}$	\dot{B}_4	-
4	HPT	$\dot{B}_4 - \dot{B}_5$	\dot{B}_7	-
5	LPT	\dot{B}_5	$\dot{B}_8 + \dot{B}_9$	\dot{B}_6

O método ECT apresenta as matrizes de incidência Fuel, Produto e Resíduo do sistema. Através da multiplicação matricial das matrizes de incidência \mathbf{A}_F , \mathbf{A}_P ou \mathbf{A}_R pelo vetor de valor exergético \mathbf{B} , se obtém os respectivos vetores Fuel, Produto e Resíduo do sistema. A seguir, se mostram as respectivas matrizes de incidência do sistema LM-6000:

Subsistemas/fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Figura 4.4 - Matriz de incidência Fuel do sistema LM-6000

E, o vetor Fuel do sistema se obtém, mediante a equação:

$$A_F x \dot{B} = \dot{F} \quad (4.1)$$

A matriz de incidência do Produto do sistema LM-6000 se representa como:

Subsistemas/fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
3	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0

Figura 4.5 - Matriz de incidência Produto do sistema LM-6000

E, o vetor Produto do sistema se obtém, mediante a equação matricial:

$$A_P x \dot{B} = \dot{P} \quad (4.2)$$

A matriz de incidência do Resíduo do sistema LM-6000, se expressa como:

Subsistemas/fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Figura 4.6 - Matriz de incidência Resíduo do sistema LM-6000

E, da mesma maneira como os vetores **F** e **P** foram calculados, o vetor resíduo **R** pode ser obtido da seguinte expressão:

$$A_R \times \dot{B} = \dot{R} \quad (4.3)$$

Das representações anteriores, se deduz a matriz de incidência **A** do sistema:

$$A = A_F - A_P - A_R \quad (4.4)$$

A matriz de incidência da unidade LM-6000 se representa como:

Subsistemas/fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
2	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	-1	0	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	-1	0	-1	-1	0
Perspectiva do sistema	1	0	0	0	0	-1	0	0	-1	1
Perspectiva do exterior	-1	0	0	0	0	1	0	0	1	-1

Figura 4.7 - Matriz de incidência da unidade LM-6000

As linhas “*Perspectiva do sistema*” e “*perspectiva do exterior*” representam os fluxos participantes do sistema, em seu máximo nível de agregação. Ao analisar a interação do meio de referência com o sistema LM-6000, em seu máximo nível de agregação, toma-se em consideração a unidade LM-6000 como um todo, sem considerar a interatividade com os componentes individuais e com os fluxos exergéticos que não atravessam as fronteiras do sistema.

O cálculo da destruição de exergia, por meio da via matricial, se realiza pela multiplicação da matriz de incidência **A** pelo vetor dos valores exergéticos (**B**) dos fluxos participantes no sistema.

A equação matricial se representa na seguinte equação:

$$\mathbf{Ax\dot{B} = \dot{D}} \quad (4.5)$$

E, de maneira escalar, a destruição de exergia de cada componente pode ser calculada com a operação escalar F-P-R, realizando-se essa operação em cada um dos cinco componentes (ver tabela (4.4)).

$$\begin{bmatrix} \dot{D}_{LPC} = \dot{F}_{LPC} - \dot{P}_{LPC} - \dot{R}_{LPC} \\ \dot{D}_{HPC} = \dot{F}_{HPC} - \dot{P}_{HPC} - \dot{R}_{HPC} \\ \vdots \\ \dot{D}_{LPT} = \dot{F}_{LPT} - \dot{P}_{LPT} - \dot{R}_{LPT} \end{bmatrix}$$

O grau de perfeição de cada processo se mede pela eficiência exergética. Através da eficiência da Segunda Lei, como é também conhecida a eficiência exergética, se determina a quantidade de porcentagem de exergia do Fuel do k-componente que pode ser encontrado na exergia do Produto do mesmo k-componente.

Para os cinco componentes do sistema LM-6000 a eficiência exergética se calcula por meio da relação:

$$Efici\acute{e}ncia (\eta) = \begin{bmatrix} \dot{F}_{LPC}/\dot{P}_{LPC} \\ \dot{F}_{HPC}/\dot{P}_{HPC} \\ \vdots \\ \dot{F}_{LPT}/\dot{P}_{LPT} \end{bmatrix}$$

O consumo exergético unitário (k) de cada componente do sistema LM-6000 é definido como o inverso da eficiência e pela Segunda Lei sempre $\eta < 1$ e $k > 1$.

$$consumo\ exerg\acute{e}tico\ unit\acute{a}rio\ (k) = \begin{bmatrix} \dot{P}_{LPC}/\dot{F}_{LPC} \\ \dot{P}_{HPC}/\dot{F}_{HPC} \\ \vdots \\ \dot{P}_{LPT}/\dot{F}_{LPT} \end{bmatrix}$$

Na tabela (4.5), se apresentam as expressões para o cálculo da eficiência exergética de cada subsistema da turbina a gás. E, na tabela (4.6), se apresentam as variáveis exergéticas Fuel, Produto e Resíduo, a destruição de exergia e os valores da eficiência exergética e do consumo exergético unitário de cada componente do sistema LM-6000.

Tabela 4.5 - Diagrama de fluxo e eficiência exergética de cada componente da LM-6000

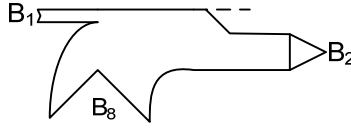
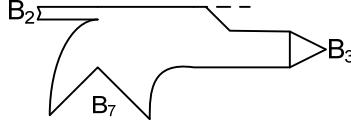
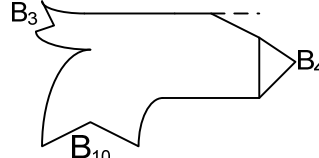
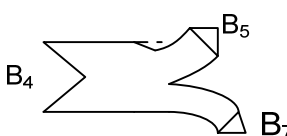
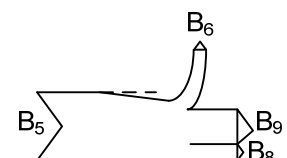
Componente	Diagrama de fluxo	Eficiência exergética η
LPC		$\eta_1 = \frac{\dot{B}_2 - \dot{B}_1}{\dot{B}_8}$
HPC		$\eta_2 = \frac{\dot{B}_3 - \dot{B}_2}{\dot{B}_7}$
CC		$\eta_3 = \frac{\dot{B}_4}{\dot{B}_3 + \dot{B}_{10}}$
HPT		$\eta_4 = \frac{\dot{B}_7}{\dot{B}_4 - \dot{B}_5}$
LPT		$\eta_5 = \frac{\dot{B}_9 + \dot{B}_8}{\dot{B}_5}$

Tabela 4.6 - Valores dos fluxos exergéticos, destruição de exergia e eficiência de cada componente da unidade LM-6000, para as condições estabelecidas

Componente	\dot{F} (MW)	\dot{P} (MW)	\dot{R} (MW)	\dot{D} (MW)	η	κ
LPC	11,99	8,71	0	3,28	0,73	1,38
HPC	46,84	45,1	0	1,73	0,96	1,04
CC	159	130,7	0	28,31	0,82	1,22
HPT	49,5	46,84	0	2,67	0,95	1,06
LPT	81,22	49,99	22,89	8,34	0,62	1,62

O sistema LM-6000 tem uma eficiência exergética total de 36,2% e um consumo exergético unitário de 2,765.

As variáveis comparativas do método exergoeconômico – ME - (relação da exergia destruída $\mathcal{Y}_{D,k}^*$ $\mathcal{Y}_{D,k}$ e relação da exergia resíduo $\mathcal{Y}_{R,k}$), se apresentam na tabela (4.7).

Tabela 4.7. Relação de exergia destruída e exergia resíduo

Componente	$\mathcal{Y}_{D,k}$	$\mathcal{Y}_{D,k}^*$	$\mathcal{Y}_{R,k}$
LPC	0,0312	0,0740	0
HPC	0,0165	0,0391	0
CC	0,2695	0,6386	0
HPT	0,0254	0,0601	0
LPT	0,0794	0,1882	0,2178

Estas variáveis são usadas para comparar a performance entre os componentes do sistema, como também, para comparar os componentes do sistema LM-6000, com outros componentes semelhantes de diferentes sistemas que usam o mesmo combustível óleo diesel.

4.2.1 - Representação gráfica do balanço exergético

Com os resultados da análise exergética da turbina LM-6000 se realiza uma caracterização exergética, através de um diagrama de Grassmann. Este diagrama começa a ser construído pela entrada do fluxo exergético Fuel externo (combustível óleo diesel) no sistema, seguido pela seqüência dos componentes, cujos dados para construção do diagrama são tomados das tabelas (4.3) e tabela (4.6).

A seguir se apresenta gráfica do diagrama de Grassmann obtido do sistema em estudo:

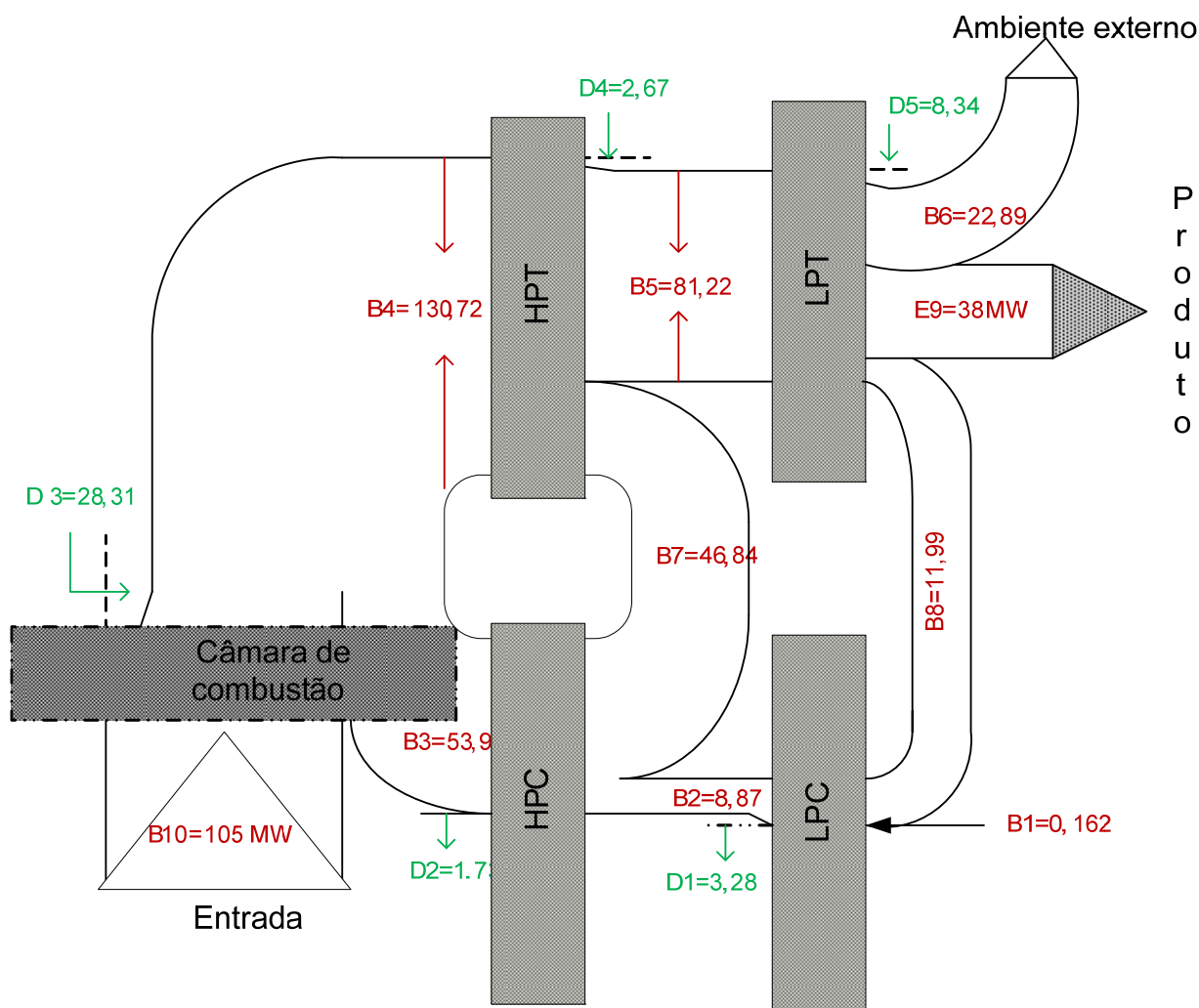


Figura 4.8 – Caracterização exergetica do sistema LM-6000, por meio do Diagrama de Grassmann

De maneira clara, o diagrama de Grassmann mostra as dimensões dos valores exergeticos de cada fluxo participante em cada processo; os valores de destruição de exergia em cada componente e também, as bifurcações nos subsistemas, assim como as recirculações da exergia em alguns componentes.

4.2.2 – Análise de resultados

Foram obtidos os resultados da análise exergetica, por meio de dois métodos: o ECT - Exergetic Cost Theory e o ME - método exergoeconômico.

Para as condições do meio de referência pré-estabelecidas e as variáveis termodinâmicas determinadas, a tabela (4.3) apresenta as taxas exergeticas, que permitem comparar, individualmente, os valores exergeticos do componente químico e do componente

físico de cada fluxo. Nos fluxos 1, 2 e 3 se denota que só o componente da exergia física interfere no potencial máximo de trabalho do fluxo, porque os fluxos se encontram em equilíbrio químico com o meio de referência. Isto porque a composição do ar de entrada no sistema é igual à composição presente na atmosfera natural, denominada como meio de referência.

Outro dado relevante se apresenta nos fluxos dos gases de combustão (fluxos 4 e 5) e no fluxo Resíduo (fluxo 6), onde o componente de exergia química não varia entre eles, isto porque durante os respectivos processos, não existe uma variação significativa na composição química dos fluxos.

Os resultados apresentados na tabela (4.3) mostram que o fluxo exergético dos gases de combustão (fluxo 4) apresenta o maior valor exergético dos fluxos participantes no sistema, seguido pelo valor exergético do combustível óleo diesel, entrando na câmara de combustão. O fluxo dos gases de exaustão (fluxo 6) apresenta um valor exergético de 22,89 MW, motivo de preocupação ambiental, já que este fluxo possui, ainda, um valor exergético alto, mostrando seu desequilíbrio com o meio ambiente.

Os resultados relacionados aos subsistemas mostram que a câmara de combustão apresenta a maior taxa de destruição de exergia de todos os componentes, com um valor de 28,31 MW, sendo isto 3,39 vezes maior que o segundo componente com maior taxa de destruição de exergia no processo - a turbina de baixa pressão, com 8,345 MW. Este resultado é devido à grande quantidade de irreversibilidades que surgem das reações químicas.

Com respeito à eficiência exergética, a câmara de combustão apresenta um 82% de eficiência exergética, significando que 82% da exergia do fluxo Fuel, desse componente, está presente no fluxo Produto do mesmo e 18% da exergia do fluxo Fuel foi destruído, internamente, durante o processo.

O compressor de baixa pressão e a turbina de baixa pressão apresentam as menores porcentagens de eficiência exergética com 72,65% e 61,55%, respectivamente. E o compressor de alta pressão e a turbina de alta pressão apresentam as maiores taxas de eficiência exergética e os menores valores de destruição de exergia do sistema, apontando uma boa performance exergética.

Segundo as três variáveis de taxa de destruição de exergia apresentadas no método de Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) a câmara de combustão do sistema LM-6000 apresenta, como era de se esperar, a maior taxa de destruição de exergia dos componentes do sistema,

com uma relação $y_{D,CC}^*=0,6386$, o que equivale, que, dentro da câmara de combustão, ocorre 63,86% do total da destruição de exergia do sistema.

A turbina de alta pressão contém a menor taxa de destruição de exergia com uma relação $y_{D,HPT}^*$ igual a 0,0601 (6,01%). A câmara de combustão, também, apresenta a maior taxa de destruição de exergia dentro de um componente com $y_{D,CC}=0,2695$.

Nesta análise de resultados, se desenvolvem três análises exergéticas comparativas do sistema LM-6000, tomando em consideração as mesmas suposições e as mesmas condições do estado de referência estabelecidas. Apresentam-se modificações só nas variáveis termodinâmicas conhecidas, que são agrupadas em: valores mínimos, máximos e médios, sempre dentro da faixa dos valores típicos de operação, fornecidos pela fábrica, (ver figura (4.2)).

Na tabela (4.8), mostram-se estes valores típicos de operação das variáveis termodinâmicas.

Tabela 4.8 - Valores mínimos, médios e máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas

Item	Variável*	Valores mínimos	Valores médios	Valores máximo	Descrição
1	T_1	15°C	15°C	15°C	Temperatura de entrada ao sistema
2	p_1	99 kPa	99 kPa	99 kPa	Pressão ambiental de entrada
3	T_2	99°C	104,5°C	110°C	Temperatura de entrada ao HPC
4	T_3	532°C	537°C	542°C	Temperatura de descarga HPC
7	p_3	2.689 kPa	2.861,5 kPa	3.034 kPa	Pressão de descarga HPC
8	T_5	838°C	857,5°C	877°C	Temperatura de entrada LPT
9	p_5	655 kPa	689,5 kPa	724 kPa	Pressão de entrada LPT
10	\dot{m}_{10}	2,2 kg/s	2,3kg/s	2,4 kg/s	Caudal mássico do fuel
11	\dot{m}_1^*	106 kg/s	107 kg/s	109 kg/s	Caudal mássico do ar

*Caudal mássico do ar $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

Por meio de três figuras comparativas, se apresentam os resultados obtidos, nas três análises exergéticas, para os valores exergéticos de cada fluxo (figura (4.9)); a destruição de exergia (figura (4.10)) e a eficiência exergética (figura (4.11)) em cada componente.

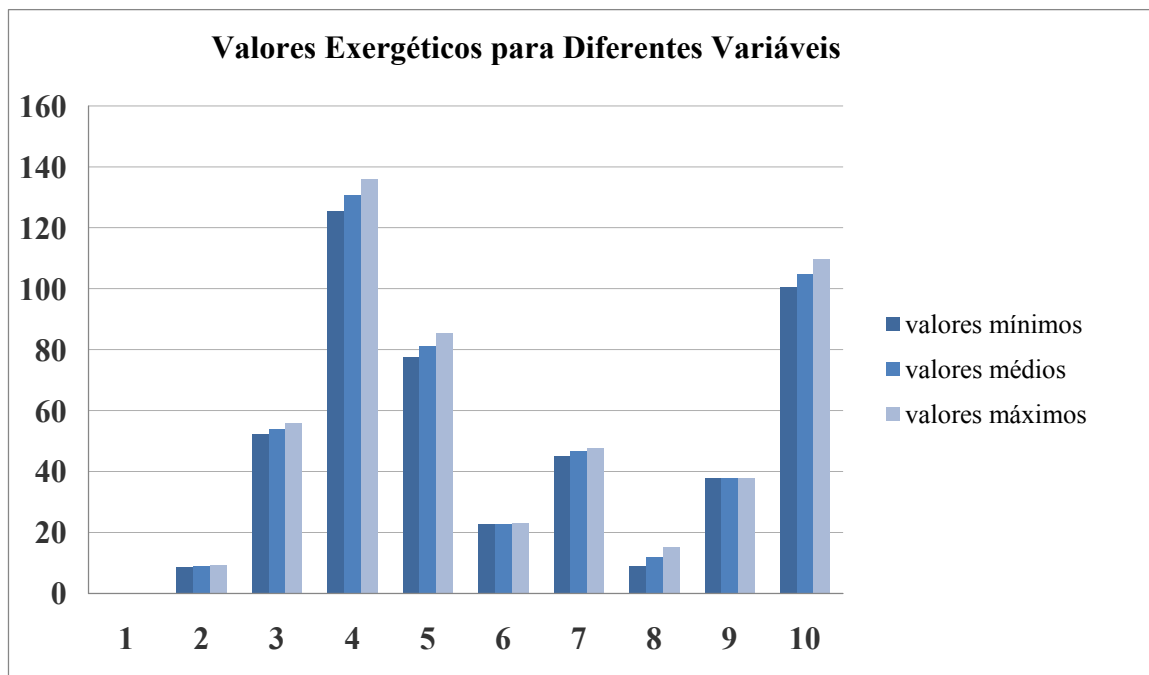


Figura 4.9 – Valores exergéticos para diferentes valores de variáveis termodinâmicas conhecidas, segundo níveis típicos de operação

Através da figura (4.9), comparam-se os valores exergéticos dos fluxos, para diferentes valores das variáveis termodinâmicas conhecidas, e as mesmas condições do meio de referência. Esta figura mostra que, quanto maior os valores das variáveis termodinâmicas conhecidas, maior os valores exergéticos dos fluxos, embora esse aumento não seja significativo.

Na figura (4.10), mostra-se a comparação dos valores de destruição de exergia presente nos diferentes componentes do sistema LM-6000. Como resultado desta análise, observa-se que, na maioria dos componentes, a destruição de exergia é maior para os valores máximos de operação. O compressor de alta pressão, exceção desse resultado, apresenta uma diminuição na destruição de exergia, em comparação com os valores médios e mínimos das variáveis.

Outro dado importante, apresentado nesta figura, é a destruição de exergia no compressor de baixa pressão, onde os valores mínimos de operação apresentam uma diminuição significativa na destruição de exergia, em comparação com os outros valores de operação.

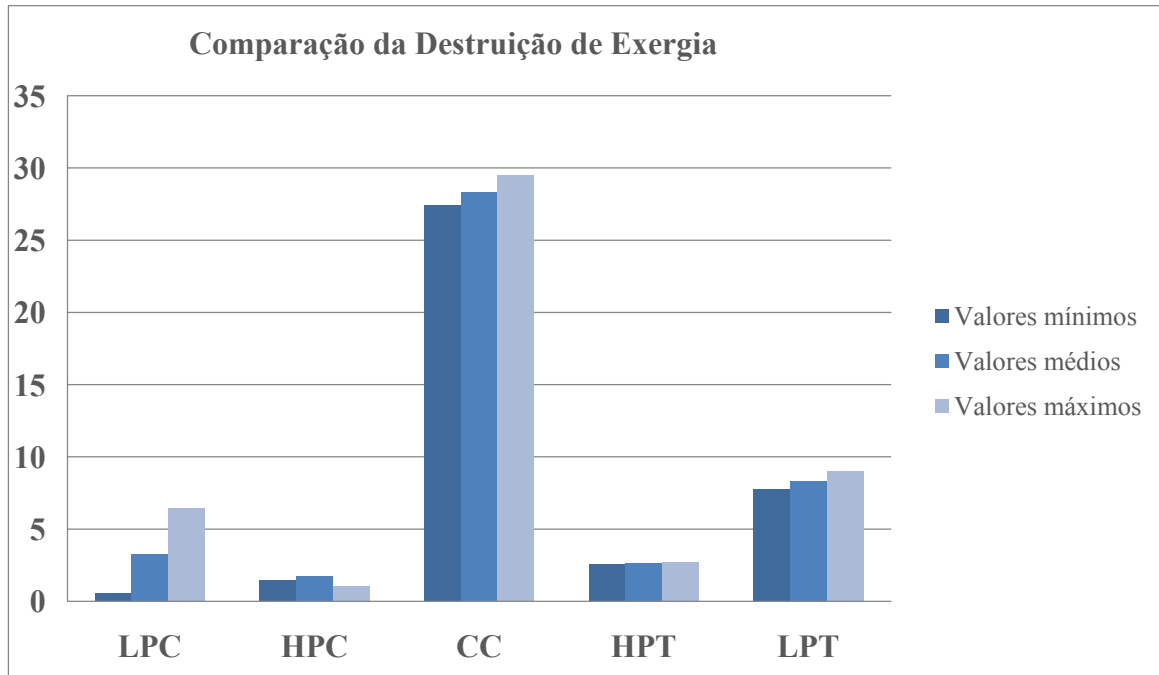


Figura 4.10 – Destruição de exergia dos componentes para diferentes valores de variáveis termodinâmicas conhecidas, segundo os níveis típicos de operação

Na figura (4.11), apresenta-se a análise comparativa das eficiências exergéticas dos diferentes componentes, com as diferentes variáveis termodinâmicas. Os resultados mostram que os valores máximos apresentam um leve aumento de eficiência exergética nos componentes LPT, HPT, CC e HPC, em relação aos valores médios e mínimos das variáveis. Caso contrário é apresentado no compressor de baixa pressão (LPC), onde os valores mínimos apresentam maior eficiência exergética, e os valores máximos apresentam a menor porcentagem. No compressor de alta pressão (HPC), apresenta-se também uma melhor performance dos valores mínimos, em comparação com os valores médios, que representa a menor porcentagem para esse componente.

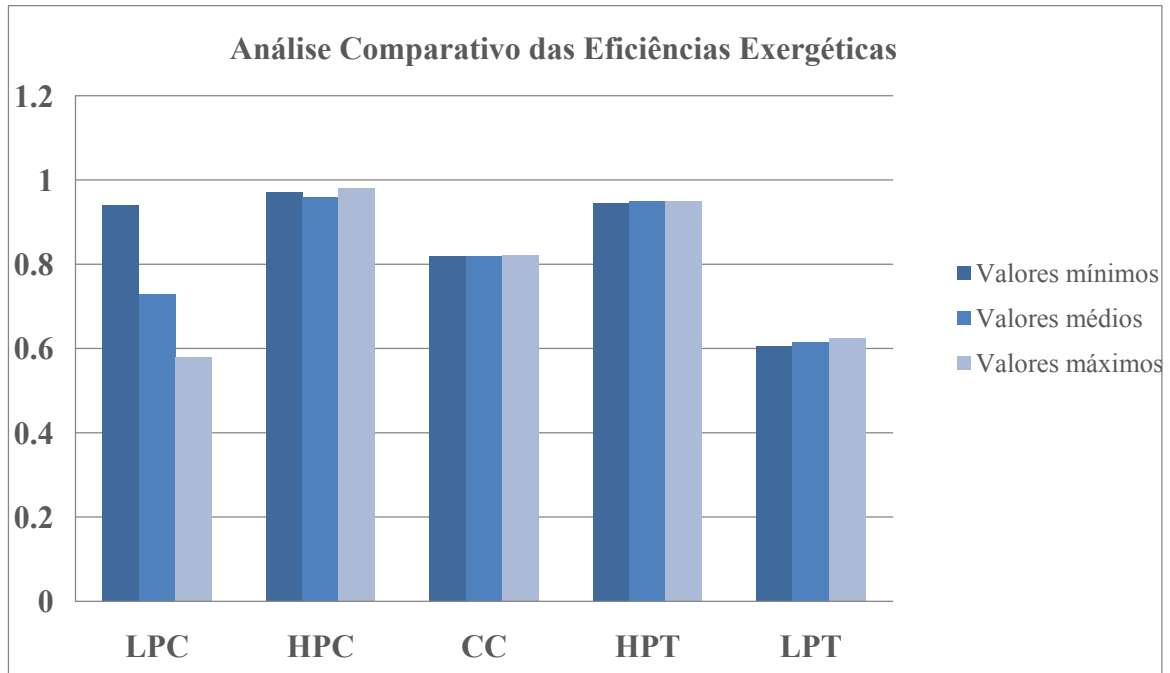


Figura 4.11 - Análise comparativa das eficiências exergeticas dos componentes para diferentes valores de variáveis termodinâmicas conhecidas, segundo os níveis típicos de operação

4.3 - ANÁLISE EXERGOECONÔMICA

Esta análise exergoeconômica visa ao cálculo dos custos de cada fluxo exergetico participante no sistema turbina a gás - LM-6000, baseada, somente, no impacto devido ao custo do fluxo exergetico do combustível externo. A avaliação da performance de um sistema já existente é desenvolvida de maneira semelhante à avaliação de projetos de sistemas novos, usando, por conseguinte, as mesmas variáveis termoeconômicas.

Determina-se que a taxa de custo, associada com o fornecimento do combustível externo ao sistema completo, é distribuída entre os fluxos que saem do sistema, como, por exemplo, para a unidade LM-6000, o custo do fluxo 10 (combustível externo) é distribuído pelos fluxos exergeticos de saída 6 e 9. A taxa de custo do óleo diesel utilizado na unidade, segundo o valor fornecido pela gerência da Eletronorte, é de R\$2,00/Lt, preço com o 17% do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços, e o consumo da unidade é de 550Lt/hr. O custo termoeconômico do combustível é de R\$3,055/seg e o custo termoeconômico do ar, entrando no sistema, é considerado zero.

$$\dot{Z}_{LPC} = \dot{Z}_{HPC} = \dot{Z}_{CC} = \dot{Z}_{HPT} = \dot{Z}_{LPT} = 0$$

O desenvolvimento da análise, por meio do método ECT, como se explica no capítulo anterior, se desenvolve baseado na matriz de incidência **A**. Para obter os resultados de custos, primeiramente, deve-se definir a matriz complementar (α) da matriz de incidência **A**, construindo assim uma matriz $\bar{\mathbf{A}}$ (10x10).

Para construir a matriz complementar α e conseqüentemente determinar a matriz $\bar{\mathbf{A}}$, se deve relacionar o sistema estudado com as proposições da teoria de contabilidade de custos:

Proposição FP: balanço de custos exergeticos:

$$\bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}\dot{\mathbf{B}}^* = \mathbf{0}$$

Proposição 2F: o fluxo de saída (fluxo 5), da turbina de alta pressão, forma parte do Fuel de entrada (fluxo 4) desse mesmo componente. Então, deve-se entender que a exergia do fluxo 5 não foi colocada em jogo e, conseqüentemente, seu custo exergetico unitário é idêntico ao fluxo de entrada do dito componente:

$$\frac{\dot{B}_4^*}{B_4} - \frac{\dot{B}_5^*}{B_5} = 0, \text{ para o componente 4, HPT (turbina de alta pressão)}$$

$$\text{onde } \dot{B}_4^* - x_1 \cdot \dot{B}_5^* \text{ e } x_1 = \frac{\dot{B}_4}{\dot{B}_5}$$

Proposição 2P: a turbina de baixa pressão tem um produto formado por vários componentes: componente - fluxo 8 e componente - fluxo 9. A cada componente se designará o mesmo custo exergetico unitário:

$$\frac{\dot{B}_8^*}{B_8} - \frac{\dot{B}_9^*}{B_9} = 0, \text{ para o componente 5, LPT (turbina de baixa pressão)}$$

$$\text{onde } \dot{B}_9^* - x_2 \cdot \dot{B}_8^* \text{ e } x_2 = \frac{\dot{B}_9}{\dot{B}_8}$$

Proposição 1R: na ausência de valoração externa, o custo exergetico do fluxo resíduo (fluxo 6) é nulo, por que este não tem utilidade posterior:

$$\dot{B}_6^* = 0, \text{ para o fluxo resíduo do componente LPT}$$

Proposição 5: na ausência de valoração externa, o custo exergetico do fluxo de entrada no sistema (fluxos 10), é igual a sua exergia.

$\dot{B}_{10}^* = \dot{B}_{10}$, para o fluxo de combustível entrando ao sistema

$\dot{B}_1^* = 0$, para o ar de entrada no sistema.

A figura (4.12) representa a matriz complementar do sistema LM-6000, baseada nas proposições acima definidas.

α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ω
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B_1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	B_{10}
8	0	0	0	0	0	0	0	$-x_2$	1	0	0
9	0	0	0	1	$-x_1$	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Figura 4.12 - Matriz complementar do sistema LM-6000

Mediante esta matriz complementar e a matriz de incidência determinada anteriormente, se define a matriz \bar{A} :

Subsistemas/fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	-1	0	0	0	0	0	1	0	0
2	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	-1	0	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	-1	0	-1	-1	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	-3,17	1	0
9	0	0	0	1	-1,61	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Figura 4.13 - Exclusividade da matriz de incidência A

Para calcular o custo exergético e o custo exergético unitário se utiliza a equação:

$$k^* = \frac{\dot{B}^*}{\dot{B}} \quad (4.6)$$

e, para o balanço de custo exergético de cada componente,

$$\sum_{i=1}^e \dot{B}_i^* = \sum_{i=1}^s \dot{B}_i^* \quad (4.7)$$

Para o cálculo do vetor de custo exergético de maneira matricial, se usa a equação:

$$\bar{A}x\dot{B}^* = \bar{Y} \quad (4.8)$$

onde o vetor de amortização exergético é definido por:

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{B}_{10} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

No cálculo do vetor do custo termoeconômico, se avalia o impacto que o capital de custo e o combustível externo têm sobre os fluxos exergéticos do sistema LM-6000, calculados pela operação matricial:

$$\bar{A}x\dot{\pi} = \dot{Z} \quad (4.9)$$

Considerando-se que se definiu para o sistema em estudo, que o capital de custo é zero, o vetor de amortização exergoeconômica é representado por:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{\hat{\pi}}_{10} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

onde π'_{10} é o custo termoeconômico do óleo diesel.

O vetor de custo exergoeconômico unitário, para os dez fluxos exergéticos do sistema, se obtém mediante a relação:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\pi}}_1 = \hat{c}_1 \cdot \dot{\mathbf{B}}_1 \\ \dot{\hat{\pi}}_2 = \hat{c}_2 \cdot \dot{\mathbf{B}}_2 \\ \dot{\hat{\pi}}_3 = \hat{c}_3 \cdot \dot{\mathbf{B}}_3 \\ \dot{\hat{\pi}}_4 = \hat{c}_4 \cdot \dot{\mathbf{B}}_4 \\ \dot{\hat{\pi}}_5 = \hat{c}_5 \cdot \dot{\mathbf{B}}_5 \\ \vdots \\ \dot{\hat{\pi}}_{10} = \hat{c}_{10} \cdot \dot{\mathbf{B}}_{10} \end{bmatrix}$$

E, da mesma maneira, o vetor de custo termoeconômico unitário se calcula, segundo a relação:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\pi}}_1 = \hat{c}_1^* \cdot \dot{\mathbf{B}}_1^* \\ \dot{\hat{\pi}}_2 = \hat{c}_2^* \cdot \dot{\mathbf{B}}_2^* \\ \dot{\hat{\pi}}_3 = \hat{c}_3^* \cdot \dot{\mathbf{B}}_3^* \\ \dot{\hat{\pi}}_4 = \hat{c}_4^* \cdot \dot{\mathbf{B}}_4^* \\ \dot{\hat{\pi}}_5 = \hat{c}_5^* \cdot \dot{\mathbf{B}}_5^* \\ \vdots \\ \dot{\hat{\pi}}_{10} = \hat{c}_{10}^* \cdot \dot{\mathbf{B}}_{10}^* \end{bmatrix}$$

Na tabela (4.9) se apresentam todos os valores relacionados ao custo termoeconômico, custo exergoeconômico unitário, custo termoeconômico unitário, custo exergético e custo exergético unitário.

Tabela 4.9 - Variáveis termoeconômicas para a unidade LM-6000

Fluxo	\dot{B}^* (MW)	k^*	$\hat{\pi}$ (R\$/seg)	\hat{c}^* (R\$/GJ)	\hat{c} (R\$/GJ)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	33,15	3,74	0,96	29,08	108,65
3	117,38	2,18	3,42	29,09	63,27
4	222,44	1,70	6,47	29,09	49,49
5	138,21	1,70	4,02	29,08	49,49
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	84,23	1,80	2,45	29,10	52,33
8	33,12	2,76	0,96	29,08	80,41
9	105,00	2,76	3,06	29,08	80,41
10	105,00	1,00	3,06	29,08	29,08

Para a obtenção dessas variáveis, através do método de cálculo ME se utiliza, primeiramente, o balanço do custo termoeconômico para cada componente individual, como se mostra na tabela (4.10):

$$\sum_{i=1}^e \hat{\pi}_{i,k} = \sum_{i=1}^s \hat{\pi}_{i,k} \quad (4.10)$$

Tabela 4.10 - Balanço do custo termoeconômico de cada componente do sistema LM-6000

Componente	Descrição	Entrada	saída
1	LPC	$\dot{\pi}_8$	$\dot{\pi}_2 - \dot{\pi}_1$
2	HPC	$\dot{\pi}_7$	$\dot{\pi}_3 - \dot{\pi}_2$
3	CC	$\dot{\pi}_3 + \dot{\pi}_{10}$	$\dot{\pi}_4$
4	HPT	$\dot{\pi}_4 - \dot{\pi}_5$	$\dot{\pi}_7$
5	LPT	$\dot{\pi}_5$	$\dot{\pi}_8 + \dot{\pi}_9$

As relações auxiliares do sistema LM-6000 são:

$$\hat{c}_8 = \hat{c}_9 \text{ para a turbina de baixa pressão}$$

$$\hat{c}_4 = \hat{c}_5 \text{ para a turbina de alta pressão}$$

Com a ajuda das relações termoeconômicas auxiliares, relativas a cada componente, e o balanço de custos termoeconômico podem-se obter os valores do custo termoeconômico e o custo exergoeconômico unitário dos dez fluxos físicos do sistema:

$$\begin{bmatrix} \hat{\pi}_1 = \hat{c}_1 \cdot \dot{B}_1 \\ \hat{\pi}_2 = \hat{c}_2 \cdot \dot{B}_2 \\ \hat{\pi}_3 = \hat{c}_3 \cdot \dot{B}_3 \\ \hat{\pi}_4 = \hat{c}_4 \cdot \dot{B}_4 \\ \hat{\pi}_5 = \hat{c}_5 \cdot \dot{B}_5 \\ \vdots \\ \hat{\pi}_{10} = \hat{c}_{10} \cdot \dot{B}_{10} \end{bmatrix}$$

Para o cálculo, das variáveis independentes ao custo do combustível externo fornecido ao sistema, do custo exergético e do custo exergético unitário, Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996) apresentam uma técnica de cálculo diferente ao do método ECT. Esta técnica é baseada, principalmente, no custo exergoeconômico unitário do combustível externo. Para o caso em estudo, o fluxo 10:

$$\dot{B}_i^* = \sum_{i=1}^{10} \frac{\hat{\pi}_i}{c_{10}} \quad (4.11)$$

$$k_i^* = \sum_{i=1}^{10} \frac{\hat{c}_i}{c_{10}} \quad (4.12)$$

Para o cálculo das variáveis termoeconômicas Fuel e Produto em cada componente, o método ECT calcula seus valores, mediante a multiplicação matricial da matriz Fuel \mathbf{A}_F e da matriz Produto \mathbf{A}_P pelo vetor do custo termoeconômico, respectivamente. O vetor de custo

termoeconômico Fuel e de custo termoeconômico Produto, para cada componente do sistema, se calcula mediante as seguintes equações matriciais:

$$\hat{\pi}_F = A_F x \hat{\pi} \quad (4.13)$$

$$\hat{\pi}_P = A_P x \hat{\pi} \quad (4.14)$$

E, através dos respectivos vetores de custo termoeconômico Fuel e Produto, se obtêm o custo exergoeconômico unitário Fuel e o custo exergoeconômico unitário Produto de cada componente. Isto mediante a multiplicação matricial da inversa da matriz diagonal Fuel e Produto pelo vetor do custo termoeconômico Fuel e Produto, respectivamente.

$$\hat{c}_F = \dot{F}_D^{-1} x \hat{\pi}_F \quad (4.15)$$

$$\hat{c}_P = \dot{P}_D^{-1} x \hat{\pi}_P \quad (4.16)$$

A matriz diagonal Fuel se representa, com base nos dados da coluna **F** da tabela (4.6), como:

F	1	2	3	4	5
LPC	11,99	0	0	0	0
HPC	0	46,84	0	0	0
CC	0	0	159	0	0
HPT	0	0	0	49,5	0
LPT	0	0	0	0	81,22

È importante lembrar que estes valores estão em MW (MJ/seg) e devem ser convertidos a GJ/seg.

A matriz diagonal Produto se representa, com base nos dados da coluna **P** da tabela (4.6), como:

P	1	2	3	4	5
LPC	8,71	0	0	0	0
HPC	0	45,1	0	0	0
CC	0	0	130,7	0	0
HPT	0	0	0	46,84	0
LPT	0	0	0	0	49,99

Da mesma maneira, é importante lembrar que estes valores estão em MW (MJ/seg) e devem ser convertidos a GJ/seg.

Para a obtenção do vetor do custo termoeconômico unitário Fuel e Produto, se multiplica o inverso da matriz diagonal do custo exergético do Fuel e Produto pelo vetor de custo termoeconômico Fuel e Produto, respectivamente.

$$\hat{c}^*_F = (\hat{F}^*)_D^{-1} x \hat{\pi}_F \quad (4.17)$$

$$\hat{c}^*_P = (\hat{P}^*)_D^{-1} x \hat{\pi}_P \quad (4.18)$$

Pelo balanço do custo exergético, a matriz diagonal do custo exergético Fuel é igual à matriz diagonal do custo exergético Produto, e se representam como:

P-F	1	2	3	4	5
LPC	33,15	0	0	0	0
HPC	0	84,23	0	0	0
CC	0	0	222,4	0	0
HPT	0	0	0	84,23	0
LPT	0	0	0	0	138,2

È importante lembrar que estes valores estão em MW (MJ/seg) e devem ser convertidos a GJ/seg.

Na tabela (4.11), se apresentam os resultados dos valores do custo termoeconômico do Fuel e do Produto, dos custos exergoeconômicos e termoeconômicos unitários do Fuel e do Produto de cada componente.

Tabela 4.11 - Custo termoeconômico Fuel e Produto, e custo exergoeconômico unitário Fuel e Produto de cada componente do sistema

Componente	$\hat{\pi}_F$ (R\$/seg)	$\hat{\pi}_P$ (R\$/seg)	\hat{c}_F^* (R\$/GJ)	\hat{c}_P^* (R\$/GJ)	\hat{c}_F (R\$/GJ)	\hat{c}_P (R\$/GJ)
LPC	0,96	0,96	29,08	29,08	80,41	110,70
HPC	2,45	2,45	29,10	29,10	52,33	54,34
CC	6,47	6,47	29,09	29,09	40,68	49,49
HPT	2,45	2,45	29,10	29,10	49,51	52,33
LPT	4,02	4,02	29,08	29,08	49,48	80,4

O cálculo destas variáveis, mediante o método escalar, é baseado no balanço de custos de cada k-componente:

$$\hat{\pi}_{P,k} = \hat{\pi}_{F,k} \quad (4.19)$$

Onde,

$$\hat{\pi}_{P,k} = \hat{c}_{P,k} * \dot{P} \quad (4.20)$$

$$\hat{\pi}_{F,k} = \hat{c}_{F,k} * \dot{F} \quad (4.21)$$

Este método escalar apresenta duas variáveis adicionais que ajudam à avaliação da performance de cada componente: a taxa de destruição de exergia e a relação dos combustíveis de cada componente.

A taxa de destruição de exergia de cada componente é calculada por meio da relação:

$$\left[\begin{array}{l} \hat{\pi}_{D,LPC} = \hat{c}_{F,LPC} \cdot \dot{D}_{LPC} \\ \hat{\pi}_{D,HPC} = \hat{c}_{F,HPC} \cdot \dot{D}_{HPC} \\ \hat{\pi}_{D,CC} = \hat{c}_{F,CC} \cdot \dot{D}_{CC} \\ \hat{\pi}_{D,HPT} = \hat{c}_{F,HPT} \cdot \dot{D}_{HPT} \\ \hat{\pi}_{D,LPT} = \hat{c}_{F,LPT} \cdot \dot{D}_{LPT} \\ - \end{array} \right]$$

e, a relação de combustível é calculada mediante a expressão:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{LCP} = \hat{c}_{F,LCP}/\hat{c}_{10} \\ \varphi_{HPC} = \hat{c}_{F,HPC}/\hat{c}_{10} \\ \varphi_{CC} = \hat{c}_{F,CC}/\hat{c}_{10} \\ \varphi_{HPT} = \hat{c}_{F,HPT}/\hat{c}_{10} \\ \varphi_{LPT} = \hat{c}_{F,LPT}/\hat{c}_{10} \end{bmatrix}$$

Tabela 4.12 - Custo termoeconômico, custo exergoeconômico unitário, custo termoeconômico da exergia destruída e relação de custos combustíveis de cada componente, ME - método exergoeconômico

Componente	$\hat{\pi}_D$ (R\$/seg)	φ
LPC	0,26	2,76
HPC	0,09	1,78
CC	1,15	1,40
HPT	0,13	1,70
LPT	0,41	1,70

4.3.1 – Análise de resultados

Na tabela (4.9), se observa os resultados obtidos do custo exergético e do custo exergético unitário. O custo exergético apresenta uma informação relevante ao estudo, já que este valoriza o consumo real de exergia que tem sido necessário para construir qualquer dos fluxos internos e produtos da planta.

Os resultados mostram que o sistema requer maior quantidade de exergia, por unidade de tempo (conhecido como taxa de exergia), para produzir o fluxo de saída da câmara de combustão (fluxo 4) do que para produzir algum outro fluxo do sistema LM-6000. O fluxo 4, apresenta um custo exergético igual a 222,4 MW.

O fluxo exergético externo de entrada no sistema (óleo diesel) apresenta o mesmo custo exergético do fluxo exergético de saída do sistema (fluxo 9), onde, segundo as regras da contabilidade de custo, o custo exergético do fluxo externo de entrada no sistema é igual a seu

valor exergético. O sistema LM-6000, independentemente, do custo do combustível externo, requer 105 MW para produzir a potência de saída do sistema (fluxo 9).

Observa-se na tabela (4.9), que os resultados do custo exergético unitário de cada fluxo é maior que a unidade. Esta variável depende da qualidade do funcionamento e expressa quantas vezes a exergia gasta pelo sistema, para produzir o m-fluxo, é maior que o valor exergético do mesmo m-fluxo.

O fluxo 2 apresenta o maior custo exergético unitário, provocado pelo compressor de baixa pressão. A turbina de baixa pressão provoca um incremento de custo exergético unitário no processo de produção de energia, a partir dos gases de combustão. O custo exergético unitário do fluxo 9 é 2,76 e, o dos gases de combustão é 1,7.

O fluxo 4 apresenta, também, a maior quantidade de unidades monetárias por segundo (R\$/seg), do sistema LM-6000, requeridas para o fluxo ser produzido, com um custo termoeconômico igual a R\$6,47/seg. O fluxo 5, que é parte dos gases de combustão, apresenta o segundo custo termoeconômico de maior valor do sistema, cujo gasto é de R\$4,02/seg para produzi-lo. Nota-se que os fluxos dos gases de combustão (fluxos 4 e 5), possuem, também, o maior custo exergético do sistema.

Mediante esses resultados mostra-se que o custo exergoeconômico unitário, que representa o custo de cada unidade de exergia do m-fluxo analisado, do Produto final do sistema (fluxo 9 – energia nobre) – é igual a R\$80,41/GJ, o que representa um custo de R\$0,289 por kW-hr, valor sem o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços – 17%. Este valor permite avaliar de maneira objetiva o impacto do combustível no sistemas, devido a não ter considerado outras variáveis econômicas. Esta análise permite a comparação econômica do sistema para cada combustível seja líquido (óleo diesel), gasoso (gás natural) ou *dual* (óleo diesel – gás natural)

Nota-se que o custo termoeconômico, associado ao combustível óleo diesel de entrada, é igual ao custo termoeconômico do produto total (fluxo 9) do sistema. De igual maneira, se o sistema tivesse algum outro fluxo produto de saída, a soma do custo termoeconômico desse fluxo mais o custo do fluxo 9 seria igual ao custo termoeconômico do combustível de entrada ao sistema (fluxo 10). Segundo os resultados, o custo final do produto do sistema (fluxo 9) é igual a R\$3,06/seg, mesmo valor do custo termoeconômico do combustível óleo diesel de entrada.

Os resultados obtidos na análise sobre os componentes comprovam o balanço do custo termoeconômico em cada componente. Nos resultados, mostra-se, também, que o fluxo Fuel

do compressor de baixa pressão apresenta o maior valor do custo exergoeconômico unitário Fuel do sistema, com R\$80,41/GJ, que apresenta o mesmo custo da energia nobre produzida pelo sistema. O fluxo Fuel da câmara de combustão apresenta o menor custo, por unidade de exergia, dos fluxos Fuel do sistema, com um fluxo exergoeconômico unitário de R\$40,68/GJ.

O fluxo Produto do compressor de baixa pressão apresenta também, o maior custo exergoeconômico unitário do sistema (R\$110,7/GJ), expressando o custo de cada unidade de exergia desse fluxo.

O método exergoeconômico (ME) mostra o resultado do custo da destruição de exergia e a relação de combustível de cada componente, referente ao combustível óleo diesel de entrada. A relação de custos mostra quanto as ineficiências de cada componente custam ao sistema, quando só o custo do combustível é considerado. Os resultados denotam, como era de se esperar, que a câmara de combustão possui o maior custo de destruição do sistema (R\$1,15/seg). E o segundo maior custo de destruição, se apresenta na turbina de baixa pressão, com R\$0,413/seg.

5 - ANÁLISE AMBIENTAL - EXERGIA COMO INDICADOR DE IMPACTO AMBIENTAL

As preocupações ambientais atuais, como o esgotamento dos recursos não renováveis, não são temas que começaram a despertar interesse, somente, nesta era. Desde o século XIX, cientistas como Clausius e Kelvin, assim como Serhii Podolinski, já mostravam interesse sobre o impacto que o uso excessivo dos recursos naturais poderia causar ao meio ambiente e à economia, respectivamente.

Segundo Botero (2000), Clausius via, na utilização energética do carvão, o gasto do capital acumulado, como expressou na publicação *Sobre as reservas energéticas na natureza e seu aproveitamento em benefício da humanidade*, em que ele afirmava:

... temos constatado que debaixo da terra repousam reservas de carvão desde tempos remotos, depositados e acumulados com o crescimento das plantas então existentes sobre a terra, em espaços de tempo tão longos que, comparados com os períodos da história, estes últimos são infinitamente pequenos. A humanidade consome estas reservas agora e se comporta como herdeiros despreocupados. O homem consome energia como se esta fosse inesgotável (Martínez-Alier e Schlpmmann, 1992 apud Botero, 2000, pag.1).

Kelvin também se preocupava pela contaminação proveniente do consumo energético. Ele calculava que o consumo do carvão poderia acabar com o oxigênio nuns quantos séculos.

Baseado nos argumentos de Clausius, Podolinski foi um dos primeiros a estudar a relação da energia com a economia. Botero (2000) aponta que Podolinski, com sua agricultura energética, destacou o papel da eficiência energética com a sustentabilidade do sistema econômico. Segundo Botero (2000), a análise de fluxo energético de Podolinski foi usada posteriormente por vários autores, para desenvolver outras teorias. No início do século XX, vários estudiosos analisaram a relação de energia com economia, como Leopold Pfaundler (1902), Frederick Soddy (1929), entre outros, como aponta Martínez-Alier e Schlpmmann (1993) segundo Botero (2000). Pfaundler declarava que algumas das regiões do mundo estavam chegando à saturação e, portanto, era importante estudar a capacidade sustentadora da terra. Soddy aplicou as leis da termodinâmica ao sistema econômico e afirmava que a riqueza real estava presente num fluxo de energia solar que era consumida ao chegar à terra e que não podia ser realmente acumulada. Era uma energia acumulada em certos objetos, sujeita à Segunda Lei (Bejarano, 2004, pag.3).

Na década de 1970, a relação de energia e economia crescia fortemente, ocasionando a publicação de vários documentos. Entre os mais importantes, segundo Botero (2000), estava *The Entropy Law and the Economic Process*, escrito por Nicholas Georgescu-Roegen (1971), em que ele apresentava uma visão do processo econômico baseado na Física, Química e Biologia. Outro documento publicado na década de 1970 foi o livro *Limits to Growth*, um relatório do projeto do “*Club of Rome*” sobre a predição dos homens. O trabalho foi elaborado por um grupo do Instituto Tecnológico de Massachusetts - MIT , dirigido principalmente por D. Meadows, J. Randers e W. Behrens. Simmons (2000) afirma que as conclusões do estudo foram bastante simples. A primeira conclusão considerou que, se a presente tendência de crescimento (1972) continuasse sem modificações, o limite do crescimento que o planeta teria vivenciado poderia ser alcançado dentro dos próximos 100 anos (1970-2070). A segunda conclusão foi a de que a tendência de crescimento poderia ser alterada, se as modificações corretas fossem feitas e se o mundo estabelecesse uma condição de estabilidade ecológica que pudesse ser sustentável por muito tempo. E a terceira conclusão foi uma visão de que quanto mais logo esses esforços começarem, maior a chance de estabelecer a condição de estabilidade ecológica com sucesso. Os resultados do relatório ocasionaram uma onda de críticas e publicações como respostas.

Rosen e Dincer (2001) apontam que, a partir da década de 1980, os estudos relativos à relação energia e meio ambiente cresceram, tornando-se um tema de interesse mundial. Os resultados destes estudos mostravam que a produção de energia, os processos de conversão, o transporte e seu uso impactam o meio ambiente da terra, e que esses são associados com as emissões térmicas, químicas e nucleares, consequência dos processos que fornecem benefícios à humanidade. Os resultados dos diferentes estudos da relação energia e meio ambiente têm juntado extensos esforços em busca da implementação de métodos e tecnologias, para alcançar um desenvolvimento sustentável.

O conceito de desenvolvimento sustentável tem sido definido de várias formas. Rosen e Dincer (2001) afirmam que uma das definições mais citadas é a dada pelo Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (World Commission on Environment and Development) *Our Common Future*. Este relatório foi presidido pela Primeira-Ministra da Noruega, Sra. Brundtland e publicado em 1987. O relatório de Brundtland, como é conhecido, define desenvolvimento sustentável como: “[...] aquele que responde às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de responder às suas necessidades”.

Rosen e Dincer (2001) afirmam que, para alcançar um desenvolvimento sustentável, devem-se cumprir três fatores:

1. Satisfazer as necessidades e aspirações da sociedade;
2. Ser ecológica e ambientalmente favorável; e
3. Estarem disponíveis suficientes recursos humanos e naturais.

Rosen e Dincer (2001) identificam as onze maiores áreas de preocupações ambientais em que a energia provoca grande impacto, tais como: maiores acidentes ambientais, poluição da água, poluição marítima, uso da terra, radiação e radioatividade, eliminação do resíduo sólido, perigosos poluentes do ar, qualidade do ar ambiental, chuva ácida, buraco na camada de ozônio e mudança global do clima. Entre estes problemas ambientais, Dincer e Rosen (1999) definem que as maiores formas de problemas de poluição global se devem, principalmente, a atividades relacionadas aos processos energéticos e que são: chuva ácida, buraco na camada de ozônio e o efeito estufa (mudanças climáticas).

- A chuva ácida é produzida pela combustão de combustíveis fósseis, e pode ser transportada por grandes distâncias, através da atmosfera, e precipitada sobre a terra, onde se encontram ecossistemas extremamente vulneráveis à acidez excessiva. Dincer e Rosen (1999) especificam que a chuva ácida é, principalmente, atribuída às emissões de SO_2 e NO_x , e ultimamente as preocupações têm estado enfocadas também nas emissões de componentes orgânicos voláteis (ozônio, cloro e *trace metals*). Dincer e Rosen (1999) alistem alguns dos efeitos da chuva ácida, como: acidificação de lagos, rios e nascentes de água, danificando a vida aquática; dano a florestas e a áreas cultivadas; e ainda deterioração de materiais.
- Buraco na camada de ozônio: O ozônio localizado na estratosfera, a uns 12 a 25km de altitude, absorve as radiações ultravioletas (UV) e a radiação infravermelha, protegendo as coisas vivas na superfície da terra. Emissões de clorofluorcarbonetos, halógenos e NO_x e condições climáticas sobre a Antártica modificam e esgotam, regionalmente, a camada de ozônio presente na estratosfera. Dincer e Rosen (1999) denotam que as atividades relacionadas com energia são só parcialmente responsáveis pelas emissões que originam o esgotamento da camada de ozônio. As emissões ocasionadas pelos CFCs são a fonte principal deste problema ambiental. E estas substâncias podem ser encontradas nos fluidos de refrigeração utilizados em equipamentos de ar condicionado, assim como nas espumas isolantes e solventes industriais, entre outros. O buraco na camada de ozônio ocasionaria, mediante o

incremento dos níveis de radiação ultravioleta que alcançam a terra, a elevação das taxas de câncer de pele, dano nos olhos e perigo para várias espécies biológicas.

- Efeito estufa: Dincer e Rosen (1999) afirmam que o problema ambiental mais importante, quanto às atividades relacionadas à energia, é o efeito estufa ou mudança climática global. Mediante a geração, transformação e utilização da energia, o desmatamento de florestas e outras atividades antropogênicas têm provocado o incremento das concentrações dos gases efeito estufa na atmosfera, tais como, CO₂, CH₄, CFCs, halógenos, N₂O, ozônio e peroxiacetilnitrato. As altas concentrações destes gases capturam o calor emitido da superfície da terra, resultando num aumento da temperatura, que inclui a atmosfera mais baixa e a superfície dos oceanos. O Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC - segundo dados fornecidos pelo Observatório da Terra da NASA (Earth observatory – NASA), estima que o incremento da temperatura da superfície terrestre tem sido entre 0,4°C e 0,8°C. O aumento do nível do mar é outra consequência do aquecimento global, devido ao descongelamento das geleiras polares. Medidas do nível do mar, ao redor do mundo, mostram um aumento de 0,1 – 0,2mts, em relação ao século passado, segundo denota Weier (2002), do Observatório da Terra da NASA.

Para Jonh Weier a lógica dita que, como os países em desenvolvimento ampliarão suas economias e os países desenvolvidos consumirão mais energia, as concentrações de gases efeito estufa continuarão crescendo. Weier (2002) também declara que, embora não exista consenso global, a maioria de pesquisadores e organizações estimam que a temperatura média da superfície da terra aumentará conjuntamente com o aumento das emissões.

Segundo o Observatório da Terra da NASA, o IPCC estima que a temperatura da superfície da terra poderia aumentar entre 1,4°C e 5,8°C para o final do século XXI, e o NASA's Division reporta que se espera que, nos próximos 50 anos, a temperatura da superfície da terra aumente entre 0,5°C a 1°C. Weier (2002) lembra que estudos científicos passados tendem a predizer as futuras mudanças.

Na figura (5.1), mostra-se o incremento das concentrações dos três mais significantes gases efeito estufa - Metano, Dióxido de carbono e Óxido nítrico. Desde 1850, as concentrações de CH₄ aumentaram 125%, o CO₂, 30% e o N₂O, 15%. Na atualidade, essas taxas de incremento estão-se acelerando. O metano adicional na atmosfera tem incrementado a energia capturada pela atmosfera (chamada força de radioatividade), mediante 0,48 Watts por metro quadrado, o CO₂, 1,46 por m² e o N₂O, 0,15 Watts por m².

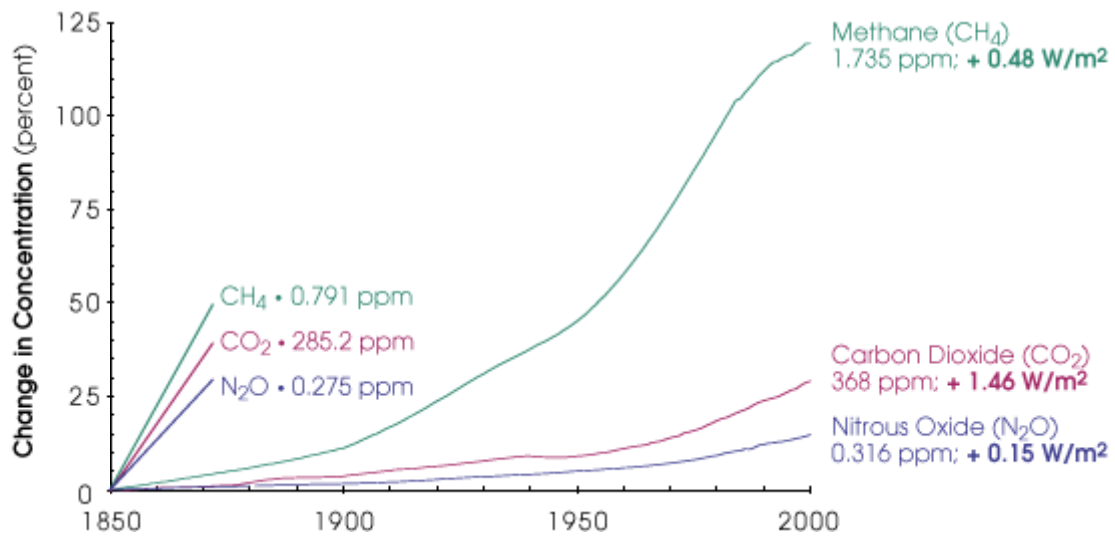


Figura 5.1 - Incremento das concentrações dos três mais significantes gases de efeito estufa
 Fonte: Robert Simmon, baseado nos dados do Goddard Institute for Space Studies

5.1 – EXERGIA COMO INDICADOR DE IMPACTO AMBIENTAL

Com o crescimento dos estudos baseados na relação de energia e meio ambiente, muitos pesquisadores sugeriram o emprego do conceito de exergia para quantificar e calcular os impactos sobre o meio ambiente devidos à utilização dos recursos energéticos. Rosen e Dincer (1997) afirmam que, embora a quantidade de estudos sobre a relação de energia e meio ambiente seja significativa, a relação de exergia meio ambiente não tem sido tão explorada. Uns dos primeiros estudos a respeito da exergia e o meio ambiente foram feitos por: Szargut (1980), Weptfer e Gaggioli (1980), Rosen (1986), Rosen e Scott (1987), Rosen et al. (1988), Erigcan and Dincer (1992), Crane et al. (1992), Valero e Arauzo (1991), Wall (1995), Gong e Wall (1977), Rosen e Dincer (1997), Cornelissen (1997), Ranz et al. (1998) e Makarytchev (1998).

Nos capítulos anteriores, se expressou exergia como trabalho ou como o potencial máximo de trabalho de um material ou forma de energia em relação ao seu meio ambiente, isto é, meio de referência. Neste capítulo, se define exergia como um importante indicador de impacto ambiental que expressa o impacto potencial dos fluxos exergéticos depositados no meio de referência, isto é, os gases de exaustão de uma turbina a gás. Como define Wall (2006), o conteúdo de exergia num fluxo poluidor pode ser entendido como o potencial desse

fluxo em provocar dano, isto porque ele ativa reações incontrolláveis no meio ambiente, causando processos físicos, como o aquecimento global e reações químicas, como o buraco na camada de ozônio. Em resumo, quanto mais exergia um fluxo resíduo possui, mais este fluxo se encontra longe de atingir seu equilíbrio com o meio ambiente e maior é o seu potencial para causar dano ao meio ambiente.

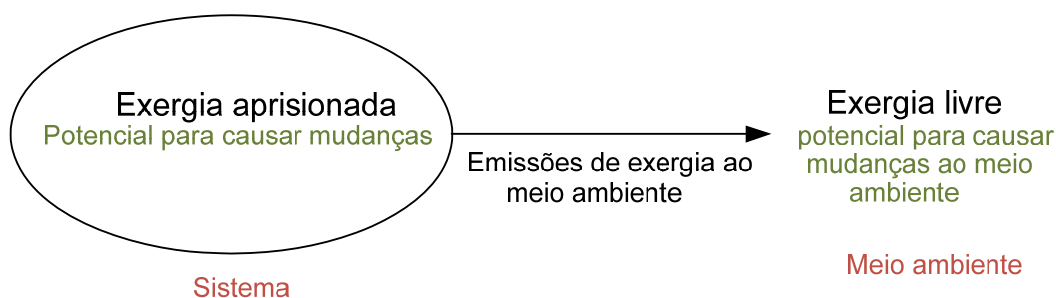


Figura 5.2 - Comparação de exergia aprisionada e exergia livre
 Fonte: *On exergy and environmental impact* (Rosen e Dincer 1997)

A figura (5.2) mostra como a exergia aprisionada num sistema representa um recurso e como a exergia quando é emitida ao meio ambiente, e ao tornar-se livre, se transforma em dano potencial a este meio.

Wall (2006) considera também a exergia como uma ferramenta essencial para a criação do novo paradigma de engenharia, em direção a um desenvolvimento sustentável, desde que se incluam obrigações morais e responsabilidade científica. Göran Wall tem desenvolvido estudos em diferentes sociedades sobre o uso da exergia como: *The Exergy Conversion in the Society of Ghana* (1978), *Exergy Conversion in the Swedish Society* (1981, revisada em 1986), *Exergy Conversion in the Japanese Society* (1990), *Exergy Use in the Swedish Society 1994* (1997) e em conjunto com E. Sciubba & V. Naso, *Exergy use in the Italian society*" (1994). Ele afirma que, por meio da contabilidade exergética dos recursos de energia e materiais, se tem uma base de quanto efetiva e balanceada uma sociedade está, em matéria de conservação dos recursos naturais, além de identificar áreas que precisam de melhoramentos técnicos, tudo isso em busca de sociedades mais sustentáveis.

Rosen e Dincer (1997) apontam três relações entre exergia e meio ambiente: destruição de ordem e criação do caos, degradação de recursos e emissões de resíduos.

- A destruição de ordem ou criação de caos - aponta Rose e Dincer (1997) - é uma forma de dano ambiental, em que entropia é uma medida de caos e exergia, uma medida de ordem. Um sistema com maior geração de entropia é mais caótico ou mais desordenado que um com

menor geração de entropia. E, relacionados a um mesmo sistema de referência, a exergia de um sistema mais ordenado é maior que a de um sistema caótico.

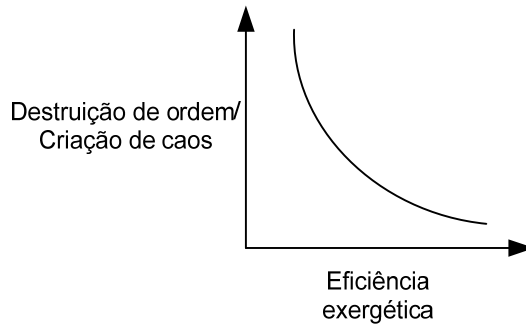


Figura 5.3 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a destruição de ordem/ criação de caos
Fonte: *On exergy and environmental impact* (Rosen e Dincer 1997)

- A degradação de recursos representa um dano ambiental. Os recursos, segundo Kestin (1980) - apontam Rosen e Dincer (1997) - é um material encontrado na natureza, ou criado artificialmente, que se encontra em desequilíbrio com o ambiente. Esses recursos possuem a composição - que pode aumentar seu valor exergético, mediante processos que consomem grandes quantidades de exergia - e a reatividade, que é o potencial de ocasionar mudanças. Para reduzir os impactos ambientais, associados com a degradação dos recursos, Rosen e Dincer (1997) descrevem dois enfoques: o primeiro, o aumento da eficiência, que ajuda a preservar a exergia, reduzindo a exergia necessária para um processo. E o segundo enfoque, o uso dos recursos externos - como a energia solar - em vez de degradar os recursos encontrados na natureza para satisfazer as demandas de exergia.

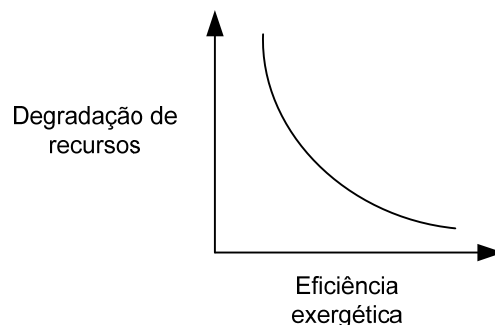


Figura 5.4 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a degradação de recursos
Fonte: *On exergy and environmental impact* (Rosen e Dincer 1997)

- A relação de emissão de resíduos ao ambiente está representada na figura 5.2, onde as emissões de resíduos podem ser vistas como um potencial para causar dano ambiental, como consequência da exergia dos resíduos. A respeito desta relação, Wall, G. (2005) aponta que as substâncias como combustíveis fósseis e metais, que se originam de depósitos na litosfera, não são selados e são espalhados no ambiente, exatamente ao contrário do que a natureza faz, armazenando-os em depósitos para criar melhores condições de vida.

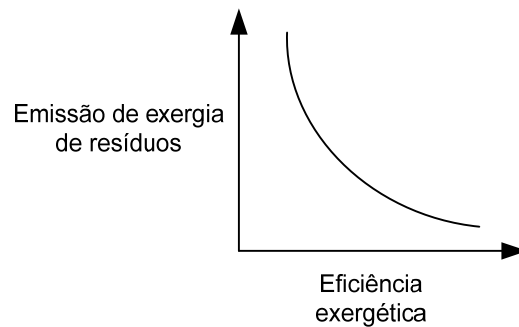


Figura 5.5 - Representação de como um decréscimo na eficiência exergética de um processo causa um incremento no relativo impacto ambiental, associado com a emissão da exergia dos resíduos
 Fonte: *On exergy and environmental impact* (Rosen e Dincer 1997)

5.1.1 – Métodos de análise ambiental

A análise de problemas ambientais tem desenvolvido diferentes métodos e, entre os mais populares, segundo Wall, G. (2006), está a avaliação de ciclo de vida - ACV, conhecida na língua inglesa como *life cycle assessment* – LCA. O desenvolvimento desta ferramenta progrediu, drasticamente, a partir de 1990, tendo como objetivo analisar os problemas ambientais associados com a produção, uso e disposição ou reciclagem dos produtos. Todo este processo é conhecido como “*do berço ao sepulcro*”.

Finnveden e Ostland (1997) apontam que, numa ACV, as cargas ambientais são associadas a um produto, processo ou atividade, mediante a identificação e quantificação dos materiais, e energia utilizada e dos resíduos lançados ao ambiente, cujos impactos ele avalia.

Uma ACV está dividido em diferentes etapas: a primeira é a definição da meta e do alcance; a segunda é a análise do inventário (balanços de materiais e energia); a terceira é a avaliação do impacto (classificação, caracterização e avaliação) e a última são as medidas (identificação, avaliação, conclusões e recomendações). Na figura (5.6), mostram-se as principais etapas de uma avaliação de ciclo de vida.

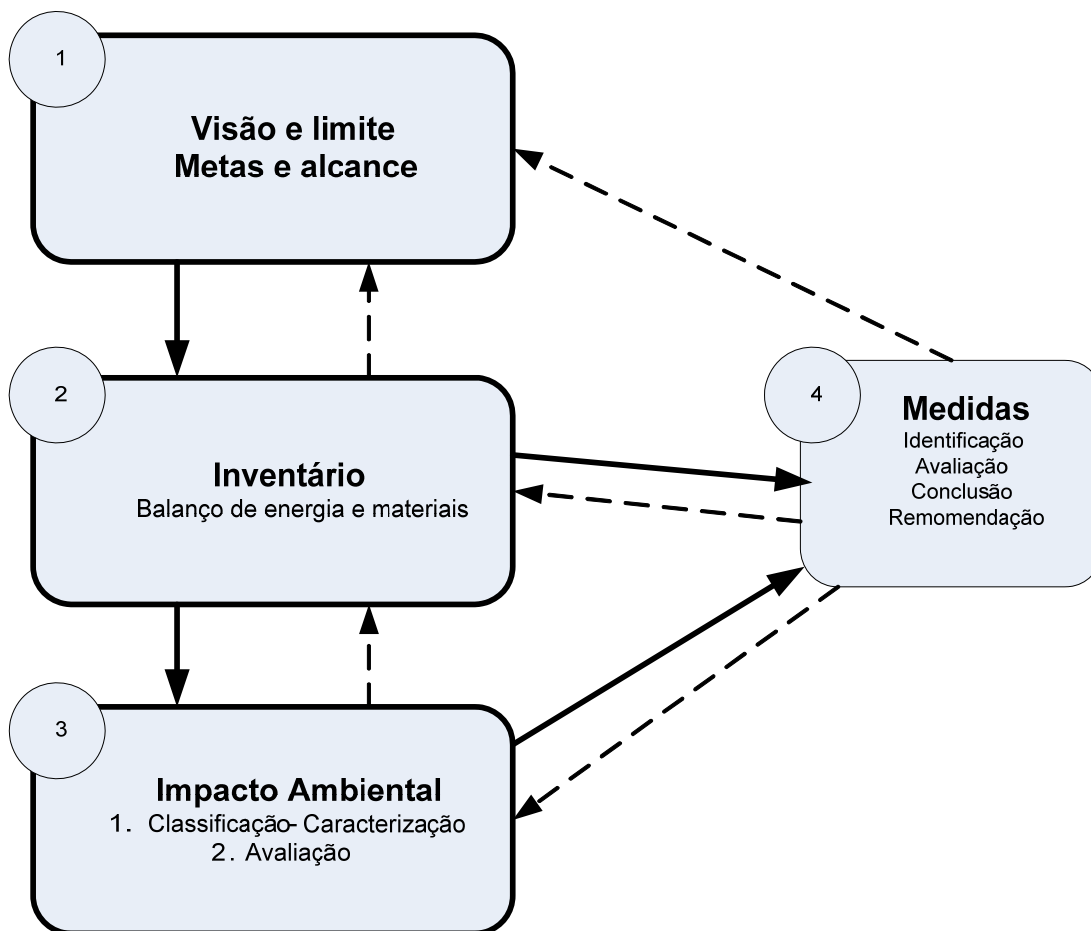


Figura 5.6 - Principais etapas de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)
Fonte: *Engineering Sustainability* (Wall, G. 2006)

A análise exérgica tem vários usos na avaliação de ciclo de vida. Finnveden e Osland (1997) afirmam que a análise exérgica, numa ACV, se usa como um forte indicador de impacto ambiental, e a exergia poderia ser usada, também, como uma medida do esgotamento e uso de recursos de materiais e de energia.

Segundo Wall, G. (2006), o enfoque multidimensional da ACV causa grandes problemas quando a análise compara diferentes substâncias. Para Wall, esse problema é evitado se for usado exergia como uma quantidade comum, como é feito na Análise Exérgica de Ciclo de Vida (AECV). Na AECV se faz distinção entre os recursos renováveis e não renováveis, e é importante quando se trata de desenvolver sistemas sustentáveis.⁴

⁴ Para um conhecimento mais aprofundado sobre exergia e ACV, se recomenda o artigo *Engineering Sustainable* (Wall 2006) - onde se explica o método AECV com dois exemplos ilustrativos - e o artigo de Daniel e Rosen (2002) - onde se apresenta, também, uma avaliação exérgica ambiental do ciclo de vida das emissões de vários automóveis e combustíveis.

5.2 – INDICADORES EXERGÉTICOS

Makarytchev, em seu artigo *Environmental Impact Analysis of ACFB-Based Gas and Power Cogeneration* (1998), apresentou três indicadores de impacto ambiental que, baseados no conceito de exergia, permitem avaliar de maneira não monetária as tecnologias de energia, com relação a seus impactos ambientais. Nesse estudo, Makarytchev desenvolveu uma avaliação dos impactos ambientais da geração de um gás combustível e potência elétrica a partir do carvão, mediante o conceito de evolução do ciclo de vida da exergia contida em vetores energéticos envolvidos no processo.

Makarytchev (1998) explica que os impactos ambientais de um processo podem ser quantificados, mediante indicadores que tomam em conta interações do processo com o ambiente humano e natural. Esses indicadores são a taxa de recurso “ $R_{rec.}$ ”, a eficiência ambiental “ η_{amb} ” e a taxa de poluição total “ R_{pol} ”.

Os impactos globais de um processo estão divididos em preparação de recursos e desativação dos resíduos ou rejeitos do processo. A preparação dos recursos envolve a exergia dos recursos naturais consumidos pelo processo industrial ou de conversão de energia (inclui a exergia do combustível, ar, água, etc.) e o trabalho requerido para a extração e preparação dos recursos. A desativação dos resíduos envolve a exergia dos resíduos (que inclui a exergia dos gases de exaustão, resíduos sólidos e emissões de calor), a exergia dos recursos naturais, adicionados durante a desativação do resíduo, e o trabalho relativo à sua remoção.

$\dot{B}_{rec.nat}$ = Valor exergético dos recursos naturais consumidos pelo processo

$\dot{W}_{prep.}$ = Trabalho requerido para a extração e preparação dos recursos naturais

$\dot{W}_{remoção}$ = Trabalho relacionado à remoção dos resíduos do processo

$\dot{W}_{produto}$ = Trabalho produzido ou exergia produto final do processo

$\dot{B}_{desat.}$ = Exergia dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos resíduos

A figura (5.7) ilustra as interações em um processo de conversão de energia e as quantidades usadas para a definição dos indicadores.

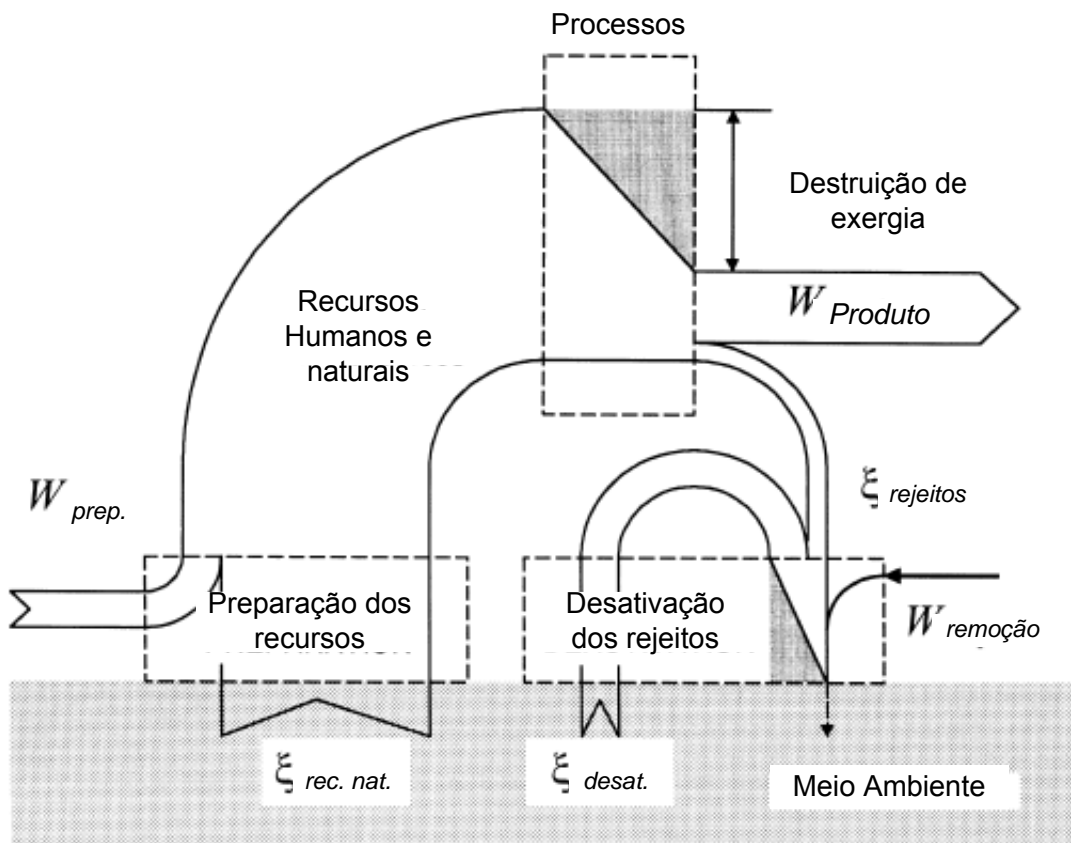


Figura 5.7 - Representação esquemática do impacto de um processo de conversão de energia sobre o meio ambiente⁵
 Fonte: Environmental impact analysis of ACFB-based gas and power cogeneration (Makarytchev 1998)

A taxa de recurso é o consumo total de recurso, e se define como a razão da exergia total dos recursos naturais e humanos consumidos e a exergia do produto final e/ou o trabalho produzido:

$$R_{\text{rec.}} = \frac{(\dot{B}_{\text{rec.nat.}} + \dot{W}_{\text{prep.}} + \dot{B}_{\text{desat.}} + \dot{W}_{\text{remoção}})}{\dot{W}_{\text{produto}}} \quad (5.1)$$

A eficiência ambiental do processo é inversa à taxa de recurso, e sempre é menor que a eficiência exergética:

$$\eta_{\text{amb.}} = \frac{\dot{W}_{\text{produto}}}{(\dot{B}_{\text{rec.nat.}} + \dot{W}_{\text{prep.}} + \dot{B}_{\text{desat.}} + \dot{W}_{\text{remoção}})} \quad (5.2)$$

⁵ Ler o símbolo ξ como valor exergético (B)

$$\eta_{amb.} = 1/(R_{rec.})$$

Quanto menor for a eficiência ambiental, maiores serão as interações do processo com o meio ambiente, porém maior será o impacto ambiental.

A taxa de poluição é um indicador de risco ambiental que caracteriza a destruição de exergia no ambiente, causado pela desativação dos resíduos do processo, e é definida como a razão entre a destruição de exergia e a exergia do produto final do processo.

$$R_{pol} = \dot{B}_R + \dot{B}_{desat.} / \dot{W}_{produto} \quad (5.3)$$

A taxa de poluição total pode ser decomposta, em termos da composição física e da composição química, pela divisão apropriada da exergia dos resíduos. A taxa de poluição física quantifica o efeito prejudicial da remoção dos resíduos, da temperatura e das pressões diferentes das do meio ambiente.

$$R_{pol,fisica} = \dot{B}_{R,fisica} + \dot{B}_{desat.,fisica} / \dot{W}_{produto} \quad (5.4)$$

A taxa de poluição química é a medida da capacidade do resíduo para reagir com os componentes do meio ambiente, enquanto atinge seu equilíbrio químico.

$$R_{pol,química} = \dot{B}_{R,química} + \dot{B}_{desat.,química} / \dot{W}_{produto} \quad (5.5)$$

Segundo Bejarano (2004), quando a taxa de poluição total é:

- $R_{pol.} \gg 1$ As emissões e resíduos dos processos provocam um grande impacto no ambiente;
- $R_{pol.} = 0$ Os processos são reversíveis e não causam impacto algum no meio ambiente; e
- $0 < R_{pol.} < 1$ Os processos apresentam um impacto ambiental em função das limitações tecnológicas dos processos de conversão de energia.

5.3 – ESTUDOS DE CASO

5.3.1 – Análise comparativa da LM-6000 com cinco plantas de geração de energia

A seguir, se faz uma análise comparativa dos indicadores exergéticos - definidos no artigo de (Makarytchev 1998) - eficiência ambiental e taxa de poluição global do sistema turbina a gás LM-6000, para as condições ambientais pré-estabelecidas e as variáveis termodinâmicas definidas, com cinco diferentes plantas de geração de energia. Os indicadores de impactos são comparados com quatro arranjos de uma planta de cogeração de uma indústria de celulose e papel e com uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo.

Os dados das cinco plantas de cogeração, utilizados na análise comparativa, foram obtidos do trabalho realizado por Bejarano (2004). Ele baseou-se na análise exergética do trabalho de Näsholm, Svedberg, Westermark (1993) - *Exergy Analysis of Biomass-Fired Cogeneration Plant and Paper Mill* - para os dados dos quatro arranjos da planta de cogeração de uma indústria de celulose e papel; e na análise exergética do trabalho de Rivero e Hernández (1996) - *Determinación de custos de producción de vapor y electricidad de una refinería, utilizando el método de exergía* - para os dados da planta de cogeração de uma refinaria de petróleo.

Escolharam-se essas plantas geradoras de energia porque todas elas se encontram dentro da mesma faixa de valores exergéticos de entrada, de saída e de exergia perdida e destruída, como se mostra na tabela (5.1).

A seguir se apresentam o balanço exergético, baseado na informação dos valores exergéticos da tabela (5.1), para:

1. Os quatro arranjos da planta de cogeração da indústria de celulose e de papel, apresentada no trabalho de Bejarano (2004): planta de cogeração de ciclo combinado, com secador de combustível; planta de cogeração de ciclo combinado, sem secador de combustível; planta de cogeração de ciclo combinado com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível e planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível;
2. a planta de cogeração da refinaria de petróleo, apresentada no trabalho de Bejarano (2004); e
3. a unidade turbina a gás LM-6000, apresentada neste trabalho.

Tabela 5.1 - Valores de exergia de entrada, de saída e destruição e perda de exergia para uma comparação da unidade LM-6000 com cinco arranjos de uma planta de cogeração

Planta	Exergia de Entrada (MW)	Exergia de Saída (MW)	Exergia perdida e destruída (MW)
Planta de cogeração de ciclo combinado, com secador de combustível	110,14	43,17	66,97
Planta de cogeração de ciclo combinado, sem secador de combustível	114,36	43,68	70,68
Planta de cogeração de ciclo combinado com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	102,62	30,68	71,94
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	107,44	31,16	76,28
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo	528,2	31,16	76,28
Planta termelétrica – UTE Rio Madeira, unidade LM-6000	105	38	67,22

Balanço exergético das plantas estudadas:

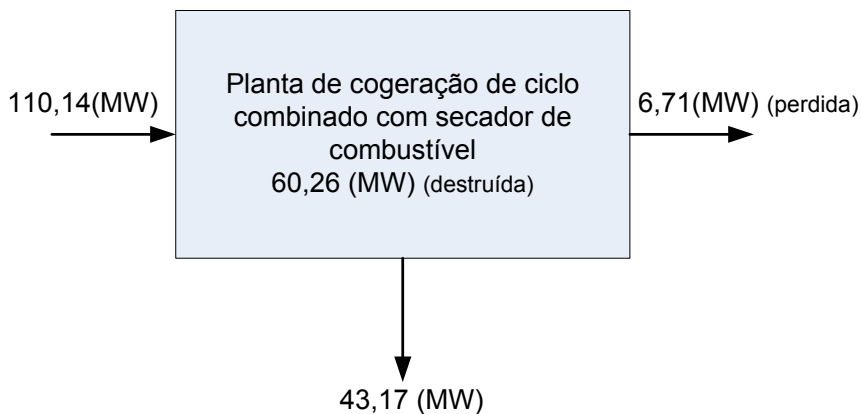


Figura 5.8 - Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado, com secador de combustível

Fonte: *Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia* (Bejarano 2004)

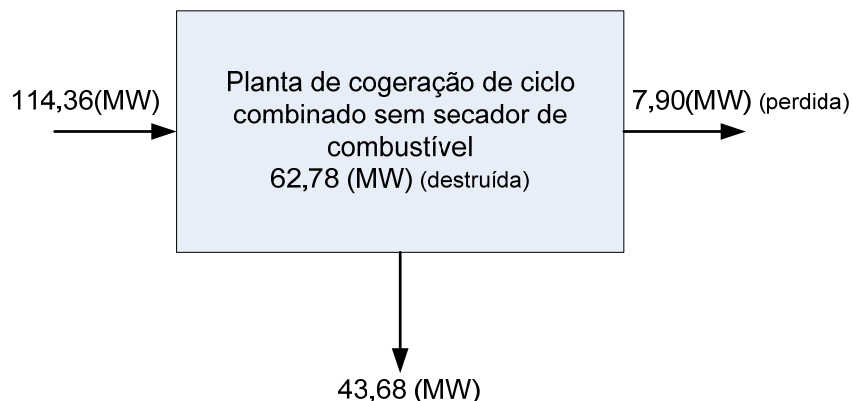


Figura 5.9 – Balanço exergético de uma planta de cogeração de ciclo combinado, sem secador de combustível

Fonte: Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia (Bejarano 2004)

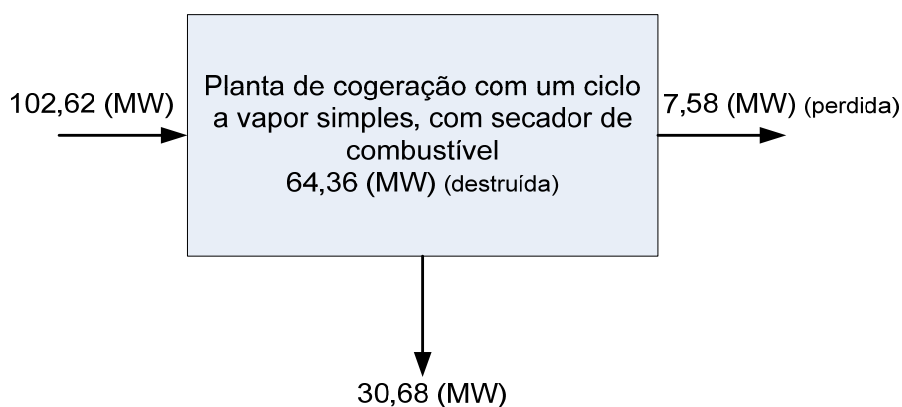


Figura 5.10 - Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível

Fonte: *Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia* (Bejarano 2004)

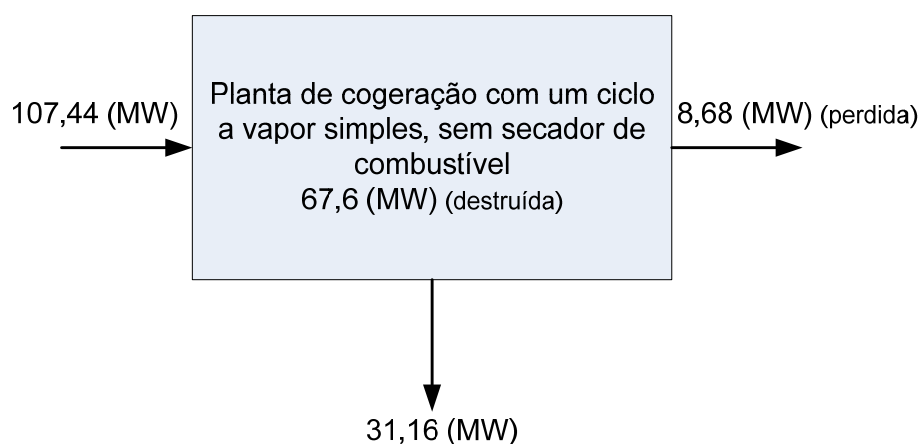


Figura 5.11 - Balanço exergético de uma planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível

Fonte: *Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia* (Bejarano 2004)

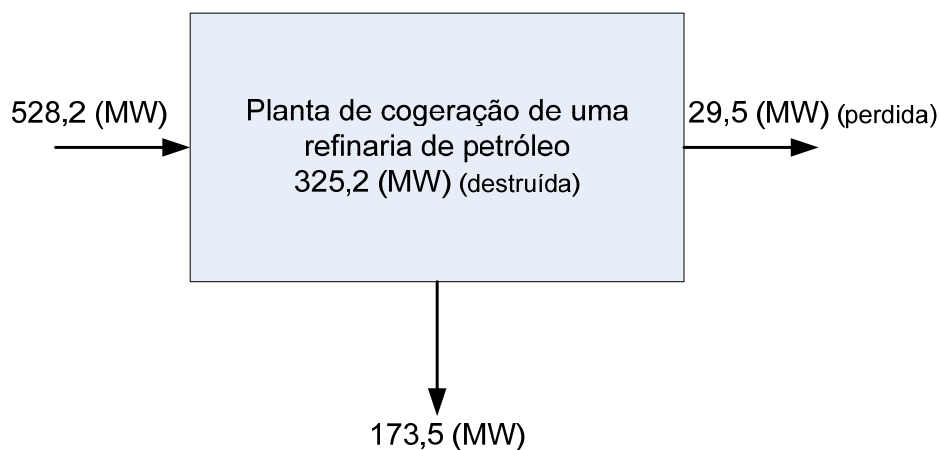


Figura 5.12 - Balanço exergético de uma planta de cogeração de uma refinaria de petróleo
 Fonte: *Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia* (Bejarano 2004)

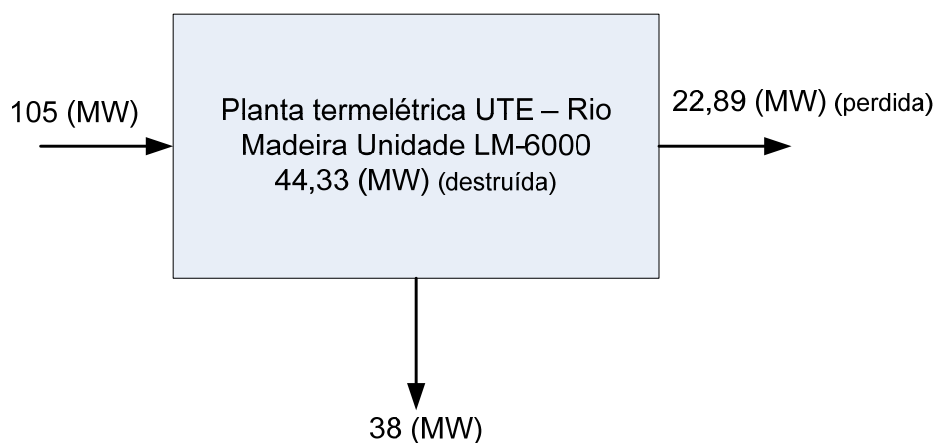


Figura 5.13 - Balanço exergético da usina termoeletrica UTE – Rio Madeira, sistema LM-6000

Mediante os resultados do balanço exergético, pode-se determinar a eficiência ambiental de cada planta, utilizando-se a equação (5.2); e a taxa de poluição global, usando-se a equação (5.3). Na tabela (5.2), se apresentam os resultados dos indicadores ambientais.

Tabela 5.2 - Valores da eficiência ambiental e da taxa de poluição global para as seis plantas de geração de energia

Planta	$\eta_{\text{ambiental}}$	R_{poluidor}
Planta de cogeração de ciclo combinado com secador de combustível	0,39	0,15
Planta de cogeração de ciclo combinado sem secador de combustível	0,38	0,18
Planta de cogeração de ciclo combinado com um ciclo a vapor simples, com secador de combustível	0,30	0,25
Planta de cogeração com um ciclo a vapor simples, sem secador de combustível	0,29	0,28
Planta de cogeração de uma refinaria de petróleo	0,33	0,17
Planta termelétrica – UTE Rio Madeira, unidade LM-6000	0,36	0,60

5.3.2 – Análise comparativa do sistema LM-6000 para os valores mínimos, médios e máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas

A seguir, se faz uma análise comparativa dos indicadores exergéticos, definidos no artigo de Makarytchev (1998), eficiência ambiental e taxa de poluição global, do sistema turbina a gás LM-6000, com as condições ambientais pré-estabelecidas e as variáveis termodinâmicas conhecidas (valores mínimos, valores médios e valores máximos) definidas na tabela (4.8).

Os resultados das respectivas análises exergéticas são mostrados na tabela (5.3), onde se apresentam a exergia de entrada, a exergia de saída e a exergia perdida e destruída das três opções de variáveis termodinâmicas conhecidas, do sistema LM-6000.

Tabela 5.3 - Valores de exergia de entrada, de saída e destruição e perda de exergia para uma comparação da unidade LM-6000, segundo os valores mínimos, médios e máximos das variáveis termodinâmicas

LM-6000	Exergia de Entrada (MW)	Exergia de Saída (MW)	Exergia perdida e destruída (MW)
Sistema LM-6000, com os valores mínimos das variáveis termodinâmicas conhecidas	100	38	62,64
Sistema LM-6000, com os valores médios das variáveis termodinâmicas conhecidas	105	38	67,22
Sistema LM-6000, com os valores máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas	109	38	71,82

A seguir, se apresentam os balanços exergeticos do sistema LM-6000 para os valores mínimos e os valores máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas (o balanço dos valores médios já foi apresentado na figura (5.13)).

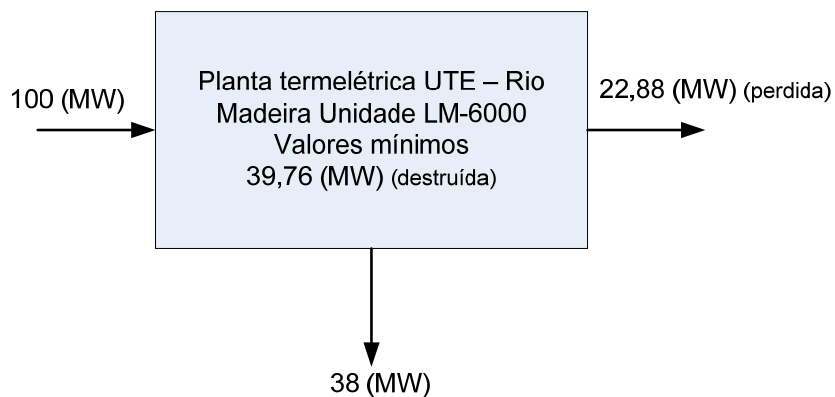


Figura 5.14 - Balanço exergetico da LM-6000 para os valores mínimos

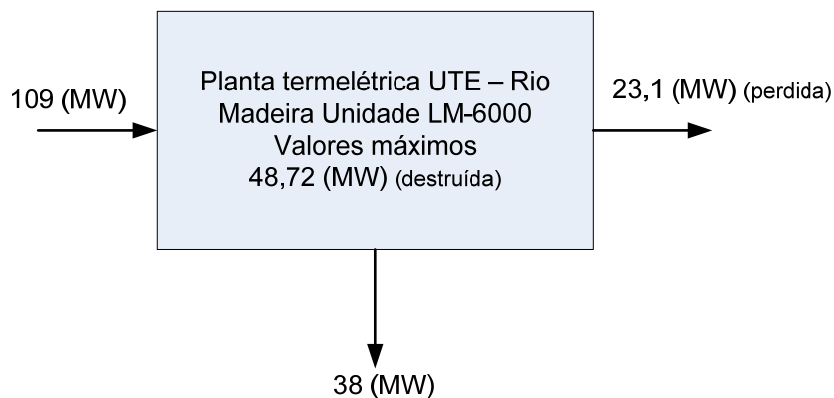


Figura 5.15 - Balanço exergetico da LM-6000 para os valores máximos

Mediante os resultados do balanço exergético, pode-se determinar a eficiência ambiental de cada planta, utilizando-se a equação (5.2); e a taxa de poluição global, usando-se a equação (5.3). Na tabela (5.4), se apresentam os resultados dos indicadores ambientais.

Tabela 5.4. - Valores da eficiência ambiental e da taxa de poluição global para os três valores de variáveis termodinâmicas conhecidas do sistema LM-6000

Planta	$\eta_{\text{ambiental}}$	R_{poluidor}
Sistema LM-6000, com os valores mínimos das variáveis termodinâmicas conhecidas	0,38	0,60
Sistema LM-6000, com os valores médios das variáveis termodinâmicas conhecidas	0,36	0,60
Sistema LM-6000, com os valores máximos das variáveis termodinâmicas conhecidas	0,35	0,61

5.3.3 – Análise de resultados

Para a primeira análise comparativa, o resultado parece indicar que o sistema LM-6000, da usina termoelétrica Rio Madeira, não obteve uma boa performance ambiental. Isto porque o sistema obteve o maior indicador de dano ambiental - taxa de poluição - de todas as plantas em estudo com R_{pol} (0,60), conforme se evidencia na tabela (5.2).

Este resultado era esperado, porque o sistema LM-6000 é um ciclo simples e as outras plantas geradoras estudadas são sistema de ciclo combinado. Num ciclo simples, como o representado na turbina LM-6000, não se aproveita o conteúdo exergético dos fluxos resíduos, rejeitando-os diretamente ao meio ambiente.

Este impacto pode ser minimizado se os resíduos do sistema LM-6000 foram aproveitados - como acontece nas plantas de cogeração de ciclo combinado estudadas – ou se o sistema realizar a desativação dos resíduos, que para o sistema são parte dos gases de combustão (fluxo 6).

A faixa dos valores das taxas de poluição, mostradas na tabela (5.2), indica que todos os processos estudados apresentam um impacto ambiental, em função das limitações tecnológicas dos respectivos processos.

A análise comparativa, também, mostra que a planta que causa menor impacto ambiental de todos os sistemas estudados é a planta de cogeração de ciclo combinado, com secador de combustível, que obteve a maior eficiência ambiental η_{amb} (0,39) e a menor taxa de poluição global R_{pol} (0,15).

A performance ambiental da LM-6000 é de η_{amb} (0,36), colocando-se um terceiro lugar, quantos aos valores de eficiência ambiental das plantas estudadas.

Vale ressaltar que, em nenhuma das plantas estudadas, foi possível considerar os dados referentes ao trabalho requerido para a extração e preparação dos recursos naturais (\dot{W}_{prep}); ao trabalho relacionado à remoção dos resíduos do processo ($\dot{W}_{remoção}$) e à exergia de desativação (\dot{B}_{desat}).

Para a obtenção da eficiência ambiental, só foram analisados, em todas as plantas, o trabalho produzido ou exergia do produto final e o valor exergético dos recursos naturais consumidos no processo. E como consequência, a eficiência ambiental, de todas as plantas estudadas, é igual a sua eficiência exergética. Segundo Makarytchev (1998), a eficiência ambiental sempre é menor que a eficiência exergética, isto porque outros fatores são tomados em consideração em seu cálculo (ver equação 5.2).

A segunda análise comparativa não mostra uma variação de dados muito significativa, isto porque não existe grande diferença entre os valores dos indicadores, para as diferentes opções estudadas do sistema LM-6000. Apesar disso, a análise mostra que as variáveis termodinâmicas da unidade LM-6000, que apresentam melhor performance ambiental, foram as variáveis termodinâmicas com os valores mínimos, que obtiveram a maior eficiência ambiental (η_{amb} (0,38)) e a menor taxa de poluição global (R_{pol} (0,60)). Esta taxa é a mesma apresentada pelas variáveis com os valores médios. Observa-se que os valores máximos das variáveis termodinâmicas apresentam a pior performance ambiental: a menor eficiência ambiental η_{amb} (0,35) e a maior taxa de poluição global R_{pol} (0,61).

6 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o conceito de exergia e suas técnicas, isto por meio do estudo de uma base teórica, desenvolvido por vários autores, e uma aplicação de conceitos em um estudo de caso.

O método de exergia é uma ferramenta termodinâmica, que cada vez mais é implementada e utilizada em estudos analíticos de sistemas energéticos e industriais, sejam de instalações novas ou das já existentes. Isto porque o método de exergia dá uma visão real do que acontece em cada processo, para as condições do estado de referência definidas. Este método gera informação que ajuda a melhorar a performance dos sistemas, a utilização eficiente dos recursos naturais e a conhecer os impactos ambientais que o processo causa ao meio ambiente. Como Tsatsaronis (1993) explica, a efetividade de melhorar a eficiência e reduzir os custos no *design* ou operação de um sistema energético aumenta, quando se entendem as causas reais de ineficiência e a fonte real de custos.

No capítulo 2 se desenvolveu uma análise bibliográfica relacionada com o conceito de exergia, cujos resultados reafirmaram o crescimento da implementação do método de exergia tanto no Brasil como no mundo, de forma significativa, especialmente nos últimos anos.

Mediante a análise exérgica se identificaram as causas, a localização e a magnitude das irreversibilidades e perdas exérgicas de cada componente do sistema. Com os resultados da eficiência exérgica, do consumo exérgico unitário, da destruição de exergia e das relações de destruição de exergia e perda de exergia, se avaliou a performance do sistema, segundo o enfoque termodinâmico. Estas variáveis servem, também, como fatores comparativos entre componentes do sistema e entre sistemas.

A método de cálculo de uma análise exérgica se resume nos seguintes passos:

1. Definir, primeiramente, o sistema e suas fronteiras, assim como o nível de agregação em que se deseja realizar a análise;
2. Definir as suposições nas quais a análise estará baseada, como também estabelecer o meio de referência;
3. Determinar as variáveis do meio de referência, assim como, também, as variáveis termodinâmicas do sistema a analisar;
4. Realizar um diagrama de fluxo do sistema, onde se definam as fronteiras e seu nível de agregação, assim como a função e direção dos fluxos em cada subsistema;
5. Calcular os componentes exérgicos de cada fluxo participante no sistema;

6. Definir o método de cálculo que se deseja utilizar – método matricial ou escalar;
7. Elaborar um balanço exerético em cada subsistema e calcular os respectivos fluxos Fuel, Produto e Resíduo. Se for o caso, elaborar a matriz de incidência Fuel, Produto e Resíduo, mediante as quais se poderá deduzir a matriz de incidência do sistema;
8. Calcular a destruição de exergia, a eficiência exerética e o consumo exerético unitário de cada subsistema, mediante a definição F-P;
9. Calcular as relações de destruição de exergia e de exergia resíduo, para, em conjunto com a eficiência exerética e a destruição de exergia, se avaliar a performance exerética de cada componente; e
10. Elaborar uma representação pictórica, para mostrar, claramente, a performance exerética do sistema e de cada componente.

A análise exericoeconômica identificou e localizou as fontes de custos do sistema, baseado, somente, no impacto devido ao custo do fluxo exerético do combustível externo (óleo diesel) utilizado atualmente na unidade LM-6000. A unidade apresenta a possibilidade de ser operada também, com mais dois tipos de combustível: gasoso (gás natural) e *dual* (líquido e gasoso), devido a este fato, se estabeleceu a importância da análise deste sistema já existente, baseado-se, somente, na variável custo combustível, para futuras análises comparativas.

Por meio dos resultados da análise exerética, pôde-se calcular o custo das ineficiências do sistema, como da destruição de exergia e das perdas ou fluxos Resíduos.

Os passos para uma análise exericoeconômica de um novo *design* são:

1. Desenvolver a análise exerética;
2. Calcular os custos, associados ao investimento ($\dot{Z}_{inv,k}$), operação ($\dot{Z}_{O,k}$) e manutenção ($\dot{Z}_{M,k}$) de cada componente; como também, o custo do combustível externo que entra no sistema;
3. Calcular a soma dos custos de capital de cada componente (\dot{Z}_k);
4. Definir o método de cálculo conveniente para o estudo. O método ECT - exergetic cost theory - ou o ME - método exericoeconômico;
5. Determinar o custo exerético e o custo exerético unitário de cada fluxo;
6. Calcular os custos termoeconômicos, custos exericoeconômicos unitários e custos termoeconômicos unitários de cada fluxo;
7. Calcular o custo da destruição de exergia em cada componente;

8. Calcular a diferença relativa de custos de cada subsistema. Deve-se prestar atenção ao k-componente, quando a diferença relativa de custo é alta e o capital de custo e a destruição de exergia são altos;
9. Calcular o fator exergoeconômico de cada componente, para identificar a maior fonte de custos (capital de investimento ou destruição de exergia); e
10. Fazer a análise de resultados.

Para sistemas já existentes, onde o capital de custo é considerado como zero e a análise se baseia, somente, no custo do combustível utilizado, os passos para o desenvolvimento da análise são:

1. Desenvolver a análise exérgica;
2. Determinar a posição do custo de operação e manutenção;
3. Obter o custo do combustível externo que entra ao sistema;
4. Definir o método de cálculo conveniente para o estudo. O método ECT - exergetic cost theory - ou o método ME – método exergoeconômico;
5. Determinar o custo exérgico e o custo exérgico unitário de cada fluxo;
6. Calcular os custos termoeconômicos, custos exergoeconômicos unitários e custos termoeconômicos unitários de cada fluxo;
7. Calcular o custo da destruição de exergia em cada componente;
8. Calcular a relação de combustível, para monitorar o comportamento do sistema;
9. Fazer a análise de resultados.

Ao realizar o estudo analítico do sistema LM-6000, mediante dois métodos de cálculo - o método exergoeconômico (ME), implementado por Tsatsaronis e Winhold (1985a) e o Exergetic Cost Theory (ECT), apresentado por Valero, Muñoz e Lozano (1986) - pode-se concluir que os dois métodos apresentam a mesma base teórica, fundamentada na contabilidade de custos.

O método ECT é uma metodologia de cálculo mais viável na aplicação de sistemas complexos. Sistemas que sejam formados por muitos componentes, fluxos; recirculação de fluxos e bifurcações; este método permite uma fácil implementação em programas de cálculo. Já o método exergoeconômico (ME) facilita o cálculo de variáveis em sistemas mais simples, como a unidade analisada neste trabalho.

A análise descreveu como o conteúdo exérgico de um fluxo pode ser um potencial de trabalho dentro de um sistema e como esse mesmo conteúdo pode-se tornar um potencial de dano, se aquele for rejeitado ao meio ambiente.

A análise ambiental, baseada no conceito de exergia, fornece uma consistente avaliação, não econômica, do consumo de recursos e das taxas de poluição ambiental. Mediante os indicadores apresentados no método de Makarytchev (1998), é possível comparar os resultados com vários sistemas energéticos.

Para realizar uma análise ambiental, baseada no conceito de exergia, se consideram os seguintes passos:

1. Realizar a análise exérgica e obter os resultados relativos a: exergia de entrada e exergia de saída do sistema total; destruição de exergia; exergia dos fluxos resíduos; o trabalho requerido para a extração e preparação dos recursos naturais; o trabalho relacionado à remoção dos resíduos do processo; o trabalho relacionado à remoção dos resíduos do processo e a exergia dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos resíduos;
2. Realizar um balanço exérgico dos fluxos participantes no sistema em seu máximo nível de agregação;
3. Calcular os indicadores exérgicos para a avaliação do sistema, a eficiência ambiental e a taxa de poluição; e
4. Analisar os resultados dos indicadores, avaliando sua performance ambiental, e comparar com outros sistemas energéticos.

Para futuros trabalhos, recomenda-se o desenvolvimento das mesmas análises, com as mesmas condições ambientais, avaliando outro tipo de combustível de entrada ao sistema, como, por exemplo, a utilização de gás natural - a unidade turbina a gás LM-6000 possui a adaptação necessária para a utilização desse combustível. Mediante esses resultados, pode-se analisar e concluir qual combustível obtém uma melhor performance termodinâmica, exergoeconômica e ambiental do sistema.

Outro ponto que deveria ser considerado é o aproveitamento do conteúdo exérgico do fluxo resíduo do sistema. Este, na atualidade, é rejeitado ao meio ambiente sem aproveitamento ou tratamento algum. A consequência deste fato se demonstra na performance ambiental da unidade e na baixa eficiência exérgica do componente LPT, do qual o fluxo Resíduo participa. Uma das opções viáveis para o aproveitamento desse conteúdo exérgico seria a instalação de uma caldeira de recuperação (HRSG – Heat Recovery Steam Generator) para a geração de vapor ou o acoplamento direto a um chiller de absorção.

Esta caldeira de recuperação poderia ser alimentada pelo fluxo de água de saída do sistema *chiller* – fluxo 12 (ver figura 4.3); o vapor gerado seria utilizado num novo sistema de turbina a vapor, acoplado à unidade LM-6000, ou utilizado para um fim industrial ou na

alimentação de um chiller de absorção – que pode ser operado por gás natural, aceite, “vapor” ou “calor residual”- para um sistema de refrigeração.

Neste caso o diagrama de fluxo do sistema poderia ficar da seguinte maneira:

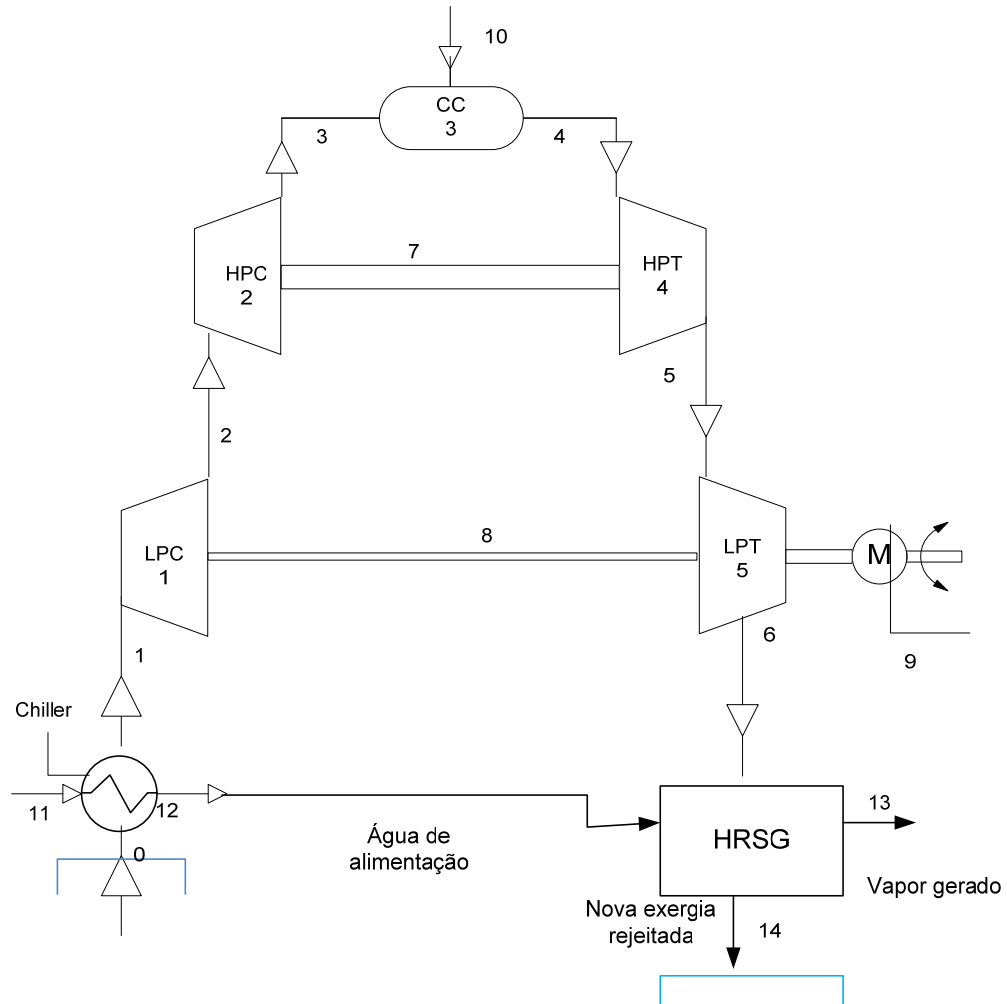


Figura 6.1 – Diagrama de fluxo do sistema LM-6000 com recuperação da exergia resíduo

No caso, da utilização de gás natural como combustível, poderia se injetar parte do vapor gerado no sistema de injeção de diluente na câmara de combustão que a unidade possui, este sistema permite a supressão do NOx produzido no processo de combustão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayres, R. U., Ayres, L. W. & Martinás, K. (1998). "Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis". *Energy*, vol. 23, no. 5, pp. 355-363.

Barbarini, A. T. "Clausius, Rudolf (1822-1888)" Informação encontrada em <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/clausius.htm>

Bejan, A., Tsatsaronis, G. & Moran, M. (1996). "Thermal Design and optimization". A Wiley – Interscience publication, John Wiley and Sons, Inc.

Bejarano, M. C. H. (2004). "Indicadores Exergéticos para Avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia". Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – departamento de engenharia mecânica.

Bennett, C. "Julius Robert von Mayer (1814-1878)" Dados biográficos". Informação encontrada em <http://www.usd.edu/phys/courses/phys300/gallery/clark/vonmayer.html>.

Botero, G. E. (2000); "Valoración Exergética de Recursos Naturales. Minerales, Agua y Combustibles Fósiles". Tesis de doctorado, Universidad de Zaragoza, departamento de ingeniería mecánica.

Carnot, S. (1824). "Reflections on the Motive Power of Fire and On Machines Fitted to Developed that Power". Traduzido e editado por R.H. Thurston.

Carnot, Sadi." *Encyclopædia Britannica*. 2006. *Encyclopædia Britannica Online*. September. 2006 <http://www.britannica.com/eb/article-9359862>

Clausius, R. "Clausius, Rudolf." *Encyclopædia Britannica*. 2006. *Encyclopædia Britannica Online*. setembro 2006 <<http://www.britannica.com/eb/article-9024255>>.

Connelly, L. & Koshland, C. P. (2001a). "Exergy and industrial ecology. Part 1: An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution". *Exergy, as International Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 146-165.

Connelly, L. & Koshland, C. P. (2001b). "Exergy and industrial ecology. Part 2: An non dimensional analysis of means to reduce resource depletion". *Exergy, as International*

Journal, vol. 2, pp. 283-294.

Cornelissen, R. L. (1994). “Bibliography on Exergy Analysis and Related Techniques – 1985-1994”. University of Twente, Department of Mechanical Engineering, Energy Technology Group – London.

Daniel, J. e Rosen, M. A. (2002). “Exergetic environmental assessment of life cycle emissions for various automobiles and fuels”. Exergy, as International Journal, vol. 1, no. 4, pp. 234-255.

Dincer, I. e Rosen, M. A. (1999); “Energy, environment and sustainable development”. Applied energy, vol. 64, pp. 427-440.

Dincer, I., Cengel, Y. (2001). “Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering”. Entropy 2001, vol. 3, pp. 116-149, ISSN 1099-4300. Artigo encontrado em www.mdpi.org/entropy/

Faculdade de Engenharia Mecânica – Unicamp; “Joule, James Prescott (1818-1189)” Informação encontrada em <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/joule.htm>

Ferraz, F. B. M. “Clapeyron, Benoit-Paul-Emile (1799-1864)- Dados biográficos”. Informação encontrada em <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/claper.htm>.

Ferreira, O. C. (1999). “ANÁLISE EXERGÉTICA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA”. Economia & Energia, ano III, no. 12, Janeiro/Fevereiro 1999. Artigo encontrado em <http://www.ecen.com/eee12/ecen12p.htm>.

Carabett, V. K. “ Carnot, Nicolas Leornad Sadi (1796-1832)– Dados biográficos”. Informação encontrada em <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/person/carnot.htm>

Finnveden, G. e Ostland, P. (1997). “Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications”. Energy vol. 22, no. 9, pp. 923-931.

Furtado, A. (2003). “Crise Energética e Trajetórias de Desenvolvimento Tecnológico”. Brasil em Desenvolvimento, Ciclo de seminários 2003. Brasil

General Electric (2003). “LM6000 PA Series Gas Turbine” GE Industrial AeroDerivative Gas Turbine, GEK98493 Operation and Maintenance, vol. I & II, Chg. 5, 30 May 2003 EK98494.

- Kim, Y. S. (1983). "Clausius's endeavor to generalize the second law of thermodynamics". Arch. Internat. Hist. Sci. 33 (111) (1983), 256-273.
- Kotas, T. J. (1985). "The Exergy Method of Thermal Plants Analysis". Krieger publishing company, florida, edição original 1985, reimprimido em 1995, Florida, USA.
- Logrado, C. L. (2000). "Análise e Otimização Termoeconômica de Turbinas a Gás e Ciclos Combinados" Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, UnB – Faculdade de Engenharia Mecânica. Brasil
- Lozano, M. A. e Valero, A. (1986). "Determinación de la Exergia para Sustancias de Interés Industrial" Universidade de Zaragoza, Ingeniería Química. Marzo 1986, pp. 119-128. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>
- Lozano, M. A., Serra, L. e Valero, A. (1993). "Análises Termoeconomico de um Sistema de Cogeneración" Universidad de Zaragoza. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>
- Lozano, M. A., Valero, A. e Guallar, J. (1989). "Teoría del coste exergético, I. Conceptos básicos". Universidad de Zaragoza, departamento de ingeniería mecánica. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>
- Makarytchev, V. S. (1998). "Enviromental impact analysis of ACFB-based gas and power cogeneration". Energy, vol.23, no. 9, pp. 711-717, 1998 Elsevier Science Ltda.
- Nascimento, C. et al. (2004). "Reflexões sobre a Contribuição da Carnot à Primeira Lei da Termodinâmica". Quím. Nova, vol.27, no.3, pp. 513-515. São Paulo May/June 2004. Brasil
- Rezac, P. e Metghalchi, H. (2004). " A Brief Note on the Historical Evolution and Present State of exergy Analysis". International Journal Exergy, vol. 1, no. 1, pp. 426 – 437.
- Rodríguez, R. et al. (1990). "Terminología para la aplicación del método de Exergia". Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Plantas Industriales I. M. P. Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. A.C. Septiembre-Octubre de 1990. México
- Rodriguez, J. M. L. (2005). "Exergia Principios Básicos" Revista Capacita, no.1, janeiro 2005, artigo encontrado em <http://www.i-turbomaquinas.com/imagenes/revista-capacita.pdf>.
- Wall, G., Gong, M. (1997). "On Exergetics, Economics and Desalination". Artigo encontrado

em <http://www.exergy.se/goran/pdf.html>

Rosen, M. A. e Dincer, I. (1997). “On exergy and environmental impact”. *International Journal of energy research*, vol. 21, pp. 643-654.

Rosen, M. A. e Dincer, I. (2001). “Exergy as the confluence of energy, environmental and sustainable development”. *Exergy, as International Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 3-13.

Shapiro, A. H. (1979). “Joseph Henry Keenan”. *Memorial Tributes: National Academy of Engineering, Volume 1 (1979)*, pp. 149-152. National Academy of Engineering. USA

Simmons, M. R. (2000). “Revisiting the Limits of Growth – Could the club of Rome Have Been Correct, After All?”. Simmons & Company International.

Tsatsaronis, G. & Winhold, M. (1985a). “Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy –Conversion plants – I. A New general Methodology”. *Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 69-80. Imprimido em USA.

Tsatsaronis, G. & Winhold, M. (1985b). “Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy –Conversion plants – II. A Analysis of a Coal-Fired Steam Power Plant”. *Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 81-94. Imprimido em USA

Tsatsaronis, G. (1993). “Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy System”. *Prog. Energy Combustion Science*, vol. 19, pp. 227-257. Imprimido em Inglaterra.

Valero, A. “Termoeconomía”. Fundación Circe, Universidad de zaragoza. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A. e Arauzo, I. (1991). “Exergy outcomes associated with the greenhouse effects”. *AES – vol.25, Second Law Analysis – Industrial and Environmental Applications*. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A. e Torres, C. (2000). “Curso de Doctorado – Termoeconomía”. Fundação Circe, Universidade de Zaragoza. Livro encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A. Guallar, J. e Muñoz, M. (1987). “The exergetic cost and related concepts: an application to a simple cogeneration plant”. *ASME. Second Law Analysis of Thermal Systems*. Eds. M.J. Moran and E.Sciubba, ASME Book No. I00236, pp. 123-130. New York,

1987. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A., Lozano, M.A. e Muñoz, M.. (1986). “A General Theory of Exergy Saving. I. On the exergetic cost”. ASME. AES, Vol. 2-3. Computer-Aided Engineering and Energy Systems. Vol. 3: Second Law Analysis and Modelling. Ed. R.A. Gaggioli, ASME Book No. H0341C, pp. 1-8. New York, 1986. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A., Muñoz, M. e Lozano, M.A. (1986). “A General Theory of Exergy Saving II. On the Thermo-economic Cost”. ASME. AES, Vol. 2-3 Computer-Aided Engineering and Energy Systems. Vol. 3: Second Law Analysis and Modelling. Ed. R.A. Gaggioli, ASME Book No. H0341C, pp. 9-16. New York, 1986. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A., Serra, L. e Uche, J (2000). “Fundamentals of Thermo-economics”. EURO Summer Course on Sustainable Assessment of Clean Air Technologies Fundación, lectures 1-3 Circe, Universidad de Zaragoza. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>.

Valero, A., Torres, C. e Lozano, M.A. (1989). “On the unification of thermo-economics theories”. ASME. HTD, Vol. 124 Simulation of Thermal Energy systems. Eds. R.F. Boehm and Y.M. El-Sayed, ASME Book No. H00527, pp. 63-74. New York, 1989. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Valero, A., Valero, A. e Arauzo, I. (2006). “ Exergy as an indicator for resources scarcity. The exergy loss of Australian mineral capital, a case study”. Proceeding of IMECE2006, ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Artigo encontrado em <http://circe.cps.unizar.es/>

Wall, G. (1977). “Exergy: A useful concept within resources accounting”. Göteborg: Institute of Theoretical Physics, report no. 77-42; ISBN 99-0342612-7. Artigo encontrado em <http://www.exergy.se/goran/pdf.html>

Wall, G. (1986). “Exergy, A Useful Concept”. Doctoral thesis – Chalmers University of Technology and University of Goteborg, Physical Resource Theory Group, ISBN 91-7032-269-4. Artigo encontrado em <http://www.exergy.se/goran/pdf.html>

Wall, G. (1993). “Bibliography on Exergy”, artigo encontrado em <http://www.exergy.se/goran/pdf.html>

Wall, G. (1998). “Exergetics”. livro encontrado em <http://www.exergy.se/goran/pdf.html>

Wall, G. (2005). “ Exergy capital and sustainable development”. Proceeding of the Second International Exergy, Energy and Environmental Symposium, paper no. XII-149. Artigo encontrado em <http://www.exergy.se/goran/pdf.html>

Wall, G. (2006). “Engineering Sustainability”. Inaugural presentation at the 8th Liege Conference, Belgium 2006, Materials for Advanced Power Engineering 2006, pp. 5-24, ISBN 3-89336-436-6. Artigo encontrado em <http://www.exergy.se/ftp/es.pdf>

Weier, J. (2002). “Global Warming”. Earth Observatory – NASA, artigo encontrada em <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/GlobalWarming/warming.html>

Wall, G., Gong, M. (2001). "On Exergy and Sustainable Development, Part I: Conditions and Concepts" Exergy An International Journal, Vol. 1, No. 3, <http://www.exergyonline.com>. Artigo encontrado em <http://www.exergy.se/ftp/es.pdf>

APÊNDICES

APÊNDICE A – BIBLIOGRAFIA MUNDIAL SOBRE O CONCEITO DE EXERGIA E TÉCNICAS RESPECTIVAS, DESDE 1993 ATÉ 2005

Tabela A.1 - Bibliografia sobre exergia, 1993 - 2005

- A. Razani / B. Flake / S. Yarbrough; (2004) "Exergy Flow in Pulse Tube Refrigerators and Their Performance Evaluation Based on Exergy Analysis". AIP Conference Proceedings, 2004, vol. 710, pp. 1508-1518. ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC. 2004
- A. Razani / C. Dodson / B. Flake / T. Roberts; (2005) "The Effect of of Phase-shifting Mechanisms on the Energy and Exergy Flow in Pulse Tube Refrigerators" - AIP conference Vol.823, pp. 1572-79. 2005
- Abbassi, A/ Aliehyaei,M; (2004) "Exergy method of optimisation of a wavy plate indirect evaporative cooler". JN: International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 350-362. 2004
- Abdallah, H. / Facchini, B. / Danes, F. / De Ruyck, J; (1999) "Exergetic optimization of intercooled reheat chemically recuperated gas turbine". Energy Conversion and Management, vol. 40, Issue 15-16, 1999, 1679- 1686. 1999
- Acar, H. I; (1997) "Second law analysis of the reheat-regenerative rankine cycle". Energy Conversion and Management, Volume 38, Number 7, May 1997, pp. 647-657. 1997
- Adamo, L. / Cammarata, G. / Fichera, A. / Marletta, L; (1997) "Improvement of a district heating network through thermoeconomic approach". Renewable Energy, vol. 10, Issues 2-3, 1997, pp. 213-216. 1997
- Adell,A/Gromb,S; (1994) "Calculation of heat dissipation due to poor thermal conduction inside a solar collector". JN:Journal of Power Sources (ch), vol. 50:3, pp.391-94. Montpellier Univ.-2 (France). 1994
- Aerts, R/ Wagendorp, T/ November, E/Behailu, M/Deckers, J/Muys, B; (2004). "Ecosystem Thermal Buffer Capacity as an Indicator of the Restoration Status of Protected Areas in the Northern Ethiopian Highlands". Restoration Ecology, Vol. 12, No. 4, 2004, pp. 586-596. 2004
- Afgan, N. / Carvalho, M.G; (1993) "Boiler efficiency assessment expert system". Second international conference on combustion technologies for a clean environment, pp. 38.4.20-38.4.24. Technical University of Lisbon. 1993
- Aguera Soriano, J. Exergetic optimization of diameter of piper in thermal power plants. JN: Energia (Madrid), vol. 5, pp. 75-81. Universidad de Cordoba, Cordoba (Spain). 1994
- AKPINAR, E.K / BICER, Y; (2005) " Investigation of Heat Transfer and Exergy Loss in a Concentric Double Pipe Exchanger Equipped with Swirl Generators". International Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 598-607, 2005
- Akpinar, E.K; (2004) "Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer". International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 31, Issue 8, pp. 1165-1176. 2004
- AKPINAR, E.K/ MIDILLI, A/ BICER, Y; (2005) "Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer.and exergy of potato drying Process Via Cyclone Type Dryer and Mathematical Modeling". Energy Conversion and Management, 2005, pp. 2530-2552. 2005
- Akpinar, E.K/ MIDILLI, A/ BICER, Y; (2005) "Thermodynamic analysis of the apple drying process". Proceedings of the I MECH E Part E Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 219, No. 1, 2005, pp. 1-14. 2005
- Alasfour, F.N. / Darwish, M.A. / Bin Amer, A.O; (2005) "Thermal analysis of ME—TVC+MEE desalination systems". Desalination, vol. 174, Issue 1, pp. 39-61. 2005
- Albuquerque, A.G; (2005) "Avaliação exergética dos efluentes do processo industrial do álcool", Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), USP - 2005.
- Alderden, M.P./ Alderden, W.M; (1993) "The determination of process efficiency by means of the exergy method". JN: Proces Technologie (nl), vol. 3:10, pp. 19 -23. Technische Univ. Twente, Enschede (Netherlands). 1993
- Aldo Ramos Santos; (2001) "Análise Termoeconômica do Processo de Transformação Química do Fosfogesso em Torta Carbonatada ou Torta Hidróxido". - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/11/2001
- ALEX MANZALI VIEIRA; (2003) "ANÁLISE EXERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL"- mestrado. Universidade federal de minas gerais - ciencias técnicas nucleares. 01/12/2003
- Al-Muslim, H. / Dincer, I. / Zubair, S.M; (2005) "Effect of reference state on exergy efficiencies of one- and two-stage crude oil distillation plants". International Journal of Thermal Sciences, vol. 44, Issue 1, p.p 65-73.
- Alpuche, M. G. et al; (2005) "Exergy analysis of air cooling systems in buildings in hot humid climates". Applied Thermal Engineering, 2005, 25, (4), pp. 507–517.
- Alpuche, M.G. / Heard, C. / Best, R. / Rojas, J; (2005) "Exergy analysis of air cooling systems in buildings in hot humid climates". Applied thermal Engineering, vol. 25, issue 4, pp. 507-517. 2005
- Al-Sofi M.A.K/ Srouji M.M; (1995) "Fuel allocation in dual-purpose plants". Desalination, Volume 100, Number 1, January 1995, pp. 65-70. 1995

- Al-Sulaiman, F.A./ Ismail B; (1995) "Exergy analysis of major recirculating multi-stage flash desalting plants in Saudi Arabia". *Desalination*, Volume 103, Number 3, December 1995, pp. 265-270. 1995
- Alvarado, S/ Alguerno, J/ Auracher, H/ Casali, A (1998); "Energy-exergy optimization of comminution". *Energy*, Volume 23, Number 2, February 1998, pp. 153-158. 1998
- Alvarado, S / Gherardelli, C (1994); "Exergoeconomic optimization of a cogeneration plant". *JN: Energy (Oxford)*, vol.19:12, pp. 1225-1233. Chile University, Dept. of Mechanical Engineering. 1994
- Alvarado, S. / Gherardelli, C (1994); "Input-output exergo-economic optimization of multicomponent-multiproduct systems methodology". *Energy*, vol. 19, Issue 2, 1994, pp. 251-258. 1994
- Alves, L.G. / Nebra, S.A (2004); "Basic chemically recuperated gas turbines—power plant optimization and thermodynamics second law analysis". *Energy*, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2385-2395. 2004
- André Luiz Barcellos Junior (2003); "Análise Termoeconômica de Coletores Solares Planos" -Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/08/2003
- Andreev, L.P./ Nikul'shin, V.R (1993); "Generalized algorithm for thermodynamic analysis of power engineering systems". *JN: Theoretical Foundations of Chemical Engineering (USA)*, vol.26:3, pp. 371-74. 1993
- Anheden, M/ Svedberg, G (1998); "Exergy analysis of chemical-looping combustion systems". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 16, 1998, pp. 1967-1980. 1998
- Anikeev, V.I (1997); "Exergetic analysis of biomass gasification for co-production of methanol and energy". *Fuel and Energy abstract*, vol. 38, no. 2, 1997, pp. 76. 1997
- Antonio Carlos Brandão de Araújo (2002); "Análise Exergética como Ferramenta para Otimização do processo de Destilação" -mestrado. Universidade federal de campina grande - eng. Química 01/10/2002
- Antonio Garrido Gallego (1998); "Sistemas de Refrigeração a partir da Cogeração - Análise e simulação de propostas para o caso de cervejarias utilizando gás natural" - mestrado. Universidade metodista de Piracicaba - eng em produção. 01/05/1998
- Antônio Pantalena (1997); "Cogeração para Laticínios de Pequeno e Médio Porte"- mestrado. Universidade paulista Júlio de mesquita filho- Mestrado. engenharia mecanica. 01/08/1997
- Apaiah, R.K. / Linnemann, A.R. / van der Kooi, H.J (2004); "Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chains". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved - ScienceDirect. 2004
- Apra, C. / Greco, A (2002); "An exergetic analysis of R22 substitution". *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, Issue 13, 2002, pp. 1455-1469. 2002
- Apra, C/ Mastrullo, R/ Renno, C (2004); "An analysis of the performances of a vapour compression plant working both as a water chiller and a heat pump using R22 and R417A". *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, Issue 4, pp. 487-499. 2004
- Apra, C/ Mastrullo, R/ Renno, C (2004); "Fuzzy control of the compressor speed in a refrigeration plant". *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, Issue 6, pp. 639-648. 2004
- Apra, C/ Renno, C (2004); "Experimental comparison of R22 with R417A performance in a vapour compression refrigeration plant subjected to a cold store". *Energy Conversion and Management*, vol. 45, Issue 11-12, pp. 1807-1819. 2004
- Apra,C/ de Rossi, F/ Greco, A/Renno, C (2003); "Refrigeration plant exergetic analysis varying the compressor capacity". *International Journal of Energy Research*, vol. 27, Issue 7, pp. 653-669. 2003
- Arcaklioglu, E. / Cavusoglu, A. / Erisen, A (2005); "An algorithmic approach towards finding better refrigerant substitutes of CFCs in terms of the second law of thermodynamics". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issues 9-10, pp. 1595-1611. 2005
- Asada, H/ Boelman, E.C (2004); "Exergy analysis of a low temperature radiant heating system". *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 25, No. 3, 2004, pp. 197-209. 2004
- Au, S.F/ McPhail, S.J/ Woudstra, N/ Hemmesk (2003); "The influence of operating temperature on the efficiency of a combined heat and power fuel cell plant". *Journal of Power Sources*, vol. 122, no. 1, 2003, pp. 37-46. 2003
- Au, S.F/ Woudstra, N/ Hemmesk (2003); "Study of multistage oxidation by flowsheet calculations on a combined heat and power molten carbonate fuel cell plant". *Journal of Power Sources*, vol. 122, no. 1, 2003, pp. 28-36. 2003
- Ayoub M. Kazim (2004); "Exergetic efficiency of a PEM electrolyser at various operating temperatures and pressures". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 47 - 59. 2004
- Ayres, R.U (1998); "Eco-thermodynamics: economics and the second law". *Ecological Economics*, Volume 26, Number 2, August 1998, pp. 189-209. 1998
- Ayres, R.U. / Ayres, L.W. / Warr, B (2003); "Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998". *Energy*, vol. 28, Issue 3, pp. 219-273. 2003
- Ayres, R.U. / Warr, B (2005); "Accounting for growth: the role of physical work". *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 16, Issue 2, pp. 181-209. 2005

- Ayres, R.U/ Ayres, L.W/ Martinás, K (1998); "Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis". *Energy*, vol. 23, Issue 5, 1998, pp. 533-363. 1998
- Badescu, V (2002); "First and second law analysis of a solar assisted heat pump based heating system". *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No.18, 2002, pp. 2539-2552.
- Badescu, V (2003); "Model of a thermal energy storage device integrated into a solar assisted heat pump system for space heating". *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 10, 2003, pp. 1589-1604. 2003
- Bakshi, B. R (2000) "A thermodynamic framework for ecologically conscious process systems engineering". *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 24, Issues 2-7, 2000, Pages 1767-1773. 2000
- Balkan, F. et al (2005); "Performance evaluation of a triple-effect evaporator with forward feed using exergy analysis". *JN: International Journal of Energy Research*, 2005, vol. 29, (5), pp. 455-470.
- Barclay, F.J (2005); "Thermodynamic performance study of an integrated gasification fuel cell combined cycle – an exergy analysis". *Proceedings of the IMECH E Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 219, No. 5, 2005, pp. 395-396. 2005
- Bargigli, S/ Raugei, M/ Ulgiati, S (2004); "Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes". *Energy*, vol. 29, Issue 12-15, pp. 2145-2159. 2004
- Barreda del Campo, E. R/ Araujo da Gama Cerqueira, S.A / Nebra, S.A (1998); "Thermoeconomic analysis of a Cuban sugar cane mill". *Energy Conversion and management*, vol. 39, Issues 16-18, 1998, pp. 1773-1780. 1998
- Bascetincelik A/ Ozturk H.H/ Paksoy H.O/ Demirel Y (1999); "Energetic and exergetic efficiency of latent heat storage system for greenhouse heating". *Renewable Energy*, Volume 16, Number 1, 4 January 1999, pp. 691-694. 1999
- Bastianoni S/ Marchettini N (1997); "Energy/exergy ratio as a measure of the level of organization of systems". *Ecological Modelling*, Volume 99, Number 1, 16 June 1997, pp. 33-40. 1997
- Bastianoni, S. / Pulselli, F.M. / Rustici, M. (2005); "Exergy versus energy flow in ecosystems: Is there an order in maximizations?" Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved - ScienceDirect.
- Beccali, G. / Cellura, M. / Mistretta, M (2003); "New exergy criterion in the "multi-criteria" context: a life cycle assessment of two plaster products". *Energy Conversion and Management*, vol. 44, Issue 17, pp. 2821-2838. 2003
- Bedbak, S.S. / Ram Gopal, M (2005); "Performance analysis of a compressor driven metal hydride cooling system". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, Issue 10, 2005, pp. 1127-1137. 2005
- Bedringås, K.W/Ertesvåg,I. S/ Byggstøyl, S/Magnussen, B.F (1997); "Exergy analysis of solid-oxide fuel-cell (SOFC) systems". *Energy*, vol. 22, Issue 4, 1997, pp. 403-412. 1997
- Bejan A/ Dan N (1997); "Maximum work from an electric battery model". *Energy*, Volume 22, Number 1, January 1997, pp. 93-102. 1997
- Bejan, A (1997); "Advanced Engineering Thermodynamics". New York: John Wiley and sons Inc. 1997
- Bejan, A (2001); "Thermodynamic optimization of geometry in engineering flow systems". *Exergy*, Volume 1, Number 4, 2001, pp. 269-277. 2001
- Bejan, A. / Siems, D.L (2001); "The need for exergy analysis and thermodynamic optimization in aircraft development". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 1, 2001, pp. 14-24. 2001
- Bejan, A/ Dan,N/Cacuci, D.G/Schütz, W (1998); "Exergy analysis of energy conversion during the thermal interaction between hot particles and water". *Energy*, vol. 23, Issue 11, 1998, pp. 913-928. 1998
- Bejan, A/ Lorente, S (2005); "Constructal theory of energy-system and environment flow configurations". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.4 pp. 335 – 347.
- Bejan, A/ Rocha, L.A.O/ Lorente, S (2000); "Thermodynamic optimization of geometry: T- and Y-shaped constructs of fluid streams". *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 39, Number 9, 2000, pp. 949-960. 2000
- Bejan, A/Tsatsatonis,G/Moran,M (1996); "Thermal Design and optimization" New York: John Wiley and sons Inc. Duke University/Technische Universität Berlin/The Ohio State University. 1996
- Ben Ezzine, N/Barhoumi, M/Mejbri, K/Bellagi, A (2005); "Irreversibilities in two configurations of the double generator absorption chiller: Comparison of performance". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 80, No. 2, 2005, pp. 471-475. 2005
- Bendoricchio G/ Jorgensen S.E (1997); "Exergy as goal function of ecosystems dynamic". *Ecological Modelling*, Volume 102, Number 1, 15 October 1997, pp. 5-15. 1997
- Bernard S.L/ Luchtel D.L/ Glennly R.W/ Lakshminarayan S/ Millan M.I/ Hernandez F/ Martin E (1996); "Available solar exergy in an absorption cooling process". *Solar Energy*, Volume 56, Number 6, June 1996, pp. 505-511. 1996
- Berthiaume, R. / Bouchard, C. / Rosen, M.A (2001); "Exergetic evaluation of the renewability of a biofuel". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 4, 2001, pp. 256-268. 2001
- Best, R., Islas, J., Martinez, M (1993); "Exergy Efficiency of an Ammonia Water-Absorption System for Ice Production". *Applied Energy*, Vol. 45, No. 3, pp. 241-256//Exergy, Ammonia, Water, Ice. 1993

- Bettagli N.; Bidini G (1996); "Larderello-farinello-valle secolo geothermal area: exergy analysis of the transportation network and of the electric power plants". *Geothermics*, Volume 25, Number 1, February 1996, pp. 3-16. 1996
- Bianciardi, C/ Ulgiati, S (1998); "Modelling entropy and exergy changes during a fluid self-organization process". *Ecological Modelling*, Volume 110, Number 3, 22 July 1998, pp. 255-267. 1998
- Bidini G/ Grimaldi C.N/ Postriotti L (1997); "Thermodynamic Analysis of Hydraulic Aircompressor-gas Turbine Power Plants". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Volume 211, Number 5, 1 December 1997, pp. 429-437. 1997
- Bilgen, E (2000); "Exergetic and engineering analyses of gas turbine based cogeneration systems". *Energy*, vol. 25, Issue 12, 2000, pp. 1215-1229. 2000
- Bilgen, E/ Takahashi, H (2002); "Exergy analysis and experimental study of heat pump systems". *Exergy*, vol. 2, no. 4, pp. 259-265 2002
- BILGEN, S/KAYGUSUZ, K/ SARI, A (2004); "Second Law Analysis of Various Types of Coal and Woody Biomass in Turkey". *Energy Sources*, Volume 26, 2004, pp. 1083-1094. 2004
- Bisio G (1988); "A second-law analysis of the "hot blast stove/gas turbine" combination by applying the parameter "usable exergy"". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 3, February 1998, pp. 217-227.
- Bisio, G / Benvenuto, G (1993); "Possible utilization of the pressure exergy of natural gas". 28th intersociety energy conversion engineering conference, vol. 2, pp. 2.167 - 2.173. 1993
- Bisio, G (1994); "Diesel engine and closed cycle gas turbine with the exploitation of LNG physical exergy". 29th Intersociety energy conversion, engineering conference: Technical papers. Part 2, pp. 944-950. 1994
- Bisio, G (1993); "Analysis of possibilities of thermal energy recovery from furnace molten slags with reducing environmental pollution". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 731-38. University of Genoa (Italy). 1993
- Bisio, G (1994); "The possible utilization of low-temperature waste energy linked with the exploitation of LNG physical exergy". 29th Intersociety energy conversion engineering conference, pp. 1537-1542. 1994
- Bisio, G (1993); "Second Law analysis of thermal energy storage". 28th intersociety energy conversion eng. conference. Vol. 2, pp. 2.155 2.160. University of Genoa (Italy). 1993
- Bisio, G (1996); "First- and second-law analyses of energy recoveries in blast-furnace regenerators". *Energy*, vol. 21, Issue 2, 1996, pp. 147-155. 1996
- Bisio, G. / Bosio, A. / Rubatto, G (2002); "Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air". *Energy Conversion and Management*, vol. 43, Issue 18, 2002, pp. 2589-2600.
- Bisio, G. / Rubatto, G (2001); "Comparing hydraulic and polytropic efficiencies with exergy efficiency". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 3, 2001, pp. 193-201. 2001
- Bisio, G. / Tagliafico, L (2002); "On the recovery of LNG physical exergy by means of a simple cycle or a complex system". *Exergy, an International Journal*, vol. 2, Issue 1, pp. 34-50. 2002
- Bisio, G/ Bisio, A (1998); "Some thermodynamic remarks on photosynthetic energy conversion". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 8, 1998, pp. 741-748. 1998
- Bisio, G/ Devia, F (2002); "Some thermodynamic remarks on non-equilibrium fluid stream". *Exergy*, vol. 2, no. 4, 2002, pp. 352-360. 2002
- Bonnet, S. / Alaphilippe, M. / Stouffs, P (2005); "Energy, exergy and cost analysis of a micro-cogeneration system based on an Ericsson engine". Copyright © 2005 Elsevier SAS All rights reserved - ScienceDirect. 2005
- Borchiellini, R. / Massardo, A.F. / Santarelli, M (2000); "Analytical procedure for carbon tax evaluation". *Energy Conversion and management*, vol. 41, Issue 14, 2000, pp. 1509-1531.
- Borelli, S. J.S (2005); "Método para a análise da composição de custo da eletricidade gerada por usinas termelétricas em ciclo combinado a gás natural". Universidade de São Paulo, USP- 2005.
- Borgert, J.A/ Velasquez, J.A (2004); "Exergoeconomic optimisation of a Kalina cycle for power generation". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 18 - 28. 2004
- Borgett Júnior, J.A (2003); "Otimização Exergoeconômica de Ciclos de Absorção para geração de Potência". Tese de mestrado, eng. Mecânica, PUCPR-2003, Brasil.
- Botero García, E (2000); "Valoración Exergética de recursos Naturales, Minerales, Agua y Combustibles Fósiles". Tesis doctoral, Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, 2000.
- Bram S/ De Ruyck J (1997); "Exergy analysis tools for ASPEN applied to evaporative cycle design". *Energy Conversion and Management*, Volume 38, Number 15, October 1997, pp. 1613-1624. 1997
- Brodyansky, V.M. / Sorin, M.V. / P. le Goff (1994); "The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization", Elseviers Science B.V. 1994
- Brodyansky, V.M./ Bandura, A.V (1993); "The prognosis for macroeconomical development and exergy". *Proceedings of ENSEC '93*, pp 153-160. Moscow Energetic Institute and Kiev Politechnical Institute. 1993
- Brown, D. / Marechal, F. / Paris, J (2005); "A dual representation for targeting process retrofit, application to a pulp and paper process". *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, Issue 7, pp. 1067-1082. 2005

- Bruckner, T./ Morrison, R./ Handley, C/ Patterson, M (2003); "High-Resolution Modeling of Energy-Services Supply Systems Using deeco: Overview and Application to Policy Development". *Annals of Operations Research*, Vol. 121, No. 1-4, 2003, pp. 151-180. 2003
- Budiman, A/ Ishida, M (2004); "A new method for disclosing internal phenomena in a distillation column by use of material-utilization diagram". *Energy*, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2213-2223. 2004
- Cadenas, R (1999); "Residual steam to energy: a project for Los Azufres geothermal field, Mexico". *Geothermics*, Volume 28, Number 3, 1999, pp. 395-423. 1999
- Caio de Paulo Leite (2003); "Seleção de Centrais Termoeletricas Utilizando Gás Natural e Bagaço de Cana" - Universidade de são Paulo - eng mecanica. 01/04/2003
- Calise, F. / Palombo, A. / Vanoli, L (2005); "Design and partial load exergy analysis of hybrid SOFC-GT power plant". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- ScienceDirect. 2005
- Call, F.W (2002); "thermodynamic analysis of a beer engine". *Exergy, An International Journal*, Vol. 2, Issue 3, 2002, Pages 147-151. 2002
- Camargo, J.R. / Ebinuma, C.D. / Silveira, J.L (2003); "Thermoeconomic analysis of an evaporative desiccant air conditioning system". *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, Issue 12, 2003, pp. 1537-1549. 2003
- Camdali, U. / Tunc, M (2003); "Exergy analysis and efficiency in an industrial AC electric ARC furnace". *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, Issue 17, pp. 2255-2267. 2003
- Çamdali, Ü/Tunç, M (2004); "Thermodynamic Analysis of Some Industrial Applications with Variable Ambient Conditions". *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 6, 2004, pp. 1965-1979. 2004
- Campos Ferreira, O (1999); "EXERGETIC ANALYSIS OF THE AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEM". *Economic and Energy*, year III, no. 12, 1999, associate researcher FAPEMIG. 1999
- Can, A/ Buyruk, E/ Eryermer, D (2002); "Exergoeconomic analysis of condenser type heat exchangers". *Exergy*, Vol. 2, No. 2, 2002, pp. 113-118. 2002
- Candau, Y (2003); "On the exergy of radiation". *Solar Energy*, vol. 75, Issue 3, pp. 241-247. 2003
- Cardona, E. / Piacentino, A (2004); "Optimal design of cogeneration plants for seawater desalination". *Desalination*, vol. 166, pp. 411-426. 2004
- CARLOS ALMIR MONTEIRO DE HOLANDA (2003); "Simulação e Análise Energética e Exergética de um Refrigerador Doméstico" - doutorado. Universidade federal de paraíba - eng mecânica. 01/02/2003
- Carlos Humberto Mora Bejarano (2004); "INDICADORES EXERGÉTICOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DE PROCESSOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA" - mestrado. Universidade de são paulo- eng mecânica. 01/02/2004
- CARLOS RENATO FRANÇA MACIEL (2004); "ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA CENTRAL TERMELÉTRICA" - mestrado. Pontificio universidade católica de minas gerais- neg. Mecânica. 01/12/2004
- CARLOS VICENTE GOULART DE AZEVEDO (1996); "ANALISE EXERGETICA DO CICLO DO URANIO COMBUSTIVEL, ETAPA INTERMEDIARIADE DE OBTENCAO DO UF6". mestrado. Universidade federal de minas gerais- ciências técnicas nucleares. 01/12/1996
- Casarosa, C. / Donatini, F. / Franco, A (2004); "Thermoeconomic optimization of heat recovery steam generators operating parameters for combined plants". *Energy*, vol. 29, Issue 3, pp. 389-414. 2004
- Castillo F.J.L/ Dhole V.R (1995); "Pressure analysis of the ethylene cold-end process". *Computers and Chemical Engineering*, Volume 19, Supplement 1, 11 June 1995, pp. 89-94. 1995
- Caton, J.A (2000); "On the destruction of availability (exergy) due to combustion processes — with specific application to internal-combustion engines". *Energy*, vol. 25, Issue 11, 2000, pp. 1097-1117. 2000
- CELINA MARIA RIBEIRO VARANI (2001); "Avaliação Energética e Exergética de uma Unidade de Refrigeração por Absorção Água Brometo de Lítio - utilizando Gás Natural" - Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA/JOÃO PESSOA - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/12/2001
- Celso Eduardo Tuna (1999); "Um Método de Análise Exergoeconômica para Otimização de Sistemas Energéticos". - Doutorado. UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/GUARAT. - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/05/1999
- Celso Shiguetoshi Tanabe (1997); "Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - ENGENHARIA AGRÍCOLA. 01/09/1997
- Cengel Y.A / Wood B/ Dincer I (2002); "Is bigger thermodynamically better?". *Exergy*, Volume 2, Number 2, 2002, pp. 62-68. 2002
- Çengel, Y.A (2002); "Examining the merging and splitting processes in daily life in the light of exerg". *Exergy, an International Journal*, vol. 2, Issue 3, pp. 128-134. 2002
- Çengel, Y.A (1996); "A Unified and Intuitive Approach to Teaching Thermodynamics". *ASME International Congress and Exposition*. 1996

- Cerci, Y (2003); "Performance evaluation of a single-flash geothermal power plant in Denizli, Turkey". *Energy*, Vol. 28, Issue 1, pp. 27-35. 2003
- Cerci, Y (2002); "Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California". *Desalination*, vol. 142, Issue 3, pp. 257-266. 2002
- Cervantes, J.G. / Torres-Reyes, E (2002); "Experiments on a solar-assisted heat pump and an exergy analysis of the system". *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, Issue 12, pp. 1289-1297. 2002
- CEYLAN, H/ OZTURK, H/ HEPBASLI, A/ UTLU, Z (2005); "Estimating Energy and Exergy Production and Consumption Values Using Three Different Genetic Algorithm Approaches, Part 1: Model Development". *Energy Source*, vol. 27, Issue 7, 2005, pp. 621-627. publisher: Taylor and Francis Ltd. 2005
- CEYLAN, H/ OZTURK, H/ HEPBASLI, A/ UTLU, Z (2005); "Estimating Energy and Exergy Production and Consumption Values Using Three Different Genetic Algorithm Approaches. Part 2: Application and Scenarios". *Energy Source*, vol. 27, Issue 7, 2005, pp. 629-639. publisher: Taylor and Francis Ltd. 2005
- Chan, S.H. / Low, C.F. / Ding, O.L (2002); "Energy and exergy analysis of simple solid-oxide fuel-cell power systems". *Journal of Power Sources*, vol. 103, Issue 2, pp. 188-200. 2002
- Chang, H (2001); "Exergy Analysis and Exergoeconomic Analysis of An Ethylene Plant". *Journal Sci Eng*, 2001.
- Chang, H. / Chuang, S.-C (2003); "Process analysis using the concept of intrinsic and extrinsic exergy losses". *Energy*, vol. 28, Issue 12, pp. 1203-1228. 2003
- Chang, H/ Li, J.W (2005); "A new exergy method for process analysis and optimization". *Chemical Engineering Science*, vol. 60, Issue 10, pp. 2771- 2784. 2005
- Chejne, F. / Restrepo, J.A (2003); "New rules for the exergo-economic optimization methodology". *Energy*, vol. 28, Issue 10, 2003, pp. 993-1003. 2003
- Chejne, F/ Florez, W/ Ordonez, J/Botero, E (2001); "Exergoeconomic analysis of systems". *Journal of Thermal Engineering*, vol. 48, Issue 1, 2001, pp. 80-85. 2001
- Chen L.; Wu C.; Sun F (2001); "Effect of heat transfer law on the finite-time exergoeconomic performance of a Carnot refrigerator". *Exergy*, Volume 1, Number 4, 2001, pp. 295-302. 2001
- Chen, B and Chen, G.Q (2005); "Exergy analysis for resource conversion of the Chinese Society 1993 under the material product system" - Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved. ScienceDirect, Peking University. 2005
- Chen, B. / Chen, G.Q. / Yang, Z.F (2005); "Exergy based resource accounting of china" - ScienceDirect. Peking University and Peking Normal University. 2005
- Chen, C.K/ Su, Y.F (2005); "Exergetic efficiency optimization for an irreversible Brayton refrigeration cycle". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, issue 3, pp. 303-310. 2005
- Chen, C-K/ Su, Y-F (2005); "Application of exergy method to an irreversible inter-cooled refrigeration cycle". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Number A8, 2005, pp. 661-667. 2005
- Chen, G.Q (2005); "Exergy consumption of the earth". *Ecological Modelling*, vol. 184, Issue 2-4, pp. 363-380. 2005
- Chen, G.Q (2004); "Scarcity of exergy and ecological evaluation based on embodied exergy" - ScienceDirect, Peking University. 2004
- Chen, J. / Chen, X. / Wu, C (2001); "Optimization of the rate of exergy output of a multi-stage endoreversible combined refrigeration system". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 100-106. 2001
- Chen, L. / Sun, F. / Wu, C (2004); "Maximum-profit performance for generalized irreversible Carnot-engines". *Applied Energy*, vol. 79, issue 1, pp. 15-25. 2004
- Chen, L. / Sun, F. / Wu, C (2005); "Thermo-economics for endoreversible heat-engines". *Applied Energy*, vol. 81, Issue 4, pp. 388-396. 2005
- Chen, L. / Wu, C. / Sun, F (2001); "Effect of heat transfer law on the finite-time exergoeconomic performance of a Carnot refrigerator". *Exergy, An International Journal*, vol. 1, Issue 4, 2001, pp. 295-302. 2001
- Chen, L. / Zhu, X. / Sun, F. / Wu, C (2005); "Exergy-based ecological optimization of linear phenomenological heat-transfer law irreversible Carnot-engines". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- ScienceDirect. 2005
- Chen, L/ Wang, W/ Sun, F/ Wu, C (2004); "Power and efficiency analysis of an endoreversible closed intercooled regenerated Brayton cycle". *JN: International Journal of Exergy (IJEX)* 2004, Vol. 1, No. 4, pp. 475-494. 2004
- Chen, L/Xiaoqin, Z/Sun, F/Wu, C (2005); "Ecological optimization for generalized irreversible Carnot refrigerators". *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 38, Number 1, 7 January 2005, pp. 113-118. 2005
- Chen, Q.L/ Yin, Q.H/ Hua, B (2002); "An exergoeconomic approach for retrofit of fractionating systems". *Energy*, vol. 27, Issue 1, 2002, pp. 65-75. 2002
- Chen. Q.L/ Yin, Q.H/ Wang, S.P/ Hua, B (2004); "Energy-use analysis and improvement for delayed coking units". *Energy*, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2225-2237. 2004
- Chengqin, R. / Nianping, L. / Guangfa, T (2002); "Principles of exergy analysis in HVAC and evaluation of evaporative cooling schemes". *Building and Environment*, vol. 37, Issue 11, pp. 1045-1055. 2002

Chih, W. / Lingen, C. / Fengrui, S (1998); "Effect ZOF heat transfer law on finite-time exergoeconomic performance of carnot heat pump". *Energy Conversion and Management*, vol. 39, issue 7, 1998, pp. 579-588. 1998

Choi, H.S. / Lee, T.J. / Kim, Y.G. / Song, S.L (2005); "Performance improvement of multiple-effect distiller with thermal vapor compression system by exergy analysis". Presented at the Conference on Desalination and the Environment, Italy, 2005. European Desalination Society. *Desalination*, vol. 182, Issues 1-3, pp. 239-249 Desalination and the Environment. 2005

Chorowski, M (2004); "Comparative Exergetic Analysis of Joule-Thomson Liquefiers". *AIP Conference Proceedings* -- June 23, 2004 -- Volume 710, pp. 1568-1575. 2004

Christian Marquezini Gomes (2001); "Análise Termodinâmica, Exergética e Termoeconômica de uma Instalação Termelétrica em Ciclo Combinado, com Cogeração de Vapor". Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA- 01/03/2001

Cícero Zaroni (2004); "Análise Exergética de um Forno Elétrico à Arco" - Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL - ENGENHARIA ELÉTRICA. 01/12/2004

CLAUDIO ANTONIO PERES (1995); "Estudo do Desempenho de Sistemas de Combustao de Lenha" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/09/1995

Cláudio Pinto Rebello Rücker (2004); "Análise Exergoeconômica de uma Planta de Cogeração Baseada em Microturbina a Gás Natural e Refrigeração por Absorção pela Teoria do Custo Exergético" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - ENGENHARIA MECÂNICA 01/08/2004

Claudio Plaza Pinto (1999); "Tecnologia da Digestão Anaeróbica da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável" - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS. 01/04/1999

Claudius Paulino César (2004); "Análises energética e exergética de um sistema térmico com ou sem cogeração" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2004

Comakli, K. / Yuksel, B. / Comakli, O (2004); "Evaluation of energy and exergy losses in district heating network". *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, Issue 7, pp. 1009-1017. 2004

Connelly L/ Koshland C.P (1997); "Two aspects of consumption: using an exergy-based measure of degradation to advance the theory and implementation of industrial ecology". *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 19, Number 3, March 1997, pp. 199-217. 1997

Connelly, L. / Koshland, C.P (2001); "Exergy and industrial ecology—Part 1: An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 3. pp. 146-165. 2001

Connelly, L. / Koshland, C.P (2001); "Exergy and industrial ecology—Part 2: A non-dimensional analysis of means to reduce resource depletion". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 3. pp. 234-255. 2001

Corneliessen, R.L.(1997); "Thermodynamics and Sustainable Developments. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibilities". Ph thesis. University of Twente. 1997

Cornelissen R.L.; Hirs G.G (1997); "Exergetic optimisation of a heat exchanger". *Energy Conversion and Management*, Volume 38, Number 15, October 1997, pp. 1567-1576. 1997

Cornelissen, R.L (1994); "Bibliography on Exergy Analysis and Related Techniques 1985-1994". University of Twente, Department of Mechanical Engineering, Energy technology Group. 1994

Cornelissen, R.L/ Hirs, G.G (1998); "Exergy analysis of cryogenic air separation". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 16, 1998, pp. 1821-1826. 1998

Cornelissen, R.L/ Hirs, G.G (2002); "The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA". *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 9, 2002, pp. 1417-1424. 2002

Cornelissen, R.L/ Hirs, G.G (1999); "Thermodynamic optimisation of a heat exchanger". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 42, Number 5, 1 March 1999, pp. 951-960. 1999

Cortez, L.A.B/ Larson, D.L/ Da Silva, A/ American Society of Agricultural Engineers (1997); "Energy and exergy evaluation of ice production by absorption refrigeration". *Transaction of the ASAE*, vol. 40, issue 2, 1997, pp. 395-403.

Corti, A/ Lombardi, L () Biomass integrated gasification combined cycle with reduced CO2 emissions: Performance analysis and life cycle assessment (LCA). *Energy*, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2109-2124.

Costa M.M/ Schaeffer R/ Worrell E (2001); "Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems". *Energy*, Volume 26, Number 4, 2001, pp. 363-384. 2001

Coventry, J.S/ Lovegrove, K (2003); "Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system". *Solar Energy*, vol. 75, Issue 1, 2003, pp. 63-72. 2003

Cownden, R. / Nahon, M. / Rosen, M.A (2001); "Exergy analysis of a fuel cell power system for transportation applications". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 112-121. 2001

- Creyts, J.C/ Care, V.P (1999); "Use of Extended Exergy Analysis to Evaluate the Environmental performance of Machining Processes". Proceedings of the I MECH E Part E Journal of Process Mechanical Engineering, Volume 213, Number 4, 1999, pp. 247-264. 1999
- Criscuoli, A. / Drioli, E (1999); "Energetic and exergetic analysis of an integrated membrane desalination system". Desalination, vol. 124, Issues 1-3, 1999, pp. 243-249. 1999
- Cziesla, F. / Tsatsaronis, G (2002); "Iterative exergoeconomic evaluation and improvement of thermal power plants using fuzzy inference systems". Energy Conversion and Management, vol. 43, Issue 9-12, 2002, pp. 1537-1548. 2002
- D.A. Sama (1993); "The use of the second law of thermodynamics in the design of heat exchangers, heat exchanger networks and process". Proceedings of ENSEC'93, pp. 53-76. 1993
- da Gama Cerqueira, S.A.A. / Nebra, S.A (1999); "Cost attribution methodologies in cogeneration systems". Energy Conversion and management, vol. 40, Issues 15-16, 1999, pp. 1587-1597, 1999
- D'Accadia, M.D. / De Rossi, F (1998); "Thermoeconomic analysis and diagnosis of a refrigeration plant". Energy Conversion and management, vol. 39, Issue 12, 1998, pp. 1223-1232. 1998
- d'Accadia, M.D. / Sasso, M (1998); "Exergetic cost and exergoeconomic evaluation of vapour-compression heat pumps". Energy, vol. 23, Issue 121, 1998, pp. 937-942.
- d'Accadia, M.D. / Vanoli, L (2004); "Thermoeconomic optimisation of the condenser in a vapour compression heat pump". International Journal of Refrigeration, vol. 27, Issue 4, pp. 433-441. 2004
- Dagdas, A (2005); "Exergy analysis and pressure optimisation of geothermal binary power plants". International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.4 pp. 409 - 422. 2005
- Dagdas, A. / Ozturk, R. / Bekdemir, S.V (2005); "Thermodynamic evaluation of Denizli Kızıldere geothermal power plant and its performance improvement". Energy Conversion and Management, vol. 46, Issue 2, pp. 245-256. 2005
- Dagoberto Cássio da Silva (2004); "Análise Termoeconômica de Uma Usina Termelétrica a Carvão Mineral". Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/11/2004
- Dahl, Jan (1993); "Short term water heat storage". Thesis, PhD, no1993:131D, Luleå University of Technology, S-971 87 Luleå, Sweden//Exergy, Heat storage/Efficiency. 1993
- Daniel, J.J/ Theis, T.L (2002); "Exergetic environmental assessment of life cycle emissions for various automobiles and fuels". Exergy, An International Journal, 2002, vol. 4, pp. 281. 2002
- Darwish, M.A (2004); "Cogeneration steam power desalting plants using steam turbines". JN: International Journal of Exergy (IJEX) 2004, Vol. 1, No. 4, pp. 495-515. 2004
- Das, S.K. / Roetzel, W (1995); "Exergetic analysis of plate heat exchanger in presence of axial dispersion in fluid". Cryogenics, vol. 35, Issue 1, 1995, pp. 3-8. 1995
- Datta, A (2005); "Effects of gravity on structure and entropy generation of confined laminar diffusion flames". International Journal of Thermal Sciences, vol. 44, Issue 5, pp. 429-440. 2005
- Datta, A/ Som, S.K (1999); "Energy and Exergy Balance in a Gas Turbine Combustor". Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Volume 213, Number 1, 1999, pp. 23-32. 1999
- De Castro Villela, I.A/ Silveira, J.L (2005); "Thermoeconomic analysis applied in cold water production system using biogas combustion". Applied Thermal Engineering, vol. 25, Issues 8-9, 2005, pp. 1141-1152. 2005
- De Faria, S.H.B (2003); "Estudo energético de colunas de destilação através de análise exergetica : sistemas não ideais". Tese doutoral, Engenharia Química. Unicamp- 2003.
- De Groot, A (1993); "Exergy analysis of fuel cells". JN: Energie Technologie (nl), vol.3:7, pp. 24-30. Groep Energiesystemen, Techniek, Technische Univ. Delft (nl). 1993
- De Koeijer, G. / Rivero, R (2003); "Entropy production and exergy loss in experimental distillation columns". Chemical Engineering Science, vol. 58, issue 8, pp. 1587-1597. 2003
- de Oliveira, S/ Van Hombeek, M (1997); "Exergy analysis of petroleum separation processes in offshore platforms". Energy Conversion and Management, Volume 38, Number 15, October 1997, pp. 1577-1584. 1997
- De Rossi, F. / Mastrullo, R. / Mazzei, P (1993); "Exergetic and thermodynamic comparison of R12 and R134a as vapour compression refrigeration working fluids". Int. J. of refrigeration, vol. 16, Issue 3, 1993, pp. 156-160. 1993
- De S/ Biswal, S.K (2005); Thermodynamic analysis of a coal gasification and split Rankine combined cogeneration plant. Part 2: exergy analysis. Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Vol. 219, No. 3, 2005, pp. 179-185. 2005
- De, S/ Nag, P. K (2000); "Thermodynamic analysis of a partial gasification pressurized combustion and supercritical steam combined cycle". Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Volume 214, Number 6, 2000, pp. 565-574.
- Debeljak, M (2002); "Applicability of genome size in exergy calculation". Ecological Modelling, vol. 152, Issues 2-3, pp. 103-107. 2002
- Demirel, Y (2004); "Exergy use in bioenergetics". International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 128 - 146. 2004

- Deng, S. / Jin, H. / Cai, R. / Lin, R (2004); "Novel cogeneration power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization". *Energy*, vol. 29, Issue 4, pp. 497-512. 2004
- Dentice d'Accadia, M. / Fichera, A. / Sasso, M. / Vidiri, M (2002); "Determining the optimal configuration of a heat exchanger (with a two-phase refrigerant) using exergoeconomics". *Applied Energy*, vol. 71, Issue 3, 2002, pp. 191-203. 2002
- Descombes, G/ Maroteaux, F. / Feidt, M (2003); "Study of the interaction between mechanical energy and heat exchanges applied to IC engines". *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, Issue 16, 2003, pp. 2061-2078. 2003
- Dewulf, J/ Van Langenhove, H (2003); "Exergetic material input per unit of service (EMIPS) for the assessment of resource productivity of transport commodities". *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 38, No. 2, 2003, pp. 161-174. 2003
- Dewulf, J/ Van Langenhove, H/ Dirckx, J (2001); "Exergy analysis in the assessment of the sustainability of waste gas treatment systems". *Sci. Total Environ.* 2001, vol. 273, Issues 1-3, pp. 41-52. 2001
- Dewulf, J/ Van Langenhove, H/ Van De Velde, B (2005); "Exergy-based efficiency and renewability assessment of biofuel production". *Environ Sci Technol.* 15;vol. 39 issue 10, pp. 3878-82. 2005
- Dewulf, J/ Van Langenhove, H/ J. Mulder, J/van den Berg, M.M.D/ van der Kooi, H.J/ de Swaan Arons, J (2000); "Illustrations towards quantifying the sustainability of technology". *Green Chemistry*, vol. 2, 2000, pp. 108-114
- Dewulf, JP/Van Langenhove, HR (2002); "Quantitative assessment of solid waste treatment systems in the industrial ecology perspective by exergy analysis". *Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, Issue 5, pp. 1130-1135. 2002
- Di Maria, F(2000); "Design and off design pipe network geothermal power plant analysis with power pipe simulator". *Energy, Conversion and Management*, vol. 41, issue 12, 2000, pp. 1223-1235. 2000
- Dincer, I (2002); "On thermal energy storage systems and applications in buildings". *Energy and Buildings*, Vol. 34, No. 4, 2002, pp. 377-388. 2002
- Dincer, I (2002); "Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems". *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.27, No. 3, 2002, pp. 265-285. 2002
- Dincer, I (2002); "The role of exergy in energy policy making". *Energy policy*, vol. 30, Issue 2, pp. 137-149. 2002
- Dincer, I (2000); "Thermodynamics, Exergy and Environmental Impact". *Energy Sources*, Volume 22, Number 8, 2000, pp. 723-732. 2000
- Dincer, I. / Hussain, M.M. / Al-Zaharnah, I (2004); "Energy and exergy use in the utility sector of Saudi Arabia". *Desalination*, vol. 169, Issue 3, pp. 245-255. 2004
- Dincer, I. / Hussain, M.M. / Al-Zaharnah, I (2004); "Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia". *Energy Policy*, vol. 32, Issue 14, pp. 1615-1624. 2004
- Dincer, I. / Hussain, M.M. / Al-Zaharnah, I (2004); "Energy and exergy utilization in transportation sector of Saudi Arabia". *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, Issue 4, pp. 525-538. 2004
- Dincer, I. / Sahin, A.Z (2004); "A new model for thermodynamic analysis of a drying process". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, Issue 4, pp. 645-652. 2004
- Dincer, I/ Çengel, Y.A (2001); "Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering". *Entropy*, vol. 3, 2001, p. 131. 2001
- Dincer, I/ Hussain, M.M/ Al-Zaharnah, I (2005); "Energy and exergy utilization in agricultural sector of Arabia Saudita". *Energy Policy*, vol. 33, Issue 11, pp. 1461-1467. 2005
- Dincer, I/ Hussain, M.M/ Al-Zaharnah, I (2003); "Energy and exergy use in the industrial sector of Saudi Arabia". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 217, No. 5, 2003, pp. 481-492. 2003
- DINCER, I/ HUSSAIN, M.M/ AL-ZAHARNAH, I (2004); "Energy and Exergy Use in Residential Sector of Saudi Arabia". *Energy Sources*, Vol. 26, No.13, 2004, pp. 1239-1252. 2004
- Diovana Aparecida dos Santos Napoleão (2003); "Determinação da Entropia de Mistura Amônia e Água para Aplicações em Processos de Refrigeração por Absorção". *Doutorado. UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/GUARAT. - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2003*
- Dobrovicescu, A (1993); "Analysis of the Claude liquefaction system on the basis of exergy dissipation" - *ENSEC '93*, pp. 611-618. *University Polytechnica of Bucharest, Romania.* 1993
- Dogan, T/ Yesin, T (2005); "Performance of externally fired combined cycle (EFCC)". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.2 pp. 172 - 193. 2005
- Doldersum, A (1997); "Exergy analysis proves viability of process modifications". *Journal of Energy Conversion and Management*, vol. 39, Issues 16-18, 1997, pp. 1781-1789. 1997
- Domaski, R/ Fellah, G (1998); "Thermoeconomic analysis of sensible heat, thermal energy storage systems". *Applied Thermal Engineering*, vol. 18, Issue 8, 1998, pp. 693-704. 1998
- Domingos Wilson Garagatti Arriola (2000); "Sistema Tri e Tetra Combinado de Cogeração Avaliação Exergética e Termoeconômica". *Mestrado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/04/2000*
- Dorantes, R. / Lallemand, A (1995); "Prediction of performance of a jet cooling system operating with pure refrigerants or non-azeotropic mixtures". *JN: International Journal of Refrigeration (United Kingdom)*, vol.18:1, pp. 21-30. 1995

- Douvartzides, S. / Coutelieris, F. / Tsiakaras, P (2004); "Exergy analysis of a solid oxide fuel cell power plant fed by either ethanol or methane". *Journal of Power Sources*. Vol. 131, Issues 1-2, pp. 224-230. 2004
- Douvartzides, S.L. / Coutelieris, F.A. / Tsiakaras, P.E (2003); "On the systematic optimization of ethanol fed SOFC-based electricity generating systems in terms of energy and exergy". *Journal of Power Sources*, vol. 114, Issue 2, pp. 203-212. 2003
- Douvartzides, S.L. / Coutelieris, F.A. / Tsiakaras, P.E (2004); "Effect of reforming on the overall efficiency of a solid oxide fuel-cell based power plant system fed by methane". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.2 pp. 179 - 188. 2004
- Duan, L. / Lin, R. / Deng, S. / Jin, H. / Cai, R (2004); "A novel IGCC system with steam injected H₂/O₂ cycle and CO₂ recovery". *Energy*, vol. 45, Issue 6, pp. 797-809. 2004
- Duan, Y.; Zhang, J.; Shi, L.; Zhu, M.; Han, L (2002); "Exergy analysis of methanol-IGCC polygeneration technology based on coal gasification". *Tsinghua Science and Technology*. Vol. 7, no. 2, pp. 190-193. 2002
- Dunbar W.R/ Moody S.D/ Lior N (1995); "Exergy analysis of an operating boiling-water-reactor nuclear power station". *Energy Conversion and Management*, Volume 36, Number 3, March 1995, pp. 149-159. 1995
- Dunbar, W.R / Lior, N / Gaggioli, R.A (1993); "The effect of the fuel cell unit size on the efficiency of a fuel-cell-topped Rankine power cycle". *JN:Journal of Energy Resources Technology (US)*, vol.115:2, pp.105-107. 1993
- Durmayaz, A. / Sogut, O.S. / Sahin, B. / Yavuz, H (2004); "Optimization of thermal systems based on finite-time thermodynamics and thermoeconomics". *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, Issue 2, 2004, pp. 175-217. 2004
- Durmayaz, A/ Yavuz, H (2001); "Exergy analysis of a pressurized-water reactor nuclear-power plant". *Applied Energy*, vol. 69, issue 1, pp. 39-57. 2001
- Durmus, A (2004); "Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators". *Energy Conversion and Management*, vol. 45, Issue 5, pp. 785-796. 2004
- Ebadi, N.J/Gorji-Brandpy, M (2005); "Exergetic analysis of gas turbine plants". *Int. J. Exergy*, vol. 2, no. 1, pp. 31-39. 2005
- Ednildo Andrade Torres (1999); "Avaliação exergética e termoeconômica de um sistema de cogeração de um polo petroquímico". Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/1999
- Eduardo Rafael Barreda del Campo (1999); "Avaliação termoeconômica do sistema de cogeração da usina vale do Rosário". Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/05/1999
- Elaine Isa Santos de Santana (2004); "Análise Termodinâmica de uma Coluna de Fracionamento de Petróleo". Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA QUÍMICA. 01/03/2004
- Elisângela Martins Leal (2003); "Caracterização de Sistemas de Cogeração Empregando Células de Combustível". Doutorado. UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/GUARAT. - ENGENHARIA MECÂNICA 01/08/2003
- El-Nashar, A.M (1994); "An MSF evaporator for the UANW 9 and 10 power station. Design considerations based on energy and exergy". *Desalination*, vol. 97, Issues 1-3, 1994, pp. 253-279. 1994
- El-Nashar, A.M (1999); "Cost allocation in a cogeneration plant for the production of power and desalted water -- comparison of the exergy cost accounting method with the WEA method". *Desalination*, Volume 122, Number 1, 1999, pp. 15-34. 1999
- El-Sayed, Y.M (2002); "Application of exergy to design". *Energy Conversion and Management*, vol. 43, Issues 9-12, pp. 1165-1185. 2002
- Elsner, N (1993); "The development of the 'exergy' term in Technical Thermodynamics- a historical contemplation". *JN: Brennstoff Waerme Kraft (Germany)*, vol. 45:7 8, pp. 353 358. 1993
- Erdil, A (2005); "Exergy optimization for an irreversible combined cogeneration cycle". *Journal of the Energy Institute*, Vol.78, No. 1, 2005, pp. 27-31. 2005
- Ergo Exergy's experts (2003); "The Exergy UCG Technology and the Chinchilla IGCC project". International Workshop on UCG, DTI Conference Center, London.2003
- Ergo Exergy's experts (2005); "The Exergy UCG Technology and the Chinchilla Project: an alternative IGCC pathway". 6th Annual Australian Gas Turbines Conference. 2005
- Ergo Exergy's experts (2005); "The Exergy UCG Technology as a Source of Raw Materials for Chemical Syntheses". Conference on Catalytic Conversion, Philadelphia. 2005
- Ergo Exergy's experts (2003); "The Exergy Underground Coal Gasification". Canadian Perspective, Combustion Canada '03 Conference, Vancouver. 2003
- Erlach, B. / Serra, L. / Valero, A (1999); "Structural theory as standard for thermoeconomics". *Energy Conversion and Management*, vol. 40, Issues 15-16, 1999, pp. 1627-1649. 1999
- Erlach, B.; Serra, L.; Valero, A (1998); "Structural Theory as standard for Thermoeconomics". *ECOS'98*, vol.8-10 Juillet. Université Henri Poincaré Nancy. Institut National Polytechnique de Lorraine. Nancy, France. pp. 229-312. 1998

- Errera M.R/ Milanez L.F(2000); "Thermodynamic analysis of a coke dry quenching unit". Energy Conversion and Management, Volume 41, Number 2, January 2000, pp. 109-127. 2000
- Ertesvag, I. S (2005); "Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000". Energy, 2005, vol. 30, (5), pp. 649-675. 2005
- Ertesvag, I. S/ Mielnik, M (2000). "Exergy analysis of the Norwegian society". Energy, vol. 25, issue 10, 2000, pp. 957-973. 2000
- Ertesvag, I.S (2001); "Society exergy analysis: a comparison of different societies". Energy, vol. 26, Issue 3, pp. 253-270. 2001
- Ertesvag, I.S. / Kvamsdal, H.M. / Bolland, O (2005); "Exergy analysis of a gas-turbine combined-cycle power plant with precombustion CO2 capture". Energy, vol. 30, Issue 1, pp. 5-39. 2005
- Eskin N/ Kilic A (1996); "Estimation of cooling tube location in fluidized bed coal combustors through exergy analysis". Energy Conversion and Management, Volume 37, Number 9, September 1996, pp. 1453-1461. 1996
- Eskin, N (2000); "Performance analysis of a solar process heat system". Energy Conversion and Management, vol. 41, issue 11, 2000, pp. 1141-1154. 2000
- Etele, J. / Rosen, M.A (2001); Sensitivity of exergy efficiencies of aerospace engines to reference environment selection. Exergy An International Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 91-99. 2001
- Exergy analysis of an RO desalination plant. Membrane Technology, Vol. 2002, Issue 8 , 1 2002, Page 16. 2002
- Ezzine, N.B. / Barhoumi, M. / Mejri, K. / Chemkhi, S. / Bellagi, A (2004); "Solar cooling with the absorption principle: first and Second Law analysis of an ammonia—water double-generator absorption chiller". Desalination, vol. 168, pp. 137-144. 2004
- Fabiano, M. / Vassallo, P. / Vezzulli, L. / Salvo, V.S. / Marques, J.C (2004); "Temporal and spatial change of exergy and ascendancy in different benthic marine ecosystems". Energy, vol. 29, Issue 11, pp. 1697-1712. 2004
- Fabio Antonio Filipini (2002); "MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS COMPLEXOS COM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - ENGENHARIA01/11/2002
- Facchini, B. / Stecco, S.S (1999); "Cooled expansion in gas turbines: a comparison of analysis methods". Energy Conversion and Management, vol. 40, Issue 11, 1999, pp. 1207-1224. 1999
- Fang, Z/ Larson, D.L/ Fleischmen, G (1995); "Exergy analysis of a milk processing system". American Society of Agricultural Engineers, col. 38, Issue 6, pp. 1825-1832. 1995
- Fartaj, A. / Ting, D.S.-K. / Yang, W.W (2004); "Second law analysis of the transcritical CO2 refrigeration cycle". Energy Conversion and management, vol. 45, Issue13-14, pp. 2269-2281. 2004
- Fath, B.D. / Cabezas, H (2004); "Exergy and Fisher Information as ecological indices". Ecological Modelling, vol. 174, Issues 1-2, pp. 25-35. 2004
- Fath, B.D. / Jorgensen, S.E. / Patten, B.C. / Straskraba, M (2004); "Ecosystem growth and development". Biosystems, vol. 77, Issues 1-3, pp. 213-228. 2004
- Federici, M. / Ulgiati, S. / Verdesca, D. / Basosi, R (2003); "Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems". Ecological Indicators, vol. 3, Issue 3, 2003, pp. 155-169. 2003
- FERNANDEZ PARRA, M.I (2003); "METODOLOGIA DE ANALISE EXERGONOMICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇUCAR". TESE DOUTORAL - ENGENHARIA MECÂNICA, UNICAMP, 2003.
- Fernández-Parra, M.I/ Nebra, S.A (2004); "The exergy of Sugar Cane Juice and Bagasse". Proposal of Calculation Method. 2004. ecos2004.imp.mx - publication by internet. 2004
- Feuerecker, G / Alefeld, G (1993); "Process optimization and economics of heat pumps systems by advanced thermodynamic analysis". Proceedings of ENSEC '93, pp. 619-27. Technische Universitat of Munchen (Germany). 1993
- Fiaschi D/ Manfrida G (1998); "Exergy analysis of the semi-closed gas turbine combined cycle (SCGT/CC)". Energy Conversion and Management, Volume 39, Number 16, 1998, pp. 1643-1652. 1998
- Fiaschi, D. / Tapinassi, L (2004); "Exergy analysis of the recuperative auto thermal reforming (R-ATR) and recuperative reforming (R-REF) power cycles with CO2 removal". Energy, vol. 29, Issue 12-15, pp. 2003- 2024. 2004
- Fiaschi, D/ Manfrida, G (1999); "Exergy analysis of a cryogenic hydrogen fuel power plant". International Journal of Hydrogen Energy, Volume 24, Number 8,1999, pp. 731-739. 1999
- Fijauulkowski S/ Nakonieczny K (1997); "Operation of Exhaust Systems of Turbocharged Diesel Engines Identified by Means of Exergy Analysis". Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering, Volume 211, Number 5, 16 September 1997, pp. 391-405. 1997
- Finnveden G.; Ostlund P (1997); "Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications". Energy, Volume 22, Number 9, September 1997, pp. 923-931. 1997
- Fiorini, P. / Sciubba, E (2005); "Thermoeconomic analysis of a MSF desalination plant". Desalination, vol. 182, Issues 1-3, pp. 39-51. 2005

Flavio Fernando Guarinelo Junior (1997); "Avaliação Termoeconômica de um Sistema de Cogeração Proposto para um Pólo Industrial". Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECANICA- 01/09/1997

Fragiacomo, P. / Gambarotti, D (2002); "Thermo-environmental evaluation of traditional cogenerative and fuel cell plants". Applied Energy, vol. 71, Issue 2, 2002, pp. 127-146. 2002

Francisco de Sousa Júnior (2001); "Análise Tecnoeconômica de Sistema de Armazenamento de Ar Comprimido para Geração de Energia Elétrica em Horário de Demanda de Pico" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/09/2001

Franco, A. / Casarosa, C (2004); "Thermoeconomic evaluation of the feasibility of highly efficient combined cycle power plants". Energy, vol. 29, Issue 12-15, pp. 1963-1982. 2004

Franco, A. / Casarosa, C (2002); "On some perspectives for increasing the efficiency of combined cycle power plants". Applied Thermal Engineering, vol. 22, Issue 13, 2002, pp. 1501- 1518. 2002

Franco, A. / Giannini, N (2005); "Optimum thermal design of modular compact heat exchangers structure for heat recovery steam generators". Applied Thermal engineering, vol. 25, Issue 8-9, pp. 1293-1313. 2005

Franco, A. / Giannini, N (2005); "Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants". International Journal of Thermal Sciences, vol. 44, Issue 2, pp. 163-177. 2005

Franco, A. / Russo, A (2002); "Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operating parameters". Int. J. Of Thermal Sciences, vol. 41, Issue 9 2002, pp. 843-859.

Frangopoulos, C.A. / Lygeros, A.I. / Markou, C.T. / Kaloritits, P (1996); "Thermoeconomic operation optimization of the Hellenic Aspropyrgos Refinery combined-cycle cogeneration system". Applied Thermal Engineering, vol. 16, Issue 12, 1996, pp. 949-958. 1996

Frangopoulos, C.A./ Spakovsky, M.R (1993); "A global environomic approach for energy systems analysis and optimization (part 1)". Proceedings of ENSEC '93, National Technical University of Athens and EPFL (switzerland). 1993

Frangopoulos, C.A./ Spakovsky, M.R (1993); "A global environomic approach for energy systems analysis and optimization (part 2)". Proceedings of ENSEC '93, National Technical University of Athens and EPFL (switzerland). 1993

Fratscher, W./ Tetzlaff, F (1993); "Exergy calculation of chemically reacting systems" - ENSEC '93, pp. 237-44. Technical University Merseburg (Germany). 1993

Fratzcher, W (1997); "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis". International Journal of Refrigeration, vol. 20, Issu 5, 1997, pp. 374. 1997

Fratzcher, W (1997); "Exergy and possible applications". Revue Générale de Thermique, vol. 36, Issue 9, 1997, pp. 690-696. 1997

Fujisawa T/ Tani T (1997); "Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector". Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 47, Number 1, October 1997, pp. 135-148. 1997

Fukuda, K (2003); "Production of exergy from labour and energy resources". Applied Energy, vol. 76, Issue 4, pp. 435-448. 2003

Funtowicz S.O/ Ravetz J.R (1997); "The poetry of thermodynamics - Energy, entropy/exergy and quality". Futures, Volume 29, Number 9, November 1997, pp. 791-810. 1997

Fyke A/ Li D/ Crane P/ Scott D.S. (1997); "Recovery of thermomechanical exergy from cryofuels". International Journal of Hydrogen Energy, Volume 22, Number 4, April 1997, pp. 435-440. 1997

G. Bisio (1995); "Thermodynamic analysis of the use of pressure exergy of natural gas". Energy, vol. 20, Issue 2, 1995, pp. 151-159. 1995

G. J. Kabo/ Govin. O.V/Kozyro. A.A (1998); "Additivity of chemical exergies of alkanes". Energy, vol. 23, Issue 5, 1998, pp. 383-391. 1998

G. K. Alexis (2005); "Exergy analysis of ejector-refrigeration cycle using water as working fluid". International Journal of Energy Research, vol. 20, Issue 2, pp. 95-105. 2005

Gaggioli, R.A/ Paulus, D.M. Junior (2002); "Availability - part I: Gibbs revisited". Journal of energy resources technology, vol. 124, 2002, pp. 105-109. 2002

Gallo, W.L.R. / Bidini, G. / Bettagli, N. / Facchini, B (1997); "Effect of turbine-blade cooling on the hat (humid air turbine) cycle". Energy, vol. 22, Issue 4, 1997, pp. 375-380.

Ganni, V./ Apparao, T.V.V.R (1993); "Design verification and acceptance tests of the ASST A helium refrigeration system". CT - Int. cryogenic engineering conference and inter. cryogenic materials conference. pp. 12p. 1993

Gao, L. / Jin, H. / Liu, Z. / Zheng, D (2004); "Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production". Energy, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2359-2371. 2004

GARCIA, Rodrigo Sarmiento (2005); "Análise exergética e econômica de processos reativos com mecanismos cinéticos detalhados". Dissertação (mestrado), UnB, engenharia mecanica- 2005.

Garcia-Rodriguez, L. / Gomez-Camacho, C (2001); "Exergy analysis of the SOL-14 plant (Plataforma Solar de Almería, Spain)". Desalination, vol. 139, issues 1-3pp.251-258. 2001

- Garcia-Rodriguez, L. / Gomez-Camacho, C (1999); "Thermoeconomic analysis of a solar parabolic trough collector distillation plant". *Desalination*, vol. 122, Issues 2-3, 1999, pp. 215-224. 1999
- Gean Claudio de Souza Santana (2003); "Análise Energética e Exergetica de um Sistema de Cogeração do Setor Terciário" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - ENGENHARIA QUÍMICA. 01/03/2003
- Gemci, T/ Ozturk, A (1998); "Exergy analysis of a sulphide-pulp preparation process in the pulp and paper industry". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 16, 1998, pp. 1811-1820. 1998
- Geuzebroek, F.H. / Schneiders, L.H.J.M. / Kraaijveld, G.J.C. / Feron, P.H.M (2004); "Exergy analysis of alkanolamine-based CO₂ removal unit with AspenPlus". *Energy*, vol. 29, Issues 9-10, pp. 1241-1248. 2004
- Ghosh, S/ De, S (2004); "First and second law performance variations of a coal gasification fuel-cell-based combined cogeneration plant with varying load". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 218, No. 7, 2004, pp. 477-485. 2004
- Ghosh, S/ De, S (2003); "Thermodynamic performance study of an integrated gasification fuel cell combined cycle: an exergy analysis". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 217, No. 6, 2003, pp. 575-581. 2003
- Ghosh, S/ De, D (2005); "Thermodynamic performance simulation of a coal gasification and SOFC based combined cogeneration plant by energy and exergy analyses". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.4 pp. 366 - 384. 2005
- Giancarlo Luchetta Bedin (2003); "Avaliação Termoeconômica de uma Planta de Cogeração Híbrida Biomassa/Gás Natural" - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2003
- Giannantoni, C. / Lazzaretto, A. / Macor, A. / Mirandola, A. / Stoppato, A. / Tonon, S. / Ulgiati, S (2005); "Multicriteria approach for the improvement of energy systems design". *Energy*, vol. 30, Issue 10, pp. 1989-2016. 2005
- Glavic, P/ Novak, Z (1993); "Completely analyze energy integrated processes". *JN: Chemical Engineering Progress(United States)*, vol.89:2, pp. 49- 60. University of Moribor (Slovenia). 1993
- Goetz, Vincent/ Elie, Frederic/ Spinner, Bernard (1993); "The structure and performance of single effect solid gas chemical heat pumps". *JN:Heat Recovery Systems and CHP(UK)*, vol.13:1, pp. 79-96. 1993
- Gogus, Y.A. / Ataer, O.E. / Ileri, A (1993); "thermal module to study exergetic utilization of environmental temperature variation". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 857-66. 1993
- Göğüş, Y/ Camdah, Ü/ Kavsaoglu, M.S (2002); "Exergy balance of a general system with variation of environmental conditions and some applications". *Energy*, vol. 27, Issue 7, pp. 625-646. 2002
- Gomez camacho, C (1999); "Exergo-environmental analysis of processing condensed water from atmospheric air". *Desalination*, Volume 121, Number 2, 12 March 1999, pp. 103-116. 1999
- Gong, M /Wall, G (2001); "On Exergy and Sustainable Development, Part II: Methods, Applications and Suggestions" *JN: Exergy An International Journal*, Vol.1, No.4, pp. 217-233. 2001
- Gong, M (2004); "Exergy Analysis of a Pulp and Paper Mill". *International Journal of Energy Research*, vol. 29, Issue 1, pp. 79-93. 2004
- Gong, M/ Wall,G (1997); "On Exergetics, Economics and Optimization of Technical Processes to Meet Environmental Conditions", presented at TAIES'97, , Beijing, China, publ. Ruixian Cai, et al. Eds., *Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems*, pp. 403-413, Beijing World, ISBN 7-5062-3264-Z. 1997
- Gong, Z.-X. / Mujumdar, A.S (1997); "Thermodynamic optimization of the thermal process in energy storage using multiple phase change materials". *Applied Thermal Engineering*, vol. 17, Issue 11, 1997, 1067-1083. 1997
- Gong,M / Karlsson, M (2004); "Coordination of exergy analysis and the MIND method - applied to a pulp and board mill". *JN: International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 289 - 302. 2004
- Gosset, J. / Gicquel, R. / Lecomte, M. / Queiros-Conde, D (2005); "Optimal design of the structure and settings of nuclear HTR thermodynamic cycles". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, Issues 12, pp. 1169-1179. 2005
- Govin, O/ Diky, V/ Kabo, G/ Blokhin, A (2000); "Evaluation of the Chemical Exergy of Fuels and Petroleum Fractions". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Volume 62, Number 1, 2000, pp. 123-133. 2000
- Grafton, A.K/ Wheeler, R.A/ Rudzinski, C.M/ Hartmann, W, K/ Nocera, D.G/ Ahuja, V/ Green, R (1998); "Application of matrix heat exchangers to thermomechanical exergy recovery from liquid hydrogen". *Cryogenics*, Volume 38, Number 9, 1998, pp. 857-867. 1998
- Granovskii, M.S. / Safonov, M.S (2003); "New integrated scheme of the closed gas-turbine cycle with synthesis gas production". *Chemical engineering Science*, vol. 58, issue 17, pp. 3913-3921. 2003
- Graveland A.J.G.G.; Gisolf E (1998); "Exergy analysis: An efficient tool for process optimization and understanding - Demonstrated on the vinyl-chloride plant of Akzo Nobel". *Computers and Chemical Engineering*, Volume 22, Supplement 1, 1998, pp. 545-552. 1998
- Greeff, I.L. / Visser, J.A. / Ptasinski, K.J. / Janssen, F.J.J.G (2003); "Integration of a turbine expander with an exothermic reactor loop—Flow sheet development and application to ammonia production". *Energy*, vol. 28, Issue 14, pp. 1495-1509. 2003

- Groot, A. de (2004); "Advanced exergy analysis of high temperature fuel cell systems". ECN Clean Fossil Fuels - Netherland. ECN report number: ECN-R--03-002. 2004
- Guarinello, F. / Cerqueira, S.A.A.G. / Nebra, S.A (2000); "Thermoeconomic evaluation of a gas turbine cogeneration system". Energy Conversion and management, vol. 41, Issue 11, 2000, pp. 1191-1200. 2000
- GUSTAVO CHEREN CÔRTE PEREIRA (2003); "Modelagem de Condicionadores de Ar, Simulação de Sistemas Integrados a Edificações, Modelos Empíricos". Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/07/2003
- Habib M.A./ Said S.A.M/ Al-Zaharna I (1995); "Optimization of reheat pressures in thermal power plants". Energy, Volume 20, Number 6, June 1995, pp. 555-565. 1995
- Habib, M.A. / Said, S.A.M. / Al-Bagawi, J.J (1995); "Thermodynamic performance analysis of the Ghazlan power plant". Energy, vol. 20, Issue 11, 1995, pp. 1121-1130. 1995
- Hallinan, K.P/ Sanders, B/ Somphone, T/ Ephrem, G (2005); "Entropy generation metric for evaluating and forecasting aircraft energy management systems". International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.2 pp. 120 - 145. 2005
- Hamed O.A/ Zamamiri A.M./ Aly S/ Lior N (1996); "Thermal performance and exergy analysis of a thermal vapor compression desalination system". Energy Conversion and Management, Volume 37, Number 4, April 1996, pp. 379-387. 1996
- Hammond, G.P/ Stapleton, A, J (2001); "Exergy analysis of the United Kingdom energy system". Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Volume 215, Number 2, 3 April 2001, pp. 141-162. 2001
- Hao, S/ Klamecki, B.E/ Ramalingam, S/ Sorin, M/ Paris, J (1999); "Integrated exergy load distribution method and pinch analysis". Computers and Chemical Engineering, Volume 23, Number 4, 1 May 1999, pp. 497-507. 1999
- Harvey S.; Kane N (1997); "Analysis of a reheat gas turbine cycle with chemical recuperation using Aspen". Energy Conversion and Management, Volume 38, Number 15, October 1997, pp. 1671-1679. 1997
- Hasan, A.A. / Goswami, D.Y. / Vijayaraghavan, S (2002); "First and second law analysis of a new power and refrigeration thermodynamic cycle using a solar heat source". Solar Energy, vol. 73, Issue 5, 2002, pp. 385-393. 2002
- Hasan, A.A/ Goswami, D.Y (2003); "Exergy Analysis of a Combined Power and Refrigeration Thermodynamic Cycle Driven by a Solar Heat Source". Journal of Solar Energy Engineering, vol. 125, Issue 1, pp. 55-60. 2003
- Hasatani, M (1997); "Highly efficient conversion technologies for energy utilization". Energy Conversion and Management, Volume 38, Number 10, September 1997, pp. 931-940. 1997
- Hau, J.L/ Bakshi, B.R (2004); "Expanding Exergy Analysis to Account for Ecosystem Products and services". Environmental Science Technology, vol. 38, Issue 13, pp. 3768-3777. 2004
- Hau. J.L/ Bakshi, B.R (2004); "Promise and problems of emergy analysis". Ecological Modelling, vol. 178, Issues 1-2, pp. 215-225. 2004
- Hebecker, D. / Bittrich, P. / Riedl, K (2005); "Hierarchically structured exergetic and exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion processes". Energy Conversion and desalination, vol. 46, Issues 7-8, 2005, pp. 1247-1266. 2005
- Heikkinen, M.A. / Lampinen, M.J / Tamasy Bano, M (1993); Thermodynamic analysis and optimization of the Brayton process. Heat Recovery Systems and CHP (UK), vol.13:2, pp. 123-31. Helsinki Univ. of Technology, Espoo. 1993
- Hellström, D (2003); "Exergy analysis of nutrient recovery processes". Water Science & Technology Vol 48 No 1 pp 27-36 © IWA Publishing 2003. Stockholm Water Co., Sweden. 2003
- Hellström, D (1999); "Exergy Analysis: A Comparison of Source Separation Systems and Conventional Treatment Systems". Water Environment Research, Volume 71, Number 7, 1999, pp. 1354-1363. 1999
- Hellström, D/ Karrman E (1997); "Exergy analysis and nutrient flows of various sewerage systems". Water Science and Technology, Volume 35, Number 9, 1997, pp. 135-144. 1997
- Henriete Lima Seixas (2003); "Análise Termodinâmica e de Emissões de uma Planta de Secagem de Fermento" - Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/09/2003
- Hepbasli, A. / Akdemir, O (2004); "Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system". Energy Conversion and Management, vol. 45, Issue 5, pp. 737-753. 2004
- Hepbasli, A. / Utlu, Z (2004); "Evaluating the energy utilization efficiency of Turkey's renewable energy sources during 2001". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 8, Issue 3, pp. 237-255. 2004
- Hepbasli, A (2005); "Modeling of Sectoral Energy and Exergy Utilization". Energy Sources, Vol. 27, No.10, 2005, pp. 903-912. 2005
- Hernandez, F / Izquierdo, M (1993); "Criteria for economic optimization of an absorption heating transformer system". Proceedings of ENSEC '93, pp. 629-36. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. 1993
- Hinderink A.P./ Kerkhof F.P.J.M/ Lie A.B.K/ De Swaan Arons J/ Van Der Kooi H.J (1996); "Exergy analysis with a flowsheeting simulator--I. Theory; calculating exergies of material streams". Chemical Engineering Science, Volume 51, Number 20, October 1996, pp. 4693-4700. 1996

- Hinderink A.P./ Kerkhof F.P.J.M/ Lie A.B.K/ De Swaan Arons J/ Van Der Kooi H.J (1996); "Exergy analysis with a flowsheeting simulator--II. Application; synthesis gas production from natural gas". Chemical Engineering Science, Volume 51, Number 20, October 1996, pp. 4701-4715. 1996
- Hinsenkamp, G (1993); "Non dimensional performance optimization of adiabatic helical screw expanders using different working fluids". JN: Forschung im Ingenieurwesen (Germany), vol.59:1/2, pp.1 7. Karlsruhe Univ. (T.H.) 1993
- Hirs, G (2003); "Thermodynamics applied. Where? Why?". Energy, vol. 28, Issue 13,2003, pp. 1303-1313. 2003
- Hirs, G.G (1993); "Exergy loss: A basis for energy taxing". Elektrotechnik (Netherlands), vol. 71:3, pp. 162-165. Faculteit Werktuigbouw, Univ. Twente, Enschede (Netherlands). 1993
- Hirsch D/ Epstein M/ Steinfeld A (2001); "The solar thermal decarbonization of natural gas". International Journal of Hydrogen Energy, Volume 26, Number 10, October 2001, pp. 1023-1033. 2001
- Hiwase, S.D/ Datta, A. Som, S.K (1998); "Entropy balance and exergy analysis of the process of droplet combustion". Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 31, Number 13, 1998, pp. 1601-1610. 1998
- Hohenstein, M. / Werner, S / Hilmer, F / Orths, R / Vajen, K (1994); "Thermal stratification in water storages with double shell heat exchanger". 9th international solar forum '94, Vol. 1, pp. 815-819. 1994
- Holmberg, H. / Ahtila, P (2005); "Evaluation of energy efficiency in biofuel drying by means of energy and exergy analyses". Applied Thermal Engineering Vol. 25, Issues 17-18 , December 2005, pp. 3115-3128. 2005
- Holoubek, D (1994); "Thermodynamic balance of metallurgical furnace". JN: Materials Science Forum(ch), vol.163-165:pt.2/ 2. ASM heat treatment and surface engineering techniques and trade fair, pp. 745-50. 1994
- Hongguang, Jin / Ishida, Masaru (1993); "Graphical exergy analysis of complex cycles". JN: Energy (Oxford), vol. 18:6, pp. 615-625. Tokyo Institute of Technology-Research Laboratory of Resources Utilization. 1993
- Hotz, N. / Senn, S.M. / Poulikakos, D (2005); "Exergy analysis of a solid oxide fuel cell micropowerplant". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- ScienceDirect. 2005
- Hovellius K/ Hansson P.-A.P.-A (1999); "Energy- and exergy analysis of rape seed oil methyl ester (RME) production under Swedish conditions". Biomass and Bioenergy, Volume 17, Number 4, 1999, pp. 279-290. 1999
- Hua, B. / Chen, Q.L. / Wang, P (1997); "A new exergoeconomic approach for analysis and optimization of energy systems". Energy, vol. 22, Issue 11, 1997, pp. 1071-1078. 1997
- Huang, Y-C/ Hung, C-I/ Chen, C-K (2000); "An Ecological Exergy Analysis for an Irreversible Brayton Engine with an External Heat Source". Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Volume 214, Number 5, 2000, pp. 413-421. 2000
- HUGO LIMA MOREIRA (2004); "Análise Termoeconômica de Sistemas de Refrigeração por Absorção com o Par Água-Brometo de Lítio" - Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA/JOÃO PESSOA - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2004
- Huseyin Ozturk, H (2004); "Energy and exergy efficiencies of a solar box-cooker". International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.2 pp. 202 - 214. 2004
- Hüseyin Öztürk, H (2005); "Experimental evaluation of energy and exergy efficiency of a seasonal latent heat storage system for greenhouse heating". Energy Conversion and Management, vol. 46, Issues 9-10, pp. 1523-1542. 2005
- Hussain, M.M. / Baschuk, J.J. / Li, X. / Dincer, I (2005); "Thermodynamic analysis of a PEM fuel cell power system". International Journal of Thermal Sciences, vol. 44, Issue 9, pp. 903-911. 2005
- Ílerí, A / Güreler, T (1998); "Energy and exergy utilization in Turkey during 1995". Energy, vol. 23, Issue 12, 1998, pp. 1099-1106.
- Ishida, M. / Jin, H (1993); "Graphical exergy analysis of significant role of humidification process in a thermal power system". Proceedings of ENSEC '93, pp.549-556. Tokyo Institute of Technology-Research Laboratory of Resources Utilization. 1993
- Ishida, M/ Okuno, K (2004); "Systematic analysis of biochemical processes in cells by applying graphical diagrams". Energy, vol. 29, issues 12-15, pp. 2461-2472. 2004
- Ishida, Y/ Ji, J (1999); "Graphical exergy study on single stage absorption heat transformer". Applied Thermal Engineering, Volume 19, Number 11, November 1999, pp. 1191-1206. 1999
- Ishihara, A. / Mitsushima, S. / Kamiya, N. / Ota, K.-i (2004); "Exergy analysis of polymer electrolyte fuel cell systems using methanol". Journal of Power Sources, vol. 126, Issues 1-2, pp. 34-40. 2004
- Izquierdo, M. / de Vega, M. / Lecuona, A. / Rodríguez, P. / Unidad Asociada de Investigación de Energía y Medioambiente CSIC-UC3M (2002); "Compressors driven by thermal solar energy: entropy generated, exergy destroyed and exergetic efficiency". Solar Energy, vol. 72, Issue 4, pp. 363-375. 2002
- Izquierdo, M. / Venegas, M. / Garcia, N. / Palacios, E (2005); "Exergetic analysis of a double stage LiBr-H₂O thermal compressor cooled by air/water and driven by low grade heat". Energy Conversion and Management, vol. 46, Issue 7-8, pp. 1029-1042. 2005

- J. Prins M/ J. Ptasiński, K/ J. J. G Janssen, F (2003); "Thermodynamics of gas-char reactions: first and second law analysis". *Chemical Engineering Science*, Volu.58, No. 3, 2003, pp. 1003-1011. 2003
- Jassim, R. K./ Khir, T (2004). "Exergoeconomic optimisation of an air-conditioning rotary regenerator: effect of matrix thermal conductivity on its performance". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.2 pp. 215 - 236. 2004
- Jassim, R.K/ Habeebullah, B.A/ Habeebullah, A.S (2004); "Exergy analysis of carryover leakage irreversibilities of a power plant regenerative air heater". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 218, No.1, 2004, pp. 23-32. 2004
- Jassim, R.K/ Khir, T/ Habeebullah, B.A/ Zaki, G.M (2005); "Exergoeconomic optimisation of the geometry of continuous fins on an array of tubes of a refrigeration air cooled condenser". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.2 pp. 146 - 171. 2005
- Jassim, R.K/ Mohammed Ali, A.A.K (2003); "Computer simulation of thermoeconomic optimization of periodic-flow heat exchangers". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 217, No. 5, 2003, pp. 559-570. 2003
- Ji, P. / J. van der Kooi, H. / de Swaan Arons, J (2003); "Simulation and thermodynamic analysis of an integrated process with H₂ membrane CPO reactor for pure H₂ production". *Chemical engineering Science*, vol. 58, Issue 17, 2003, pp. 3901-3911. 2003
- Ji, P. / J. van der Kooi, H. / de Swaan Arons, J (2003); "Simulation and thermodynamic analysis of conventional and oxygen permeable CPO reactors". *Chemical engineering Science*, vol. 58, Issue 13, 2003, pp. 2921-29130. 2003
- Ji, X. / Chen, G.Q (2005); "Exergy analysis of energy utilization in the transportation sector in China" - ScienceDirect, Peking University. 2005
- Jianguo, X/ Agrawal, R (1996); "Gas separation membrane cascades I. One-compressor cascades with minimal exergy losses due to mixing". *Journal of Membrane Science*, Volume 112, Number 2, 17 April 1996, pp. 115-128.
- Jilek, J/Young, J.H (1993); "Exergy efficiency of a counterflow air/air heat exchanger with vapour condensation". *JN: Waerme und Stoffuebertragung (Germany)*, vol. 28:3,pp.123- 30. College of Agriculture(chek)/North Carolina State Univ. 1993
- Jin, H. / Ishida, M (2000); "A novel gas turbine cycle with hydrogen-fueled chemical-looping combustion". *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 25, Number 12, 2000, pp. 1209-1215. 2000
- Jin, H. / Zhao, H. / Liu, Z. / Cai, R (2004); "A novel EFHAT system and exergy analysis with energy utilization diagram". *Energy*, vol.29, issues 12-15, pp. 1983-1991. 2004
- Jizhong, Z /Shijun, M/ Hinman, G.W (1996); "Ecological exergy analysis: a new method for ecological energetics research". *Ecological Modelling*, Volume 84, Number 1, January 1996, pp. 291-303. 1996
- João Gari da Silva Fonseca Júnior (2003); "ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM CICLO RANKINE COM AQUECIMENTO DISTRITAL: ESTUDO DE UMA PLANTA TERMELÉTRICA" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/09/2003
- JOAO LUIZ MARCON DONATELLI (1993); "ANALISE TERMODINAMICA APLICADA A CENTRAL TERMERLETRICA DA COMPANHIA SIDERURGICA DE TUBARAO" - CST - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/1993
- Joel Carlos Zukowski Junior (1999); "Estudo da Sensibilidade de um sistema de Refrigeração por Absorção água-Amônia" - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS. 01/10/1999
- Johansson, A (2002); "Entropy and the cost of complexity in industrial production". *Exergy*, Vol. 2, No. 4, 2002, pp. 295-299. 2002
- JONATHAS FERREIRA DE ALMEIDA NETO (2000); "ANÁLISE EXERGÉTICA DO CICLO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR - ETAPA DA MINERAÇÃO ATÉ A PRODUÇÃO DE CONCENTRADO DE URÂNIO (YELLOW CAKE)" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - CIÊNCIAS TÉCNICAS NUCLEARES. 01/03/2000
- Jørgensen, S.E/ de Bernardi, R (1998); "The use of structural dynamic models to explain successes and failures of biomanipulation". *Hydrobiologia*, Volume 379, Numbers 1-3, 1998, pp. 147-158. 1998
- Jørgensen, S.E/ Mejer, H/ Nielsen, S.N (1998); "Ecosystem as self-organizing critical systems". *Ecological Modelling*, Volume 111, Number 2, 1998, pp. 261-268. 1998
- Jørgensen, S.E/ Verdonchot, P/ Lek, S (2002); "Explanation of the observed structure of functional feeding groups of aquatic macro-invertebrates by an ecological model and the maximum exergy principle. *Ecological Modelling*, Volume 158, Number 3, 31 December 2002, pp. 223-231. 2002
- Jørgensen, S.E (2000); "Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas". *Aquatic Ecosystem Health & Management*, Volume 3, Number 3, October 2000, pp. 419-430. 2000
- Jørgensen, S.E (2001); "Parameter estimation and calibration by use of exergy". *Ecological Modelling*, vol. 146, Issues 1-3, pp. 299-302. 2001
- Jørgensen, S.E. / Marques, J. / Nielsen, S.N (2002); "Structural changes in an estuary, described by models and using exergy as orientor", *Ecological Modelling*, vol. 158, Issue 3, pp. 233-240. 2002
- Jørgensen, S.E. / Odum, H.T. / Brown, M.T (2004); "Emergy and exergy stored in genetic information". *Ecological Modelling*, vol. 178, issues 1-2, pp. 11-16. 2004

-
- Jørgensen, S.E/ Fath, B.D (2004); "Modelling the selective adaptation of Darwin's Finches". *Ecological Modelling*, vol. 179, Issues 3-4, pp. 409-418. 2004
- Jørgensen, S.E/ Ladegaard, N/ Debeljak, M/ Marques, J.C (2005); "Calculations of exergy for organisms". *Ecological Modelling*, vol. 185, issues 2-4, pp. 165-175. 2005
- Jose Alexandre Matelli (2001); "Sistemas de Cogeração Baseados em Células-combustível Aplicados em Hospitais" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/05/2001
- JOSE ANTONIO A. ALEGRE VELASQUEZ (1993); "SIMULACAO DOS PROCESSOS E ANALISE EXERGETICO DO MOTOR DE CICLO DIESEL" -Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECANICA. 01/04/1993
- JOSÉ AUGUSTO BORGERT JUNIOR (2003); "Otimização Exergoeconômica de Ciclos de Absorção para Geração de Potência" - Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/02/2003
- José Márcio Costa (2001); "Análise Exergética em Sistemas Elétricos" - Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - ENGENHARIA AGRÍCOLA. 01/03/2001
- Josias da Silva (2002); "ANÁLISE TERMOECONÔMICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE VAPOR E POTÊNCIA DO SEGMENTO DE CELULOSE E PAPEL" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/12/2002
- Juan Harold Sosa Arnao(2003); "Aplicação do Método EGM a Um Recuperador de Calor de Sólidos Particulados Operando com Leito Fluidizado Raso" - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/07/2003
- Júlio Santana Antunes (1999); "Código Computacional para Análise de Sistemas de Cogeração com Turbinas a Gás". - Doutorado. UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/GUARAT. - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/02/1999
- Jun Lan Yang/ Yi Tai Ma/ Min Xia Li/ Hai Qing Guan (2005); "Exergy analysis of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle with a expander". *Energy*, vol. 30, issue 7, pp. 1162-1175. 2005
- Kabelac, S (2005); "Exergy of solar radiation". *Int. J Energy Technology and Policy*, vol.3, nos. 1/2, pp. 115-122. 2005
- Kabo, G.J/ Govin, O.V/ Kozyro, A.A (1998); "Additivity of chemical exergies of alkanes". *Energy*, Volume 23, Number 5, May 1998, pp. 383-391. 1998
- Kahraman, N. / Cengel, Y.A. / Wood, B. / Cerci, Y (2004); "Exergy analysis of a combined RO, NF, and EDR desalination plant". *Desalination*, vol. 171, Issue 3, pp. 217-232. 2004
- Kahraman, N/ Cengel, Y.A (2005); "Exergy analysis of a MSF distillation". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issues 15-16, 2005, pp. 2625-2636. 2005
- Kail, C (1998); "Evaluation of Advanced Combined Cycle Power Plants". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Volume 212, Number 1, 1998, pp. 1-12. 1998
- Kane, M. / Larrain, D. / Favrat, D. / Allani, Y (2003); "Small hybrid solar power system". *Energy*, vol. 28, Issue 14, pp. 1427-1443. 2003
- Kaneko, K. / Ohtani, K. / Tsujikawa, Y. / Fujii, S (2004); "Utilization of the cryogenic exergy of LNG by a mirror gas-turbine". *Applied energy*, vol. 79, Issue 4, pp. 355-369. 2004
- Kanoglu M (2002); "Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant". *Geothermics*, vol. 31, no. 6, pp. 709-724. 2002
- Kanoglu, M. / Kazim Isik, S. / Abusoglu, A (2005); "Performance characteristics of a Diesel engine power plant". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issues 11-12, pp. 1692-1702.
- Kanoglu, M/ Ozdinc Carpinlioglu, M/ Yildirim, M (2004); "Energy and exergy analyses of an experimental open-cycle desiccant cooling system". *Applied Thermal Engineering*, Volume 24, Number 5, April 2004, pp. 919-932. 2004
- Karakus, A.A/ Boyar, S/ Akdeniz, R.C/ Hepbasli, A (2002); "An exergy analysis a mixed feed industry: evaluation of an extruder pellet line". *EE&AE' 2002. International Scientific Conference, Bulgaria*. 2002
- Kashiwagi, T (1994); "Current R and D status and future perspectives of gas cooling and heating technology in Japan". *International conference on natural gas technologies (Kyoto)*, pp. 274-288. 1994
- Kaushik, S.C/ Chandra, H/ Khaliq, A (2005); "Thermal exergy optimisation for an irreversible cogeneration power plant". *International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.3* pp. 260 - 273. 2005
- Kavak Akpınar, E/ Sarsilmaz, C (2004); "Energy and exergy analyses of drying of apricots in a rotary solar dryer". *JN: International Journal of Exergy (IJEX) 2004, Vol. 1, No. 4*, pp. 457-474. 2004
- Kawaguchi, I / Ito, T (1994); "Characteristics of hot water cycle and thermodynamic optimization". *JN: Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu (Japan)*, vol. 574:60, pp. 317-322. 1994
- Kawamiya, N (1994); "Energetic and material technology as seen from the environmental viewpoint". *Chukyo University, Nagoya (Japan)*. 1994

- Kazim, A (2004); "Exergy analysis of a PEM fuel cell at variable operating conditions". *Energy Conversion and Management*, vol. 45, Issues 11- 12, pp. 1949-1961. 2004
- Kazim, A (2005); "Exergoeconomic analysis of a PEM fuel cell at various operating conditions". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issue 7-8, pp. 1073-1081. 2005
- Kearns,D/ Webley, P.A (2003); "Exergy analysis of PSA systems". AICHE Annual Meeting, San Francisco, California. 2003
- Kearns,D/P.A.Webley (2004); "Application of an adsorption non-flow exergy function to an exergy analysis of a pressure swing adsorption cycle". *Chemical Engineering Science*, ISSN: 0009-2509, 59, pg3537-3557. 2004
- Keshavarz A/ Ghassemi M/ Mostafavi A (2003); "Thermal Energy Storage Module Design Using Energy and Exergy Analysis". *Heat Transfer Engineering*, Volume 24, Number 3, May-Jun 2003, pp. 76-85. 2003
- Khalid Ahmed, C.S/ Gandhidasan,P/ Zubair, S.M/Al-Farayedhi, A.A. Exergy analysis of a liquid-desiccant-based, hybrid air-conditioning system. *Energy*, vol. 23, Issue 1, 1998, pp. 51-59. 1998
- Khaliq, A. / Kaushik, S.C (2004); "Second-law based thermodynamic analysis of Brayton/Rankine combined power cycle with reheat". *Applied Energy*, vol. 78, Issue 2, pp. 179-197. 2004
- Kilicaslan, E/Gumus,M/ Binark, A.K. "Exergy analysis of a vapour-compression refrigeration/heat pump cycle with chimney". *JN: International Journal of Exergy (IJEX)* 2004, Vol. 1, No. 4, pp. 448-456. 2004
- Kilkis, B.I (2005); "A road map for emerging low-exergy HVAC systems". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.4 pp. 348 - 365. 2005
- Kilkis, Birol. I (2004); "A simplistic thermal model for solving the exergy flow of the universe with continuous functions of cosmological parameters". *JN: International Journal of Exergy (IJEX)* 2004, Vol. 1, No. 4, pp. 438-447. 2004
- Kim, S-M/ Oh, S-D/ Kwon, Y-H/ Kwak, H-Y (1998); "Exergoeconomic analysis of thermal systems". *Energy*, vol. 23, Issue 5, 1998, pp. 393-406. 1998
- Kirova, Z./Atanasova, L./ Gruncharov,I (1993); "Reducing the energy consumption of the thermochemical decomposition of phosphogypsum to lime and SO₂". *ENSEC '93*, pp. 925-31. Higher Institute of Chemical Technology (BG). 1993
- Kirova-Yordanova, Z (2004); "Exergy analysis of industrial ammonia synthesis". *Energy*, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2373-2384. 2004
- Kirova-Yordanova, Z./ Petkov, K./Mazdrakov, M./ et al. (1993); "Exergy analysis of ammonia and urea plants". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 763-70. Chimco, Vratza / University of Chemical Technology (Bulgaria). 1993
- Kolchinski A.G/ Kuroda T/ Murakami Y/ Itoh K/ Yuyama M/ Wada H/ Mao D/ El-Nashar A.M/ Al-Baghdadi A.A. (1998); "Exergy losses in a multiple-effect stack seawater desalination plant". *Desalination*, Volume 116, Number 1, 1 September 1998, pp. 11-24 1998
- Kopac, M / KoKtuk, L (2005); "Determination of optimum speed of an internal combustion engine by exergy analysis". *Int. J. Exergy*, vol. 2, no. 1, pp. 40-54.
- Kopac, M/ Zemher, B (2004); "Exergy Analysis of the Steam - injected gas turbine". *JN: International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 363-374. 2004
- Koroneos, C / Roumbas, G/ Moussiopoulos, N (2005); "Exergy analysis of cement production". *Int. J. Exergy*, vol. 2, no.1, pp. 55-68. 2005
- Koroneos, C. / Spachos, T. / Moussiopoulos, N (2002); "Exergy analysis of renewable energy sources". *Renewable Energy*, vol. 28, Issue 2, pp. 295-310.
- KORONEOS, C/ HARITAKIS, I/ MICHALOGLOU, K/ MOUSSIOPOULOS, N (2004); "Exergy Analysis for Power Plant Alternative Designs, Part I". *Energy Sources*, Vol. 26, No. 13, 2004, pp. 1277-1285. 2004
- KORONEOS, C/ HARITAKIS, I/ MICHALOGLOU, K/ MOUSSIOPOULOS, N (2004); "Exergy Analysis for Power Plant Alternative Designs, Part II". *Energy Sources*, Vol. 26, No. 13, 2004, pp. 1287-1295. 2004
- Koroneos,C/ Bobolias,C / Spachos, T (1993); "Evaluation of utilisation opportunities of geothermal energy in the Kavala region, Greece, using exergy analysis". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 111 - 127. 2004
- Kotas, T.J / Jassim, R.K. (1993); "Costing of exergy flows in the thermoeconomic optimisation of the geometry of rotary regenerators". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 313-22. 1993
- Kotas, T.J. *Ther Thermal Method of Thermal Plants*. Krieger Publishing company, USA. 1995
- Krakov, K.I (1994); "Relationships between irreversibility, exergy destruction, and entropy generation for systems and components". *ASRHAЕ - winter meeting*, pp. 3- 10. Concordia University, Montreal. 1994
- Krane, J.R / Sekulic D.P (1993); "A preliminary thermodynamic evaluation of a three-fluid heat exchanger." *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 277-87. University of Tennessee (USA) and University of Novi Sad (Yugoslavia). 1993
- Kreetz, H/ Lovegrove, K (2002); "Exergy analysis of an ammonia synthesis reactor in a solar thermochemical power system". *Solar Energy*, vol. 73, Issue 3, pp. 187-194. 2002

- Kucharski, F (1997); "On the concept of exergy and available potential energy". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume 123, Number 543, October 1997 Part A, pp. 2141-2156. 1997
- Kucharski, F (2001); "The interpretation of available potential energy as exergy applied to layers of a stratified atmosphere". Exergy An International Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 25-430. 2001
- Kumar Das S/ Nanda P (2000); "Use of artificial neural network and leveque analogy for the exergy analysis of regenerator beds". Chemical Engineering and Processing, Volume 39, Number 2, 2000, pp. 113-120. 2000
- Kumar Das, S. / Roetzel, W (1998); "Second law analysis of a plate heat exchanger with an axial dispersive wave". Cryogenics, vol. 38, Issue 8, 1998, pp. 791-798.
- Kurpisz, K/ Szczygiel, I (1993); "Heat transformers in cooling and heating systems" - ENSEC '93, pp. 643-649. Technical University of Silesia, Gliwice (Poland). 1993
- Kurtbas, I. / Durmus, A (2004); "Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater". Renewable Energy, vol.29, Issue 9, pp. 1489-1501. 2004
- Kwak, H.-Y. / Kim, D.-J. / Jeon, J.-S (2003); "Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants". Energy, vol. 28, Issue 4, 2003, pp. 343-360. 2003
- Kwak, H.-Y. / Lee, H.-S. / Jung, J.-Y. / Jeon, J.-S. / Park, D.-R (2004); "Exergetic and thermoeconomic analysis of a 200-kW phosphoric acid fuel cell plant". Vol. 83, Issue 14-15, pp. 2087-2094. 2004
- Kwatra, H. S (1996); "Performance of a solar still: Predicted effect of enhanced evaporation area on yield and evaporation temperature". Solar Energy, vol. 56, Issue 3, 1996, pp. 261- 266. 1996
- Kwon, Y.-H. / Kwak, H.-Y. / Oh, S.-D (2001); "Exergoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems". Exergy, An International Journal, vol. 1, Issue 1, 2001, pp. 31-40. 2001
- Lampinen, M.J/ Heikkinen, M.A (1993); "Thermodynamic theory of exergy analysis". DT- Report. pp 40. Helsinki University of Technology (Finland). 1993
- Lavric V./Baetens D./Plesu V./ De Ruyck J (2003); "Entropy generation reduction through chemical pinch analysis". Applied Thermal Engineering, vol. 23, no. 14, 2003, pp. 1837-1845. 2003
- Lazzaretto, A. / Toffolo, A (2004); "Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design". Energy, vol. 29, Issue 8, pp. 1139-1157. 2004
- Lazzaretto, A. / Macor, A. / Reine, M (1993); "EXSO: exergoeconomic symbolic optimization for energy systems, II. Application to a combined plant". Proceedings of ENSEC '93, pp. 331-338. 1993
- Lazzaretto, A./Macor, A./ Reine, M (1993); "EXSO: exergoeconomic symbolic optimization for energy systems, I. Description of the method". Proceedings of ENSEC '93, pp. 323-329. 1993
- Leal, P. M (1997); "Avaliação energética e exergetica de um sistema gerador de processos psicometricos". Tese de doutorado em Engenharia Agricola, Unicamp- 1997.
- Lee, K. C (2001); "Classification of geothermal resources by exergy". Geothermics, vol. 30, Issue 4, pp. 431-442. 2001
- Leites, I.L (1996); "CALCULATION OF EXERGY OF NONIDEAL SYSTEMS AND PRINCIPLE OF COUNTERACTION FOR ENERGY SAVING". ECOS'96 pp.25-28.
- Leites, I.L (1997); "Thermodynamics of CO₂ solubility in mixtures monoethanol- Lamine with organic solvents and water and commercial experience of energy saving gas purification technology". Flowers' 97, pp.1079-89. 1997
- Leites, I.L (2002); "The Second Law and its commandments" (the popular thermodynamics and energy saving chemical technology). 2002
- Leites, I.L./ Berchenko, V.M (1993); "Application of the second law of thermodynamics for optimization of absorption processes to decrease the energy consumption". Proceedings of ENSEC '93, pp. 771-78. 1993
- Leites, I.L./ Berchenko, V.M (1995); "THE EXERGETICAL OPTIMIZATION OF THE CHEMICAL REACTION CONDITIONS". ECOS'95, pp.157-62. 1995
- Leites, I.L/ Sama, D.A/ Lior, N (2004); "Corrigendum to "The theory and practice of energy saving in the chemical industry: Some methods for reducing thermodynamic irreversibility in chemical technology processes". Energy, vol. 29, Issue 2, pp. 301-304. 2004
- Leites, J.L.(1995); "12 Commands of the second law of thermodynamics for energy saving". ECOS'95. 1995
- Leithner, R (1993); "Improving efficiency of brown coal fired power stations"- ENSEC '93, pp. 483-490. Technical University of Braunschweig. 1993
- Leo, T.J. / Perez-Grande, I (2005); "A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system". Applied Thermal Engineering, vol. 25, Issue 2-3, pp. 309-325. 2005
- Lerch, F/ Serra, L/ Royo, J (1999); "Structural Theory and Thermoeconomics Diagnosis. Part II: Application to an actual Power Plant". Proceedings of ECO'99, pp. 374-379, ASME. 1999
- Li, Z.H/ Hua, B (2000); "Modeling and optimizing for heat exchanger networks synthesis based on expert system and exergoeconomic objective function". Computers and Chemical Engineering, Volume 24, Number 2, 15 July 2000, pp. 1223-1228. 2000

- Liang, S.Y. / Wong, T.N. / Nathan, G.K (2000); "Study on refrigerant circuitry of condenser coils with exergy destruction analysis". Applied Thermal Engineering, vol. 20, Issue 6, 2000, pp. 559-577. 2000
- Libralato, S. / Torricelli, P. / Pranovi, F (2004); "Exergy as ecosystem indicator: An application to the recovery process of marine benthic communities". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights. 2004
- Liley, P.E (2002); "Flow exergy of moist air". Exergy, An International Journal, vol. 2, Issue 1, pp. 55-57. 2002
- LIMA SERRA, H (2003); "ANÁLISE TERMODINÂMICA E DE EMISSÕES DE UMA PLANTA PARA SECAGEM DE FERMENTO". DISSERTAÇÃO MESTRADO - ENGENHARIA MECÂNICA, PUC-RIO, 2003.
- Lin, L. / Tsatsaronis, G (1993); "Analysis and improvement of an advanced concept for electric power generation". Proceedings of ENSEC '93, pp. 557-556. Tennessee Technological University. 1993
- Linnhoff, B (1993); "Pinch analysis and exergy: A comparison". Proceedings of ENSEC '93, pp. 43-52. University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST). 1993
- Lior, N (1997); "Advance Energy of power plants". Energy Conversion and Management. Vol. 38, Issues 10, 1997, pp. 941-955. 1997
- Lior, N (1997); "Energy, exergy and thermoeconomic analysis of the effects of fossil-fuel superheating in nuclear power plants". Energy Conversion and Management. Vol. 38, Issues 15-17, 1997, pp. 1585-1593. 1997
- Lior, N. / Al-Sharqawi, H.S (2005); "Exergy analysis of flow dehumidification by solid desiccants", Energy, Vol. 30, Issue 6, May 2005, pp. 915-931. 2005
- Lior, N. / Sarmiento-Darkin, W. / Al-Sharqawi, H.S (2004); "The exergy fields in transport processes: Their calculation and use". Special Issue from The Second ASME-ZSIS International Thermal Science Seminar (ITSS II). 2004
- Lior, N (2003); "Thoughts about future power generation systems and the role of exergy analysis in their development". Energy Conversion and Management, vol. 43, Issue 9-12, pp. 1187-1198. 2003
- Liszka, M. / Manfrida, G. / Ziebig, A (2003); "Parametric study of HRSG in case of repowered industrial CHP plant". Energy Conversion and management, vol. 44, Issue 7, 2003, pp. 995-1012. 2003
- Liu, H/ You, L. Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas. International Journal of Immunopharmacology, Volume 40, Number 14, 1999, pp. 1515-1525. 1999
- Loehlein, K / Fukano, T (1993); "Exergy analysis of refrigerators for large scale cooling systems". 3. international Toki conference on plasma physics and controlled nuclear fusion. pp. 511 518. 1993
- LOGRADO, Cristiano de Lima (2000); "Análise e otimização termoeconômica de turbinas a gás e ciclos combinados". Dissertação mestrado, UnB, engenharia mecânica- 2000.
- Lohlein, K./ Fukano, T (1993); "Exergy Analysis of Refrigerators for Large-Scale Cooling Systems". Fusion Engineering and Design, Vol. 20, No. Jan., pp. 511-518//Exergy, Refrigeration, Cooling System. 1993
- Loiselle S/ Rossi C/ Sabio G/ Canziani G (2001); "The use of systems analysis methods in the sustainable management of wetlands". Hydrobiologia, Volume 458, Numbers 1-3, August 2001, pp. 191-200. 2001
- Lopez L./ Blanco J.M./ Bonilla J.J./ Baeza S./ Sala J.M.(1998); "Determination of energy and exergy of waste heat in the industry of the Basque Country". Applied Thermal Engineering, Volume 18, Number 3, March 1998, pp. 187-197. 1998
- Lorente, S. / Wechsato, W. / Bejan, A (2002); "Fundamentals of tree-shaped networks of insulated pipes for hot water and exergy". Exergy, An International Journal, vol. 2, Issue 4, pp. 227-236. 2002
- Lovegrove, K/ Luzzia A/ McCann, M/ Freitag, O (1999); "EXERGY ANALYSIS OF AMMONIA-BASED SOLAR THERMOCHEMICAL POWER SYSTEMS". Solar Energy, Volume 66, Number 2, June 1999, pp. 103-115. 1999
- Lozano, M. A./ Bartolomé, J.L./ Valero, A./ Reini, M.(1994); "Thermoeconomic diagnosis of energy systems". International Conference Flowers'94, Ed. E. Carnevale, pp. 149-156, July 6-8, Florence, Italy. 1994
- Lozano, M. A./ Valero, A (1993); "Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems". ASME. AES, Vol. 30. Winter Annual Meeting Symposium on Thermodynamics and the Design, Analysis, and Improvement of Energy Systems. Session II: General Thermodynamics & Energy Systems. Ed. H.J. Richter, ASME Book No. H00874, pp. 311-320. 1993
- Lozano, M.A. / Valero, A (1993); "Theory of the Exergetic Cost". JN: Energy, Int. J., vol. 18, no. 9, pp.939-960. 1993
- Lozano, M.A. / Valero, A./ Serra, L (1993); "Theory of exergetic cost and thermoeconomic optimization". Proceedings of ENSEC '93, pp. 339-350. Universidad de Zaragoza. 1993
- Lu, S.-S. / Wong, K.-F.V. / Stoff, L (1998); "Exergetic analysis of cooling systems with ozonation water treatment". Energy Conversion and management, vol. 39, Issue 14, 1998, pp. 1407-1422. 1998
- Lucas, K (2000); "On the thermodynamics of cogeneration". International Journal of Thermal Sciences, Volume 39, Number 9, 2000, pp. 1039-1046. 2000
- Luciana Saliba Moussa (2001); "Análise Termodinâmica de Colunas de Destilação visando à Otimização Energética" -Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA QUÍMICA. 01/10/2001

- Ludovisi, A. / Pandolfi, P. / Illuminata Taticchi, M (2005); "The strategy of ecosystem development: specific dissipation as an indicator of ecosystem maturity". *Journal of Theoretical Biology*, vol. 235, Issue 1, pp. 33-43. 2005
- Ludovisi, A. / Poletti, A (2003); "Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems. 2. Exergy and specific exergy indices". *Ecological Modelling*, vol. 159, Issue 2-3, pp. 223-238. 2003
- Luminosu, I. / Fara, L (2005); "Determination of the optimal operation mode of a flat solar collector by exergetic analysis and numerical simulation". *Energy*, vol. 30, Issue 5, pp. 731-747. 2005
- Luminosu, I/ Fara, L (2005); "Thermodynamic analysis of an air solar collector". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.4 pp. 385 - 408. 2005
- Lutz, A.J (1993); "Gas engines". *JN: Elektrotechnik (Netherlands)*, vol. 71:2, pp. 98-101. *EnergieNed*, Apeldoorn (Netherlands). 1993
- Luz-Silveira, J. / Beyene, A. / Leal, E.M. / Santana, J.A. / Okada, D (2002); "Thermoeconomic analysis of a cogeneration system of a university campus". *Applied Thermal Engineering*, vol. 22, Issue 13, 2002, pp. 1471-1483. 2002
- Magaeva, S/ Patronov, G (2004); "Assessment of the ecological sustainability of pyrometallurgical copper extraction". *JN: International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 375-384. 2004
- Mahmud, S/ Fraser, R.A (2005); "An analytical solution and computer simulation for a multi-plate thermoacoustic system". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.2 pp. 207 - 230. 2005
- Mahmud,S/ Fraser, R.A (2004); "Entropy-energy analysis of porous stack: steady state conjugate problem". *JN: International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 385-398. 2004
- Makarytchev, S.V (1998); "Environmental impact analysis of ACFB-based gas and power cogeneration". *Energy*, Volume 23, Number 9, 1998, pp. 711-717. 1998
- Malinowska, W. / Malinowski, L (2003); "Parametric study of exergetic efficiency of a small-scale cogeneration plant incorporating a heat pump". *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, Issue 4, 2003, pp. 459-472. 2003
- Manninen J/ Zhu X.X (1998); "Thermodynamic Analysis and Mathematical Optimisation of Power Plants". *Computers and Chemical Engineering*, Volume 22, Supplement 1, 1998, pp. 537-544. 1998
- Månsson, B. Å. G./ McGlade, J. M (1993); "Ecology, Thermodynamics and Odum, H. T. Conjectures" /*Oecologia*, Vol. 93, No. 4, pp. 582-596//*Exergy, Ecology, Energy*// 1993
- Marcelo Caldato Fiomari (2004); "Análise Energética e Exergética de uma Usina Sucroalcooleira do Oeste Paulista com Sistema de Cogeração de Energia em Expansão" -Mestrado. UNIVERSIDADE EST.PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/ILHA SOLT - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/12/2004
- Marcelo Modesto da Silva (2004); "Repotenciamento em Sistemas de Geração de Potência na Indústria Siderúrgica Utilizando Análise Termoeconômica". -Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/02/2004
- MARCELO RISSO ERRERA (1994); "CONSIDERACOES AMBIENTAIS EM TERMOCOLOGIA: UM ESTUDO DE CASO" - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECANICA. 01/10/1994
- MARCO ANTÔNIO VILAS BOAS BARRETO RIBEIRO (2004); "ANÁLISE EXERGÉTICA DE ALTERNATIVAS DE COGERAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA QUENTE EM PLANTAS INDUSTRIAIS-ESTUDO DE CASOS APLICADO AO SETOR AUTOMOTIVO" - Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2004
- MARCOS SANDRINI (2003); "Análise Termoeconômica e Engenharia da Central de Utilidades de uma Indústria de Alimentos". - Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2003
- Marechal, F. / Favrat, D. / Jochem, E (2005); "Energy in the perspective of the sustainable development: The 2000 W society challenge. Resources". *Conservation and Recycling*, vol. 44, Issue 3, 2005, pp. 245-262. 2005
- Maria de Lourdes Oliveira Maia (2001); "Síntese e Otimização de Sistemas de Destilação Utilizando a Análise Exergética". - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA QUÍMICA. 01/06/2001
- Maria Isabel Fernández Parra (2003); "METODOLOGIA DE ANÁLISE EXERGOECONÔMICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR" - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/02/2003
- Mario Gabriel Sanchez Prieto (2003); "Aternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso" - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/02/2003
- Marlos Mazzeu Silveira (2000); "Influência da Recompressão no Consumo de Energia e Água na Economia do Aparelho de Destilação" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/12/2000
- Marques J.C/ Nielsen S.N/ Pardal M.A/ Jorgensen S.E (2003); "Impact of eutrophication and river management within a framework of ecosystem theories". *Ecological Modelling*, Vol.166, No. 1, 2003, pp. 147-168. 2003
- Marques J.C/ Pardal M.a/ Nielsen S.N/ Jorgensen S.E (1997); "Analysis of the properties of exergy and biodiversity along an estuarine gradient of eutrophication". *Ecological Modelling*, Volume 102, Number 1, 15 October 1997, pp. 155-167. 1997

- Marquet, P (1993); "Exergy in Meteorology - Definition and Properties of Moist Available Enthalpy". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 119, No. 511, pp. 567-590. 1993
- Marquet, P (2003); "The available-enthalpy cycle. II: Applications to idealized baroclinic waves". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 129, No. 593, 2003 Part B, pp. 2467-2494. 2003
- Marquet, P (2003); "The available-enthalpy cycle. I: Introduction and basic equation". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol.129, No. 593, July 2003 Part B, pp. 2445-2466. 2003
- Marrero, I.O/ Lefsafer, A.M/ Razani, A (2002); "Second law analysis and optimization of a combined triple power cycle". Energy Conversion and management, vol. 43, Issue 4, 2002, pp. 557-573. 2002
- Martin, C. / Villamanan, M.A. / Chamorro, C.R. / Otero, J. / Cabanillas, A. / Segovia, J.J (2005); "Low-grade coal and biomass co-combustion on fluidized bed: exergy analysis". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- ScienceDirect. 12003
- Martinez-Baez, L.F./Arias, R./Merino, A/Beckwith, C (1993); "Energy availability in wet bagasse combustion products for its pre-drying". Proceedings of ENSEC '93, pp.779-85. Centro de Investigacion y Asistencia Técnica, del Estado de Queretaro (mx). 1993
- Maruoka, N. / Akiyama, T (2003); "Exergy recovery from steelmaking off-gas by latent heat storage for methanol production"- ScienceDirect, Ecos 2003. pp. Pages 1632-1642. Hokkaido University. 2003
- Massardo, A.F/ Santarelli, M/ Borchiellini, R (2003); "Carbon exergy tax (CET): its impact on conventional energy system design and its contribution to advanced systems utilization". Energy, vol. 28, Issue 7, pp. 607-625. 2003
- Matsunawa, K (1993); "Exergy evaluation of air conditioning systems and heat pumps". Nikken Sekkei Ltd. JN: Journal of the Society of Heating, Air Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, vol. 67:6, pp. 19- 23. 1993
- Matveev, S.A/ Smorodin, A.I/ Blokhin, A (2001); "Determining the Equivalent Exergy in Making Especial-Purity Products in Air-Separation Plant". Chemical and Petroleum Engineering, Volume 37, Numbers 11-12, 2001, pp. 567-570. 2001.
- MAURA MICHAELA DELLABIANCA ARAÚJO (1995); "Contribuição Metodológica para o Diagnóstico Exergético de Sistemas Térmicos e Elétricos - Estudo de Caso do Hospital Universitário Lauro Wanderley" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA/JOÃO PESSOA - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/10/2004
- MAURILO DE SOUSA TEIXEIRA. Análise Exergetica de Processos de Combustao - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/09/1995
- Maveety J.G/ Razani A (1996); "A two-dimensional numerical investigation of the optimal removal time and entropy production rate for a sensible thermal storage system". Energy, Volume 21, Number 12, December 1996, pp. 1265-1276. 1996
- Maveety, J.G./ Razani, A (1994); "Transient exergy analysis and optimal removal time of a storage system". 29th Intersociety energy conversion engineering conference: Technical papers. Part 3. pp. 1349-1354. 1994
- Mazur, V. A (2005); "Fuzzy thermoeconomic optimization". Int. J. Exergy, vol. 2, no. 1, pp. 1-13. 2005
- McGovern J.A/ Harte S (1995); "An exergy method for compressor performance analysis". International Journal of Refrigeration, Volume 18, Number 6, July 1995, pp. 421-433. 1995
- McGovern, J.A (1993); "Exergetic cost analysis of a mechanical exergy recycle". ENSEC '93, pp. 351-358. Trinity College, University of Dublin (Ireland). 1993
- Meckler, M (1993); "Advanced thermoelectric heat pumps". Innovative energy design for the '90s, pp.55 - 155. 1993
- Mehdizadeh, H (2005); "Membrane desalination plants from an energy-exergy viewpoint". International Congress on Membranes and Membrane Processes (ICOM) - Korea. Tarbiat Modarres University (Iran). 2005
- Meijer, M.G./ Woudstra, N (1993); "Exergy calculations by means of the program CYCLE TEMPO". JN: Mechanische Technologie (nl), vol. 3:4, pp.18-23. Groep Energiesystemen, Sectie Energievoorziening, Technische Univ. Delft. 1993
- Mertensson, A (1996); "Operator-guidance systems for industrial processes: a case study evaluating impact on energy use and NOx control". Energy, Volume 21, Number 12, December 1996, pp. 1233-1245.
- Michaelis, P/ Jackson, T (2000); "Material and energy flow through the UK iron and steel sector - Part 1: 1954-1994. Resources". Conservation and Recycling, Volume 29, Number 1, 2000, pp. 131-156. 2000
- Michaelis, P/ Jackson, T (2000); "Material and energy flow through the UK iron and steel sector - Part 2: 1994-2019. Resources". Conservation and Recycling, Volume 29, Number 3, 2000, pp. 209-230. 2000
- Michaelis, P/Jackson, T/Clift, R (1998); "Exergy analysis of the life cycle of steel". Energy, vol. 23, Issue 3, 1998, pp. 213-220. 1998
- Midilli, A. / Ay, M. / Dincer, I. / Rosen, M.A (2005); "On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 9, Issue 3, pp. 255-271.
- Midilli, A. / Kucuk, H (2003); "Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio". Energy, vol. 28, Issue 6, pp. 539-556. 2003

- Milia, D. / Sciubba, E (2004); "Exergy-based lumped simulation of complex systems: An interactive analysis tool". Copyright © 2004 Elsevier Ltd All rights reserved - ScienceDirect. 2004
- Misra, R.D. / Sahoo, P.K. / Gupta, A (2002); "Application of the exergetic cost theory to the LiBr/H₂O vapour absorption system". *Energy*, vol. 27, Issue 11, 2002, pp. 1009-1025. 2002
- Misra, R.D. / Sahoo, P.K. / Gupta, A (2005); "Thermoeconomic evaluation and optimization of a double-effect H₂O/LiBr vapour-absorption refrigeration system". *Int. J. Of Refrigeration*, vol. 28, Issue 3, 2005, pp. 331-343. 2005
- Misra, R.D. / Sahoo, P.K. / Sahoo, S. / Gupta, A (2003); "Thermoeconomic optimization of a single effect water/LiBr vapour absorption refrigeration system". *Int. J. Of refrigeration*, vol. 26, Issue 2, pp. 158-169. 2003
- Mohammed Ghiyath Soufi/ Terushige Fujii / Katsumi Sugimoto /Hitoshi Asano (2004); A new Rankine cycle for hydrogen-fired power generation plants and its exergetic efficiency. *International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.1* pp. 29 - 46. 2004
- Monanteras, N.C/ Frangopoulos, C.A (1999); "Towards Synthesis Oprtimization of a Fuel-Cell based plant". *Energy Conversion and Management*, vol. 40, Issues 15-16, 1999, pp. 1733-1742. 1999
- Mondjan, G. / Sciubba, E (1993); "Energetic and exergetic analysis of various models of pre-industrial, industrial, and post-industrial societies: limit trends and self-sustainability issues". *Proceedings ENSEC '93*,pp. 87-110. 1993
- Montes, J.M (1993); "An application of probalistic methods to thermodynamics and thermodynamic analysis". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 359-365. Madrid Polytechnical University. 1993
- Moran, M/ Shapiro, H (2000); "Fundamentals of engineering Thermodynamics". Jonh Wiley & Sons, 4th Edition, New York. 2000
- Moreno, J.C/ cañada, J/ Bosca, J.V (2003); "Statistical and Physical Analysis of the External Factors Perturbation on solar radiation Exergy". *Entropy 2003*, 5, pp. 425-466, ISSN 1099-4300. 2003
- Morosuk, T. / Morosuk, C. / Feidt, M (2004); "New proposal in the thermodynamic analysis of complex heat regeneration systems". *Energy*, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2517-2535. 2004
- Morris, D.R (1993); "Technological assessment of alternative processes: the precessing of sulphide minerals". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 747-54. University of New Brunswick, Fredericton (Canada). 1993
- Mountouris, A. / Voutsas, E. / Tassios, D (2005); "Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- scienceDirect. National Technical University of Athens. 2005
- Mozes E/ Cornelissen R.L/ Hirs G.G/ Boom R.M (1998); "Exergy analysis of the conventional textile washing process". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 16, November 1998, pp. 1835-1843. 1998
- Mujumbar, A (2005); "A Review of: "Exergy Method—Technical and Ecological Applications"" *Drying Technology*, vol. 23, Issue 12, 2005, pp. 2523-2524. publisher: Taylor and Francis Ltd. 2005
- Munsch, M./ Futterer, E./ Mohr, T (1993); "Analysis of exergy and evaluation of process plants with a flowsheeting system". *JN: International Chemical Engineering (USA)*, vol. 33:2, pp. 197-206. 1993
- Nag P.K/ Gupta A.V.S.S.K.S (1998); "Exergy analysis of the Kalina cycle". *Applied Thermal Engineering*, Volume 18, Number 6, 16 March 1998, pp. 427-439. 1998
- Nag, P.K/ De, S (1998); "Study of Thermodynamic Performance of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant". *Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy*, Volume 212, Number 2, 1 April 1998, pp. 89-95. 1998
- Nagano, K. / Mochida, T. / Shimakura, K. / Murashita, K. / Takeda, S (2003); "Development of thermal-photovoltaic hybrid exterior wallboards incorporating PV cells in and their winter performances". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 77, Number 3, 30 May 2003, pp. 265-282. 2003
- Nakanishi, S / Kawashima, Y / Murai, K (1994); "Thermodynamic assessment of low-potential thermal energy resources". *ENERGEX 93: 5*. International Energy conference, pp.121-29. Himeji institute of technology (Japan). 1994
- Nakicenovic N/ Gilli P.V/ Kurz R (1996); "Regional and global exergy and energy efficiencies". *Energy*, Volume 21, Number 3, March 1996, pp. 223-237. 1996
- Nakonieczny, K (2002); "Entropy generation in a diesel engine turbocharging system". *Energy*, Vol. 27, No. 11, 2002, pp. 1027-1056. 2002
- Nash A/ Shields P/ Abbott R/ Craig J/ Holmes W/ Criscuoli A/ Drioli E/ Akourri O/ Louah M/ Kifani A/ Gilgert G/ Pluvinage G (2000); "The effect of notch radius on fracture toughness". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 65, No.4, 2000, pp. 491-505. 2000
- Naterer, G (2005); "Surface Micro-Profiling for Reduced Energy Dissipation and Exergy Loss in Convective Heat Transfer". *Microscale Thermophysical Engineering*, vol. 9, Issue 3, 2005, pp. 213-236. publisher: Taylor and Francis Ltd. 2005
- Naterer, G.F/ Adeyinka, O.B (2005); "Microfluidic exergy loss in a non-polarized thermomagnetic field". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, Issue 19-20, pp. 3945-3956. 2005
- Naterer, G.F/ Glockener, P.S/ Thiele, D/ Chomokovski, S/ Venn, G/ Richardson, G (2005); "Surface micro-grooves for near-wall exergy and flow control: application to aircraft intake de-icing". *JN: Micromech. Microeng.* Vol.15, Issue 3, pp. 501-513 .

- Nazmeev, Y.G./Konakhina, I.A (1994); "An increase of thermodynamic and ecological efficiency for synthetic isoprene rubber production". *ENERGEX 93:5*. International Energy conference, pp. 1-12. 1994
- Neelis, M.L. / van der Kooi, H.J. / Geerlings, J.J.C (2004); "Exergetic life cycle analysis of hydrogen production and storage systems for automotive applications". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 29, Issue 5, pp. 537-545. 2004
- Neveu, P/Castaing, J (1993); "Solid gas chemical heat pumps: field of application and performance of the internal heat of reaction recovery process". *JN:Heat Recovery Systems and CHP(UK)*, vol.13:3, pp. 233-151. 1993
- Nielsen S.N (1997); "Examination and optimization of different exergy forms in macrophyte societies". *Ecological Modelling*, Volume 102, Number 1, 15 October 1997, pp. 115-127. 1997
- Nielsen, S.N (2000); "Thermodynamics of an ecosystem interpreted as a hierarchy of embedded systems". *Ecological Modelling*, Volume 135, Issues 2-3 , 2000, Pages 279-289. 2000
- Nielsen, S.N. / Ulanowicz, R.E (2000); "On the consistency between thermodynamical and network approaches to ecosystems". *Ecological Modelling*, Volume 132, Issues 1-2 , 2000, Pages 23-31. 2000
- Nieuwlaar, Evert (1993); "Exergy evaluation of space heating options". *JN: Energy (Oxford)*, vol. 18:7, pp. 779-790. Utrecht Univ. (Netherlands). Dept. of Science, Technology and Society. 1993
- Nikolaïdis, C/ Proert, D (1998); "Exergy-method analysis of a two-stage vapour-compression refrigeration-plants performance". *Applied Energy*, Volume 60, Number 4, 1 August 1998, pp. 241-256. 1998
- Nikulshin V/ Wu, C (2001); "Thermodynamic analysis of energy intensive systems based on exergy-topological models". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 173-179. 2001
- Nikulshin, V. / Wu, C. / Nikulshina, V (2002); "Exergy efficiency calculation of energy intensive systems". *Exergy, an International Journal*, vol. 2, Issue 2, pp. 78-86 2002
- Nilsson D (1997); "Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants". *Biomass and Bioenergy*, Volume 13, Number 1, 1997, pp. 63-73. 1997
- Nishida, K. / Takagi, T. / Kinoshita, S (2005); "Regenerative steam-injection gas-turbine systems". *Applied Energy*, vol. 81, Issue 3, pp. 231-246. 2005
- Noam, L/ Hassan S, A (2005); "Exergy analysis of flow dehumidification by solid desiccants". *Energy*, 2005, vol. 46, issue 6, pp. 410. 2005
- Okazaki, K (1994); "Highly efficient utilization of fossil fuels ad CO2 free combustion". *Journal: Meka Raifu (Japan)*, vol. 36, pp.14-17. Tokyo Institute of Technology. 1994
- Okazaki, K/ Kishida, T/ Ogawa, K/ Nozaki, T (2002); "Direct conversion from methane to methanol for high efficiency energy system with exergy regeneration". *Energy Conversion and Management*, vol. 43, issue 9-12, pp. 1459-1468. 2002
- Oliveira Filho, D/Tanabe, C/Costa, M.J/Jose Helvecio, J (2004); "Exergy and Electrical Rates for Distributed Power Systems". ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASAE Annual Meeting, paper number 044135. 2004
- Oliveira Filho, O.B / Ordenez, J.F (1993); "Exergetic analysis of refrigeration system of the Pelletron-Linac particle accelerator of the University of Sao Paulo. 12 th. Brazilian congress on mechanical engineering. pp. 4pag. 1993
- Oliveira Jr, S / Le Goff, P (1993); "Hybrid systems absorption-compression to upgrade industrial waste"- *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 651-58. 1993
- Oliveira, S. de Jr / Schwarzer, B / Le Goff, P / Tondeur, D (1994); "Optimum entropy, exergy, and economics of a heat exchanger". *JN: International Chemical Engineering*, vol. 34:3, pp. 351-52. CNRS ENSIC INPL(france). 1994
- Ong'iro A.O/ Ugursal V.I/ Al Taweel A.M/ Blamire D.K (1995); "Simulation of combined cycle power plants using the ASPEN PLUS shell". *Heat Recovery Systems and CHP*, Volume 15, Number 2, February 1995, pp. 105-113. 1995
- Oni, A.A (1993); "An entropic analysis of power plant atmospheric pollution effects on energy availability" - 28th intersociety energy conversion engineering conference. Vol. 2 pp. 2.65-2.68. 1993
- Onyegegbu, S.O / Morhenne, J (1993); "Transient multidimensional second law analysis of solar collectors subjected to time-varying insolation with diffuse components". *JN: Solar Energy (USA)*, vol. 50:1, pp. 85-95. 1993
- Oosterkamp, P.F. van/ Goorse, A.A./ Blomen, L.J.M.J (1993); "Review of an energy and exergy analysis of a fuel cell system". *JN: Journal of Power Sources(ch)*,vol. 41:3,pp. 239-52. KTI BV (nl)/Mannesmann Anlagenbau AG. 1993
- Ordenez, J.C/ Bejan, A (2003); "Minimum power requirement for environmental control of aircraft". *Energy*, vol. 28, Issue 12, pp. 1183-1202. 2003
- Ossebaard M.E./ Van Wijk A.J.M./ Van Wees M.T (1997); "Heat supply in The Netherlands: a systems analysis of costs, exergy efficiency, CO2 and NOX emissions". *Energy*, Volume 22, Number 11, November 1997, pp. 1087-1098. 1997
- Ostrovski, O. / Zhang, G (2004); "Energy and exergy analyses of direct ironsmelting processes". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- ScienceDirect. 2004
- OTAVIO DE AVELAR ESTEVES (1996); "ANALISE EXERGETICA DA PRODUCAO DO ETANOL DA CANA DE ACUCAR". - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - CIÊNCIAS TÉCNICAS NUCLEARES. 01/02/1996

- Ouahda, A/ En-nacer, M/ Adjlout, L/ Imine, O (2005); "Exergy analysis of a two-stage refrigeration cycle using two natural substitutes of HCFC22". *Int. J. Exergy*, vol. 2, no. 1, pp. 14-30. 2005
- Ozcan, H/ Soylemez, M.S (2005); "Effect of water addition on the exergy balances of an LPG fuelled spark ignition engine". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.2 pp. 194 - 206. 2005
- Ozcelik, Y/ Ozcelik, Z (2004); "Utility optimisation for distillation columns via simulated annealing". *JN: International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 334-349. 2004
- Ozdinc Carpinlioglu, M/ Yildirim, M/ Kanoglu, M (2004); "Experimental study on an open cycle desiccant cooling system". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.2 pp. 268 - 288. 2004
- Özdoğan, S/ Arikol, M (1995); "Energy and exergy analyses of selected Turkish industries". *Energy*, vol. 20, Issue 1, 1995, pp. 73-80. 1995
- Ozgener, L/ Hepbasli, A/ Dincer, I. (2004); "Thermo-mechanical exergy analysis of Balcova Geothermal District Heating system in Izmir, Turkey". *ASME-Journal of Energy Resources Technology*, vol. 126, pp. 293-301. 2004
- Ozgener, L/ Hepbasli, A/ Dincer, I. (2005); "Energy and exergy analysis of geothermal district heating systems: an application". *Building and Environment*, vol. 40, pp. 1309-1322. 2005
- Ozgener, L/ Hepbasli, A/ Dincer, I. (2005); "Energy and exergy analysis of Gonen geothermal district heating system, Turkey". *Geothermics*, vol.34(5), pp. 632-645. 2005
- Ozgener, L/ Hepbasli, A./ Dincer, I. (2005); "Energy and exergy analysis of Salihli geothermal district heating system in Manisa, Turkey". *International Journal of Energy Research*, vol. (29), pp.393-408. 2005
- Ozgener, L/ Hepbasli, A/ Dincer, I (2005); "Thermodynamic analysis of a geothermal district heating system". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.3 pp. 231 - 245. 2005
- Ozgener, O. / Hepbasli, A (2005); "Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system". *Energy and Building*, vol. 37, Issue 1, pp. 101-110. 2005
- Ozgener, O. / Hepbasli, A (2005); "Exergoeconomic analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system". *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, Issue 10, pp. 1459-1471. 2005
- Ozturk, H.H (2004); "Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker". *Solar Energy*, vol. 77, Issue 1, pp. 67-71. 2004
- Ozturk, H.K. / Canyurt, O.E. / Hepbasli, A. / Utlu, Z (2004); "Three different genetic algorithm approaches to the estimation of residential exergy input/output values". *Building and Environment*, vol. 39, Issue 7, pp. 807-816. 2004
- Ozturk, H.K. / Ceylan, H. / Hepbasli, A. / Utlu, Z (2004); "Estimating petroleum exergy production and consumption using vehicle ownership and GDP based on genetic algorithm approach". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, Issue 3, pp. 289-302. 2004
- Pablo Arena, A. / Borchiellini, R (1999); "Application of different productive structures for thermoeconomic diagnosis of a combined cycle power plant". *Int. J. Of Thermal Science*, vol. 38, issue 7, 1999, pp. 601-612. 1999
- Pak, P. / Suzuki, Y (1993); "CO2 recovering non polluting high efficient gas turbine power generation system utilizing saturated steam as its working fluid". *JN: Denki Gakkai Ronbunshi (Japan)*, vol. 113:3, pp. 266-272. 1993
- Park, Y.-S. / Kwak, I.-S. / Chon, T.-S. / Kim, J.-K. / Jorgensen, S.E (2001); "Implementation of artificial neural networks in patterning and prediction of exergy in response to temporal dynamics of benthic macroinvertebrate communities in streams". *Ecological Modelling*, vol. 146, Issue 1-3, pp. 143-157. 2001
- Park, Y.S. / Lek, S. / Scardi, M. / Verdonschot, P.F.M. / Jorgensen, S.E (2002); "Patterning exergy of benthic macroinvertebrate communities using self-organizing maps". *Selected Papers from the Third Conference of the International Society for Ecological Informatics (ISEI), August 26--30, 2002, Italy*. 2002
- Parlak, A (2005); "The effect of heat transfer on performance of the Diesel cycle and exergy of the exhaust gas stream in a LHR Diesel engine at the optimum injection timing". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issue 2, pp. 167-179. 2005
- Parlak, A. / Yasar, H. / Eldogan, O (2005); "The effect of thermal barrier coating on a turbo-charged Diesel engine performance and exergy potential of the exhaust gas". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issue 3, pp. 489-499. 2005
- Parra, M.A.F (2005); "Metodologia de analise exergoeconomica do processo de fabricação de açúcar". *Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Unicamp*- 2005.
- Patten, B.C (1995); "Network integration of ecological extremal principles: exergy, energy, power, ascendancy, and indirect effects". *Ecological Modelling*, Volume 79, Number 1, May 1995, pp. 75-84. 1995
- Patzek, T (2004); "Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle". *Critical Reviews in Plant Sciences*, Vol. 23, No. 6, 2004, pp. 519-567. publisher: Taylor and Francis Ltd. 2004
- Patzek, T/Pimentel, D (2005); "Thermodynamics of Energy Production from Biomass". *Critical Reviews in Plant Sciences*, Volume 24, Numbers 5-6, Number 5-6, 2005, pp. 327-364. publisher: Taylor and Francis Ltd. 2005
- PAULO ADEMAR MARTINS LEAL (1997); "Avaliação Energética e Exergética de um Sistema Gerador de Processos Psicrométricos" - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA AGRICOLA. 01/03/1997

-
- Pedinelli, N. / Rosen, M.A./ Hooper, F.C (1993); "Thermodynamic assesment of cold capacity, thermal energy storage systems" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 705-712. 1993
- Pedro Alberto Díaz Rojas (2000); "Análise Termodinâmica de Ciclo de Potência Utilizando Turbina a Gás com Injeção de Água no Ar de Combustão" - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2000
- Pedro Augusto Vieira (2002); "Análise Exergoeconômica Aplicada à Usina Termelétrica de Figueira". - Mestrado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/12/2002
- PEDRO WALLACE DE PAULA AMARAL DO VALLE (2003); "ANÁLISE EXERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DO VINHOTO DO CALDO-DE-CANA EM UMA MICRODESTILARIA" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - CIÊNCIAS TÉCNICAS NUCLEARES . 01/12/2003
- Perez-Segarra, C.D. / Rigola, J. / Soria, M. / Oliva, A (2005); "Detailed thermodynamic characterization of hermetic reciprocating compressors". International Journal of Refrigeration, vol. 28, Issue 4, pp. 579-593. 2005
- Petela, R (2005); "Exergy analysis of the solar cylindrical-parabolic cooker", Solar Energy, vol. 79 (2005) pp. 221-233. 2005
- Petela, R. / Hutny, W. / Price, J.T (2002); "Energy and exergy consumption and CO2 emissions in an ironmaking process". Advances in Environmental Research, vol. 6, Issue 2, pp. 157-170. 2002
- Petela,R (2003); "Exergy of undiluted thermal radiation", Solar Energy, vol. 74 (2003), Issue 6, pp. 469-488. 2003
- Petrescu, S./Costea, M./Stanescu, G/Iordache, R/Brusalis, T/Petrescu, V (1993); "The dimensional optimization of a cavity type receiver for a solar stirling engine". Proceedings of ENSEC '93, pp. 891-98. Polytechnical Institute of Bucharest (ro). 1993
- Popem W.L (2005); "A necessary condition for optimum Rankine cycle power plants". International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.3 pp. 318 - 333. 2005
- Poredos, A. / Kitanovski, A (2002); "Exergy loss as a basis for the price of thermal energy". Energy Conversion and Management, vol 43, Issue 16, pp. 2163-2173. 2002
- Prek, M (2004); "Exergy analysis of thermal comfort". JN: International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 303 - 315. 2004
- Prek, M (2005); "Thermodynamic analysis of Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort". International Journal of Heat and Mass Transfer , vol. 48, issue 3-4, pp. 731-739. 2005
- Pridasawas, W. / Lundqvist, P (2004); "An exergy analysis of a solar-driven ejector refrigeration system". Solar Energy, vol. 76, Issue 4, pp. 369-379. 2004
- Prins, M.J. / Ptasiński, K.J / Janssen, F.J.J.G (2005); "Exergetic optimisation of a production process of Fischer–Tropsch fuels from biomass". Fuel Processing Technology , vol. 86, Issue 4, pp. 375-389. 2005
- Prins, M.J. / Ptasiński, K.J (2005); "Energy and exergy analyses of the oxidation and gasification of carbon". Energy, Vol. 30, Issue 7, pp. 982-1002. 2005
- Ptasiński, K.J/ Hamelinck, C/ Kerhof, P.J.A.M (2002); "Exergy Analysis of methanol from the sewage sludge process". Energy Conversion and Management, vol. 43, Issues 9-12, pp. 1445-1457. 2002
- Pustovalov, J (1993); "Exergy method of costs distribution at CHP plants from idea (1926) up to the present days". Proceedings of ENSEC '93, pp. 513-521. VNIPIenergoprom, Moscow (Russia). 1993
- Qiang,W/ Yanzhong, L/ Jiang, W (2004); "Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source". Applied Thermal Engineering, Vol. 24, No. 4, 2004, pp. 539-548. 2004
- Qisheng, Q./ Jun, W (1993); "The optimization of an air-conditioning system by using the method of exergy analysis" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 671-676. Northern Jiaotong University, Beijing. 1993
- Quijano, J (2000); "Exergy analysis for the Ahuacachapan and Berlin Geothermal Fields, El Salvador". Proceedings World Geothermal Congress 2000. pp. 861-866. 2000
- Radenco, Vs./Apostol, V./Radenco, L (1993); "Reconsideration of the exergetic method based on thermodynamics in finite time and on "expower" concept". ENSEC'93, pp. 289-296. Polytechnic Institute of Bucarest (Romania). 1993
- Raghu Ram J/ Banerjee R (2003); "Energy and cogeneration targeting for a sugar factory". Applied Thermal Engineering, vol. 23, no. 12, 2003, pp. 1567-1575. 2003
- Rakopoulos C.D/ Andritsakis E.C/ Hountalas D.T (1995); "The influence of the exhaust system unsteady gas flow and insulation on the performance of a turbocharged diesel engine". Heat Recovery Systems and CHP, Volume 15, Number 1, January 1995, pp. 51-72. 1995
- Rakopoulos C.D/ Giakoumis E.G (1997); "Simulation and exergy analysis of transient diesel-engine operation". Energy, Volume 22, Number 9, September 1997, pp. 875-885. 1997
- Rakopoulos, C.D/ Kyritsis, D.C (2001); "Comparative second-law analysis of internal combustion engine operation for methane, methanol, and dodecane fuels". Energy, vol. 26, Issue 7, pp. 705-722. 2001

Rakopoulos,C.D/ Andritsakis,E.C/ Kyritsis,D.K (1993); "Availability accumulation and destruction in a DI diesel engine with special reference to the limited cooled case". JN:Heat Recovery Systems and CHP(UK),vol.13:3, pp.261-76. 1993

Ralf Lattouf (2003); "Análise Exergética de Processos Mitigadores de Impacto Ambiental". Mestrado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ENGENHARIA MECÂNICA - 01/02/2003

Ranz, L/ Valero, A/ Cebollero, M (1998); "Application of Szargut methodology to an exergetic account of Earth's mineral capital". Seminar on Contemporary Problems of Thermal Engineering. 1998

Rao, M.S. / Singh, S.P. / Sodha, M.S. / Dubey, A.K. / Shyam, M (2004); "Stoichiometric, mass, energy and exergy balance analysis of countercurrent fixed-bed gasification of post-consumer residues". Biomass and Bioenergy, vol. 27, Issue 2, pp. 155-171. 2004

Rasheva, D.A. / Atanasova, L.G (2002); "Exergy efficiency evaluation of the production of sulfuric acid from liquid sulfur". Exergy, an International Journal, vol. 2, Issue 1, pp. 51-54. 2002

Rasul, M.G. / Widiyanto, W. / Mohanty, B (2005); "Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia". Applied Thermal Engineering, vol. 25, Issues 17-18, pp. 2950-2965. 2005

Ratkje S.K/ De Swaan Arons J (1995); "Denbigh revisited: reducing lost work in chemical processes". Chemical Engineering Science, Volume 50, Number 10, May 1995, pp. 1551-1560. 1995

Ratkje, S.K / Moeller-Holst, S (1993); "Exergy efficiency and local heat production in solid oxide fuel cells". JN: Electrochimica Acta(UK), vol. 38:2 3, pp. 447-53. Trondheim University (Norway). Norwegian Institute of Technology. 1993

Raúl Gonzales Palomino (2004); "Cogeração a partir de Gás Natural: Uma Abordagem Política, Econômica, energética, Exergética e Termoeconômica" - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS. 01/11/2004

Ravikumar T.S/ Suganthi L/ Anand A.S (1998); "Exergy analysis of solar assisted double effect absorption refrigeration system". Renewable Energy, Volume 14, Number 1, May 1998, pp. 55-59.

Ray, S. / Berc, L. / Straskraba, M. / Jorgensen, S.E (2001); "Optimization of exergy and implications of body sizes of phytoplankton and zooplankton in an aquatic ecosystem model". Ecological Modelling, vol. 140, Issue 3, pp. 219-234. 2001

Razani, A/ Flake, B/ Yarbrough, S/Abhyankar, N.S (2004); "A Power-Efficiency Diagram for Performance Evaluation of Cryocoolers". AIP Conference Proceedings, vol. 710, pp. 1527-1535. ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference - CEC. 2004

Remelje, C.W. / Hoadley, A.F.A (2004); "An exergy analysis of small-scale liquefied natural gas (LNG) liquefaction processes". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved - ScienceDirect. BHP Billiton and Monash University (AU). 2004

Rezac, P/ Metghalchi, H (2004); "A brief note on the historical evolution and present state of exergy analysis". JN: International Journal of Exergy (IJEX) 2004, Vol. 1, No. 4, pp. 426-437.

Rivero, R (1993); "Tridimensional exergy diagram". Proceedings of ENSEC '93, pp. 305-312. CNRS-ENSIC-INPL (France). 1993

Rivero, R (2001); "Exergy simulation and optimization of adiabatic and diabatic binary distillation". Energy, vol. 26, Issue 6, pp. 561-593. 2001

Rivero, R. / Garcia, M. / Urquiza, J (2004); "Simulation, exergy analysis and application of diabatic distillation to a tertiary amyl methyl ether production unit of a crude oil refinery". Energy, vol. 29, Issue 3, pp. 467-489. 2004

Rivero, R. / Rendon, C. / Gallegos, S (2004); "Exergy and exergoeconomic analysis of a crude oil combined distillation unit". Energy, vol. 29, Issues 12-15, pp. 1909-1927. 2004

Rivero, R (2002); "Application of the exergy concept in the petroleum refining and petrochemical industry". Energy Conversion and Management, 2002, vol. 43, Issues 9-12, pp. 1199-1220. 2002

Rodríguez Marulanda, M.C (2003); "Exergia- Una oportunidad para el desarrollo tecnológico". Revista Cintex - tecnológico Pascual Bravo, vol. 1, 2003/2004, pp. 27- 29. 2003

ROGERIO JOSE DA SILVA (1994); "ANÁLISE ENERGETICA DE PLANTAS DE PRODUCAO DE CIMENTO PORTLAND" - DOUTORADO. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECANICA. 01/12/1994

ROJAS GORDILLO, I (2005); "ANÁLISE EXERGÉTICA EN DOS PUNTOS CRÍTICOS EN UNA INDUSTRIA PRODUCTORA DE HARIANA DE PESCADO. TESIS DE MAESTRIA, UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO, ENGENIERÍA MECÁNICA, 2005

Romero-Ternero, V. / Garcia-Rodriguez, L. / Gomez-Camacho, C (2005); "Exergy analysis of a seawater reverse osmosis plant". Desalination, vol. 175, Issue 2, pp. 197-207. 2005

Romero-Ternero, V. / Garcia-Rodriguez, L. / Gomez-Camacho, C (2005); "Thermoeconomic analysis of a seawater reverse osmosis plant". Desalination, vol 181, Issues 1-3, pp. 43-59.

- Romero-Ternero, V. / Garcia-Rodriguez, L. / Gomez-Camacho, C.(2005); "Thermoeconomic analysis of wind powered seawater reverse osmosis desalination in the Canary Island". *Desalination*, vol. 186, issues 1-3, pp. 291-298. 2005
- Ronald Faleiro Bastos.(2004); "Análise energética e exergética de indústrias de cimento" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/2004
- Rosa, M.A.(1996); "Comparative assessment of thermodynamic efficiencies and losses for natural gas-based production processes for hydrogen, ammonia and methanol". *Energy Conversion and Management*, Volume 37, Number 3, March 1996, pp. 359-367. 1996
- Rosa, M.A.(1996); "Thermodynamic investigation and comparison of selected production processes for hydrogen and hydrogen-derived fuels". *Energy*, Volume 21, Number 12, December 1996, pp. 1079-1094. 1996
- Rosen M.A.(2002); "Does industry embrace exergy?" *Exergy, An International Journal*, 2002, 2, (4), 221-223. 2002
- Rosen M.A.(2002); "Exergy and Economics: Is Exergy Profitable?" *Exergy*, vol. 2, no. 4, pp. 218-220. 2002
- Rosen M.A.(2002); "Exergy and Government Policy: Is there a link?" *Exergy*, vol. 2, no. 4, pp. 224-226. 2002
- Rosen, M.A, Associate Editor.(2002); "Can exergy help us understand and address environmental concerns?" *Exergy, An International Journal*, Vol. 2, Issue 4, 2002, pp. 214-217. 2002
- Rosen, M.A.(2002); "Exergy conservation: An alternative to conserving the already conserved quantity energy." *Exergy, an International Journal*, vol. 2, Issue 2, pp. 59-61. 2002
- Rosen, M.A.(2002); "Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics". *Applied Energy*, vol. 72, Issue 1, 2002, pp. 427-441. 2002
- Rosen, M.A.(2001); "Editorial - Exergy in Industry: Accepted or not". *Exergy*, Volume 1, Number 2, 2001, pp. 67. 2001
- Rosen, M.A.(1995); "Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production". *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 20, Number 7, July 1995, pp. 547-553. 1995
- Rosen, M.A.(2002); "Energy crisis or exergy crisis?". *Exergy, an International Journal*, vol. 2, Issue 3, pp. 125-127. 2002
- Rosen, M.A.(1999); "Second-law analysis of aquifer thermal energy storage systems". *Energy*, vol. 24, Issue 2, 1999, pp. 167-182. 1999
- Rosen, M.A.(1999); "Second-law analysis: approaches and implications". *International Journal of Energy Research*, vol. 23, Issue 5, pp. 415-429. 1999
- Rosen, M.A.(2002); "Should we educate the public about exergy?" *Exergy*, vol. 2, Issue 4, pp. 211-213. 2002
- Rosen, M.A.(2001); "The exergy of stratified thermal energy storages". *Solar Energy*, vol. 71, Issue 3, pp. 173-185. 2001
- Rosen, M.A. / Dincer, I.(2004); "Effect of varying dead-state properties on energy and exergy analyses of thermal systems". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, Issue 2, pp. 121-133. 2004
- Rosen, M.A. / Dincer, I.(2003); "Exergoeconomic analysis of power plants operating on various fuels". *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, Issue 6, 2003, pp. 643-658. 2003
- Rosen, M.A. / Dincer, I.(2005); "Thermoeconomic analysis of power plants: an application to a coal fired electrical generating station". *Energy Conversion and Management*, vol. 44, Issue 17, pp. 2743-2761. 2005
- Rosen, M.A. / Le, M.N. / Dincer, I.(2005); "Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system". *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, Issue 1, pp. 147-159. 2005
- Rosen, M.A. / Scott, D.S.(2003); "Entropy production and exergy destruction: Part I—hierarchy of Earth's major constituencies". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, Issue 12, pp. 1307-1313. 2003
- Rosen, M.A. / Scott, D.S.(2003); "Entropy production and exergy destruction: Part II—illustrative technologies". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, Issue 12, pp. 1315-1323. 2003
- Rosen, M.A.(2002); "Clarifying thermodynamics efficiencies and losses via exergy". *Exergy*, vol 2. pp. 3-5. 2002
- Rosen, M.A.(2001); "Energy - and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 3, pp. 180-192. 2001
- Rosen, M.A.(2002); "Thermodynamics education: Is present coverage of exergy sufficient and appropriate". *Exergy, An International Journal*, 2002, volo. 2, Issue 4, pp.207–210. 2002
- Rosen, M.A/ Le, M.N/ Dincer, I.(2004); "Thermodynamic assessment of an integrated system for cogeneration and district heating and cooling". *International Journal of Exergy* 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 94 - 110. 2004
- Rosen, M.A/ Dincer, I.(2003); "Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes". *Energy Conversion and Management*, vol. 44, Issue 10, pp. 1633-1651. 2003
- Rosen, M.A/ Dincer, I.(2001); "Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-13. 2001
- Rosen, M.A/ Dincer, I.(2003); "Thermoeconomic analysis of power plants: an application to a coal fired electrical generating station". *Energy Conversion and Management*, vol. 44, Issue 17, 2003, pp. 2743-2761. 2003

- Rosen, M.A./ Dincer, I.(1998); "ON EXERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACT". International Journal of Energy Research, vol. 21, Issue 7, pp. 643-654. 1998
- Rosen, M.A./ N. Le, M/ Dincer, I.(2004); "Exergetic analysis of cogeneration-based district energy systems". Proceedings of the IMECH E Part A Journal of Power and Energy, Vol. 218, No. 6, 2004, pp. 369-375. 2004
- Rosen, M.A / Etele, J.(2004); "Aerospace systems and exergy analysis: applications and methodology development needs". JN: International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.4 pp. 411 - 425. 2004
- Rosen, M.A. / Dincer, I.(2003); "Exergy methods for assessing and comparing thermal storage systems". International Journal of Energy Research, vol. 27, Issue 4, pp. 415-430. 2003
- Rousche, P.J/ Petersen, R/ Battiston, S/ Giannotta, S/ Diamond, M.E/ Abdallah, H/ Facchini, B/ Danes, F/ De Ruyck, J.(1999); "Exergetic optimization of intercooled reheat chemically recuperated gas turbine". Energy Conversion and Management, Volume 40, Number 15, 1999, pp. 1679-1686. 1999
- Royo, F./ Valero, A.(1995); "Towards a Unified Description of the Energy Behaviour of Thermomechanical Systems in Thermodynamics and the Design". Analysis and Improvement of Energy Systems, AES, vol. 35, ASME book no. H01045, pp. 127-134. ISBN 0-7918-1764-4, San Francisco, CA. 1995
- Sadi, M.H/ Allaf Yazdi, M.R.(1999); "Exergy model of a vortex tube system with experimental results". Energy, vol. 24, Issue 7, 1999, pp. 625-632. 1999
- Sahin, B.(1998); "Exergy optimization for an endoreversible cogeneration cycle". Fuel and Energy Abstracts, Volume 39, Number 1, January 1998, pp. 67-67. 1998
- Sahin, B. / Kodal, A.(2002); "Thermoeconomic optimization of a two stage combined refrigeration system: a finite-time approach". International Journal of Refrigeration, vol. 25, issue 7, 2002, pp. 872-877. 2002
- Sahin, B. / Kodal, A. / Koyun, A.(2001); "Optimal performance characteristics of a two-stage irreversible combined refrigeration system under maximum cooling load per unit total cost conditions". Energy Conversion and Management, vol. 42, issue 4, 2001, pp. 451-465. 2001
- Sahin, B/ Kodal, A/ Ekmekci, I/ Yilmaz, T.(1997); "Exergy optimization for an endoreversible cogeneration cycle". Energy, vol. 22, Issue 5, 1997, pp. 551-557. 1997
- Sahoo, P.K/ Misra, R.D/ Gupta, A.(2004); "Exergoeconomic optimisation of an aqua-ammonia absorption refrigeration system". International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 82 - 93. 2004
- Said, S.A.M / Ismail, B.(1994); "Exergetic assessment of the coolants HCFC123, HFC134a, CFC11, and CFC12". Journal: Energy (Oxford), vol. 19:11 pp. 1181-1186. King Fahd University of Petroleum and Minerals. 1994
- Saidi, M.H. / Ehyaei, M.A. / Abbasi, A.(2005); "Optimization of a combined heat and power PEFC by exergy analysis". Journal of Power Sources, vol. 143, Issues 1-2, pp. 179-184. 2005
- Saitoh, H. / Hamada, Y. / Kubota, H. / Nakamura, M. / Ochifuji, K. / Yokoyama, S. / Nagano, K.(2003); "Field experiments and analyses on a hybrid solar collector". Applied Thermal Engineering, vol. 23, Issue 16, pp. 2089- 2105. 2003
- Salas, F. / Marcos, C. / Perez-Ruzafa, A. / Marques, J.C.(2005); "Application of the exergy Index as ecological indicator of organically enrichment areas in the Mar Menor Lagoon (South- eastern, Spain)". Energy, vol. 30, Issue 13, pp. 2505- 2522. 2005
- Salomonsen, J/ Jensen, J.J.(1996); "Use of a lake model to examine exergy response to changes in phytoplankton growth parameters and species composition". Ecological Modelling, Volume 87, Number 1, June 1996, pp. 41-49. 1996
- Sama, D.A.(1993); "The use of the second law of thermodynamics in the design of heat exchangers, heat exchanger networks, and processes". Proceedings of ENSEC '93, pp. 53-76. University of Massachusetts Lowell (USA). 1993
- San, J-Y/ Jan C-L.(2000); "Second-law analysis of a wet crossflow heat exchanger". Energy, vol. 25, issue 10, 2000, pp. 939-955. 2000
- Sankara, J.(2005); "Exergy Based Method for Sustainable Energy Utilization Analysis of a Net Shape manufacturing System". Degree of Master in Science in Mechanical Engineering, University of Kentucky, 2005.
- Santarelli, M. / Macagno, S.(2004); "A thermoeconomic analysis of a PV-hydrogen system feeding the energy requests of a residential building in an isolated valley of the Alps". Energy Conversion and Management, vol. 45, Issue 3, pp. 427-451. 2004
- Santarelli, M.G.L.(2004); "Carbon exergy tax: a thermo-economic method to increase the efficient use of exergy resources". Energy Policy, vol. 32, issue 3, pp. 413-427. 2004
- Sari, A/ Kaygusuz, K.(2000); "Energy and Exergy Calculations of Latent Heat Energy Storage Systems". Energy Sources, Volume 22, Number 2, 2000, pp. 117-126. 2000
- Suar, E/ Rivero, R/ Kjelstrup, S/ Lien, K.M.(1997); "Diabatic column optimization compared to isoforce columns". Energy Conversion and Management, Volume 38, Number 15, October 1997, pp. 1777-1783. 1997
- Schneider, E.D/ Kay, J.J.(1993); "Exergy degradation, thermodynamics, and the development of ecosystems" - Proceedings of ENSEC 93, pp 33-42. Hawkwood Institute Livingston and University of Waterloo. 1993

- Schwarz, P./ Lozano, M. A./ Von Spakovsky, M.R./ Valero, A.(1997); "Diagnostic analysis of a PFBC power plant using a thermoeconomic methodology". TAIES'97, Proceedings of International Conference. Eds. R. Cai, M.J. Moran, S. Zhang, Y. Xiao. World Pubs. Corp., pp. 240-249, ISBN 7-5062-3264-Z/TK.6. 1997
- Sciencutycz, S.(2003); "A Synthesis of Thermodynamic Models Unifying Traditional and Work-Driven Operations with Heat and Mass Exchange". Open Systems and Information Dynamics, Volume 10, Number 1, 2003, pp. 31-49. 2003
- Sciubba, E.(2001); "Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems". Exergy An International Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 68-84. 2001
- Sciubba, E.(2003); "Cost analysis of energy conversion systems via a novel resource-based quantifier". Energy, vol. 28, Issue 5, 2003, pp. 457-477. 2003
- Sciubba, E.(2003); "Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste: The concept of total recycling". Energy, vol. 28, Issue 13, pp. 1315-1334. 2003
- Sciubba, E. / Ulgiati, S.(2005); "Energy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options?". Energy, vol. 30, Issue 10, pp. 1953-1988. 2005
- Scott, D.S. Exergy. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 28, Issue 4, pp.369-375. 2003
- Seager, T.P. / Theis, T.L.(2004); "A taxonomy of metrics for testing the industrial ecology hypotheses and application to design of freezer insulation". Journal of Cleaner Production, vol. 12, Issue 8-10, pp. 865-875. 2004
- Seager, T.P/ Theis T.L.(2002); "A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology". Journal of Cleaner Production, Volume 10, Number 3, June 2002, pp. 225-235. 2002
- Sencan, A. / Yakut, K.A. / Kalogirou, S.A.(Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems. Renewable Energy, vol. 30, Issue 5, p.p 645-657.
- Sérgio Augusto Araújo da Gama Cerqueira.(1999); "Metodologia da análise termoeconômica" - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/1999
- Sérgio Henrique Bernardo de Faria.(1996); "Estudo energético de colunas de destilação através de análise energética". - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA QUÍMICA. 01/08/1996
- Sérgio Henrique Bernardo de Faria.(2003); "Estudo Energético de Colunas de Destilação Através de Análise Exergética - Sistemas Não Ideais". - Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA QUÍMICA. 01/02/2003
- Serova, E.N. / Brodianski, V.M.(2004); "The concept "environment" in exergy analysis. Some special cases". Energy, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2397-2401. 2004
- Shah L.J/ Furbo, S.(2003); "Entrance effects in solar storage tanks". Solar Energy, Vol. 75, No. 4, 2003, pp. 337-348. 2003
- Shuja, S.Z.(2002); "Optimal fin geometry based on exergoeconomic analysis for a pin-fin array with application to electronics cooling". Exergy, An International Journal, vol. 2, Issue 4, 2002, pp. 248-258. 2002
- Shuja,S.Z. / Yilbas, B.S.(2004); "A turbulent submerged swirling jet expansion in still air and entropy generation". JN: International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 399-409. 2004
- Sieniutycz S.(1998); "Hamilton-Jacobi-Bellman analysis of irreversible thermal exergy". International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 41, Number 1, January 1998, pp. 183-195. 1998
- Sieniutycz, S.(1999); "Carnot problem of maximum work from a finite resource interacting with environment in a finite time". Physica A, Volume 264, Number 1, 15 February 1999, pp. 234-263. 1999
- Sieniutycz, S.(1998); "Generalized Carnot problem of maximum work in finite time via Hamilton-Jacobi-Bellman theory". Energy Conversion and Management, Volume 39, Number 16, 1998, pp. 1735-1743. 1998
- Sieniutycz, S.(1998); "Generalized Thermodynamics of Maximum Work in Finite Time". Open Systems and Information Dynamics, Volume 5, Number 4,1998, pp. 369-390. 1998
- Sieniutycz, S.(1998); "Nonlinear thermokinetics of maximum work in finite time". International Journal of Engineering Science, Volume 36, Number 5, 1998, pp. 577-597. 1998
- Sieniutycz, S.(2003); "Thermodynamic limits on production or consumption of mechanical energy in practical and industrial systems". Progress in Energy and Combustion Science, vol. 29, Issue 3, 2003, pp. 193-246. 2003
- Sieniutycz, S.(2000); "Thermodynamic optimization for work-assisted heating and drying operations". Energy conversion and Management, vol. 41, Issue 18, 2000, pp. 2009-2039. 2000
- Sieniutycz, S. / Szwasz, Z. "Thermodynamic framework for work-assisted unit operations". Exergy, An International Journal, volume 1, Issue 3 , 2001, Pages 166-172. 2001
- Sieniutycz, S. / von Spakovsky, M.R.(1998); "Finite time generalization of thermal exergy". Energy Conversion and Management, vol. 39, Issue 14, 1998, pp. 1423-1447. 1998
- Sieniutycz, S/ Kubiak, M.(2002); "Dynamical energy limits in traditional and work-driven operations I. - heat - mechanical system". International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, No. 14, 2002, pp. 2295-3012. 2002
- Sieniutycz, S/ Kubiak, M.(2002); "Dynamical energy limits in traditional and work-driven operations II. - Systems with heat and mass transfer". International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, No. 26, 2002, pp. 5221-5238. 2002

- Silas Vieira.(1998); "Estudo de Configurações de Sistemas Térmicos de Geração de Energia Elétrica através da Análise de Exergia e de Termoeconomia" - Mestrado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - INTERUNIDADES EM ENERGIA. 01/02/1998
- Silva, R.J./ Nebra, S.A.(1993); "Exergetic analysis of clinker burning process in cement industry" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 739-45. Federal School Engineering of Itajuba / University State of Campinas (Brazil). 1993
- Silveira J.L./ Martins Leal E/ Ragonha L.F.(2001); "Analysis of a molten carbonate fuel cell: cogeneration to produce electricity and cold water". Energy, Volume 26, Number 10, October 2001, pp. 891-904. 2001
- Silveira, J.L. / Tuna, C.E.(2003); "Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I". Progress in Energy and Combustion science, vol. 29, Issue 6, 2003, pp. 479-485. 2003
- Silveira, J.L. / Tuna, C.E.(2004); "Thermoeconomic analysis method for optimization of combined heat and power systems—part II". Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, issue 6, pp. 673-678. 2004
- SILVIO JOSE ROSSI.(1993); "DESENVOLVIMENTO E AVALIACAO DE UMA BOMBA DE CALOR USADA NO CONDICIONAMENTO DE AR PARA SECAGEM DE ALIMENTOS". Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA DE ALIMENTOS. 01/05/1993
- Singh, N. / Kaushik, S.C. / Misra, R.D.(2000); "Exergetic analysis of a solar thermal power system". Renewable Energy, vol. 19, Issues 1-2, 2000, pp. 135-143. 2000
- Slesarenko, V.N.(2003); "Comparison of the efficiency of MSF and thin-film desalination plants". Desalination, Vol. 158, No.1, 1 2003, pp. 295-302. 2003
- Slesarenko, V.N.(2001); "Thermal analysis of thin film desalination systems". Desalination, Volume 139, Number 1, 20 September 2001, pp. 399-404. 2001
- Smith Jr, R.L/ Adschiri, T/ Arai, K.(2002); "Energy integration of methane's partial-oxidation in supercritical water and exergy analysis". Applied Energy, vol. 71, Issue 3, pp. 205-214. 2002
- Smith, M.A. / Fewb, P.C.(2001); "Second law analysis of an experimental domestic scale co-generation plant incorporating a heat pump". Applied Thermal engineering, vol. 21, Issue 1, 2001, pp. 93-110. 2001
- Som, S. K.; Dash, S. K.(1993); "Thermodynamics of spray evaporation"/Journal of Physics. D, Applied Physics, Vol. 26, April 14, pp. 574-84//Exergy, Atomization/Mathematical models, Evaporation//ISSN 0022-3727. 1993
- Somasundaram, P/ Dinakaran, R/ Iniyan, S/ Samuel, A.A.(2004); "Exergy based refrigerant selection and simulation of auto refrigeration cascade (ARC) system". International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.1 pp. 60 - 81. 2004
- Song, S. / Douvartzides, S. / Tsiakaras, P.(2005); "Exergy analysis of an ethanol fuelled proton exchange membrane (PEM) fuel cell system for automobile applications". Journal of Power Sources, vol. 145, Issue 2 , 2005, pp. 502-514. 2005
- Song, T.W. / Sohn, J.L. / Kim, J.H. / Kim, T.S. / Ro, S.T.(2002); "Exergy-based performance analysis of the heavy-duty gas turbine in part-load operating conditions". Exergy, an International Journal, vol. 2, Issue 2, pp. 105-112. 2002
- Song, Z-P.(2000); "Total energy system analysis of heating". Energy, Volume 25, Issue 9 , September 2000, Pages 807-822. 2000
- Sorin M/ Bonhivers J.-C/ Paris J.(1998); "Exergy efficiency and conversion of chemical reactions". Energy Conversion and Management, Volume 39, Number 16, November 1998, pp. 1863-1868. 1998
- Sorin, M / Varennes, P.Q.(1994); "Thermodynamic efficiency of sorption heat pumps". JN: Renewable Energy (UK), vol. 5:1-4. World renewable energy congress, pp. 412-14. Ecole Polytechnique, CANMET, Montreal. 1994
- Sorin, M.V. / Brodyansky, V.M. / Valero, A.(1993); "Transit exergy in the costing definition" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 367-378. Ecole Polytechnique, Moscow, Power Engineering Institute and Universidad de Zaragoza. 1993
- Sorin, M/ Hammache, A/ Diallo, O.(2000); "Exergy based approach for process synthesis". Energy, 25, Issue 2, pp. 105-129. 2000
- Sorin, M/ Hammache, A/ Diallo, O.(2001); "Exergy load distribution approach for multi-step process design". Applied Thermal Engineering, vol. 20, Issues 15-16, pp. 1365-1380. 2001
- Sorin, M/ Paris, J.(1997); "Combined Exergy and Pinch Approach to Process Analysis"; Computers and Chemical Engineering, Volume 21, Supplement, 1997, pp. 23-28. 1997
- Soufi, M.G/Fujii,T/ Sugimoto, K.(2004); "A modern injected steam gas turbine cogeneration system based on exergy concept". International Journal of Energy Research, vol. 28, issue 13, pp. 1127-1144. 2004
- Sow, O. / Siroux, M. / Desmet, B.(2005); "Energetic and exergetic analysis of a triple-effect distiller driven by solar energy". Desalination, vol. 174, Issue 3, pp. 277-286. 2005
- Sozen A./Ozalp M.(2003); "Performance improvement of absorption refrigeration system using triple-pressure-level". Applied Thermal Engineering, vol. 23, no. 13, 2003, pp. 1577-1593. 2003
- Sozen, A.(2003); "Effect of irreversibilities on performance of an absorption heat transformer used to increase solar pond's temperature". Renewable Energy, Vol. 29, No. 4, 2003, pp. 501-515. 2003
- Speight, J.(2005); "A Review of: "The Exergy Method: Technical and Ecological Applications" Energy Sources, Volume 27, Number 11, August 2005, pp. 1099-1101. Taylor and Francis Ltd. 2005

- Spinner, B. / Sorin, M. / Berthiaud, J. / Mazet, N. / Rheault, F.(2005); "New cascades for thermo-chemical refrigeration". *International Journal of Thermal Sciences*, vol, 44, issue 12, pp. 1110-1114. 2005
- Srinivasagupta, D/ Kardos, J.(2004); "Ecologically and economically conscious design of the injected pultrusion process via multi-objective optimization". *Modelling Simul. Sci. Eng.*, vol. 12, pp. s205-s219. 2004
- Srinivasan, K. / Lim, Y.K. / Ho, J.C. / Wijesundera, N.E.(2003); "Exergetic analysis of carbon dioxide vapour compression refrigeration cycle using the new fundamental equation of state". *Energy Conversion and Management*, vol. 44, Issue 20, pp. 3267-3278. 2003
- Staine F/ Favrat D.(1996); "Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors". *Applied Thermal Engineering*, Volume 16, Number 6, June 1996, pp. 497-507. 1996
- Staine, F / Favrat, D.(1993); "Energy integration of industrial processes based on a graphic representation of exergy factors" - *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 427-37. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (Switzerland). 1993
- Starobinski, R/ Auregan, Y.(1998); "FLUCTUATIONS OF VORTICITY AND ENTROPY AS SOURCES OF ACOUSTICAL EXERGY". *Journal of Sound and Vibration*, Volume 216, Number 3, 1998, pp. 521-527. 1998
- Stegou-Sagia, A. / Paignianis, N.(2005); "Evaluation of mixtures efficiency in refrigerating systems". *Energy Conversion and Management*, vol. 46, Issue 17, pp. 2787-2802. 2005
- Stepanov, V.(1993); "Estimation of energy efficiency and consumption in aluminum production from nepheline". *ENSEC '93*, pp. 797-805. Siberian Energy Institute, Irkutsk (Russia). 1993
- Stepanov, V.S.(1995); "Chemical energies and exergies of fuels". *Energy*, vol. 20, Issue 3, 1995, pp. 235-242. 1995
- Stepanov, V.S.(1995); "A method for estimating the energy efficiency of the economy". *Energy*, Volume 20, Number 6, June 1995, pp. 577-583. 1995
- Stepanov, V.S/ Stepanova, T.B.(2004); "Energy Demand Forecasting by Thermodynamic Analysis of Energy Consumed Processes". *Energy Sources*, Volume 26, Number 7, 2004, pp. 647-660. 2004
- Stepanov, V/ Stepanov, S.91998); "Energy use efficiency of metallurgical processes". *Energy Conversion and Management*, Volume 39, Number 16, November 1998, pp. 1803-1809. 1998
- Stitou, D./ Spinner, B/ Satzger, P/ Ziegler, F.(2000); "Development and comparison of advanced cascading cycles coupling a solid/gas thermochemical process and a liquid/gas absorption process". *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, Issue 14, 2000, pp.1237-1269. 2000
- Stougie, L./ Dijkema, G.P.J/ Van der Kooi, H.J.(1994); "High quality energy savings by means of practical exergy analys. A comparison of methanol production processe". *JN:Énergie en Milieuspectrum(nl)*, vol.10,pp.28-32. 1994
- STRAPASSON, A.B.(2004); "A ENERGIA TÉRMICA E A PARADOXA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: DESAFIOS PARA UM NOVO MODELO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO". UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, USP-2004.
- Struchtrup H/ Rosen M.A.(2002); "How much work is lost in an irreversible turbine?" *Exergy*, Vol. 2, No. 3, 2002, pp. 152-158. 2002
- Sue, D-C. / Chuang, C-C.(2004); "Engineering design and exergy analyses for combustion gas turbine based power generation system". Vol. 29, Issue 8, pp. 1183-1205. 2004
- Suganthi, L/ Samuel, A.A.(2000); "Exergy based supply side energy management for sustainable energy development". *Renewable Energy*, Volume 19, Number 1, 2000, pp. 285-290. 2000
- Susani, L. / Pulselli, F.M. / Jorgensen, S.E. / Bastianoni, S.(2005); "Comparison between technological and ecological exergy". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- ScienceDirect. 2005
- Svirezhev, Y.M.(2000); "Thermodynamics and Ecology". *Ecological Modelling*, Vol. 132, Issues 1-2 , 30 2000, p.p 11-22. 2000
- Svirezhev, Y.M. / Steinborn, W.H.(2001); "Exergy of solar radiation: information approach". *Ecological Modelling*, vol. 145, Issue 2-3, pp. 101-110. 2001
- Svirezhev, Y.M. / Steinborn, W.H. / Pomaz, V.L.(2003); "Exergy of solar radiation: global scale". *Ecological Modelling*, vol. 169, Issue 2-3, pp. 339-346. 2003
- Syahrul, S. / Hamdullahpur, F. / Dincer, I.(2002); "Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles". *Exergy, an International Journal*, vol. 2, Issue 2, pp. 87-98. 2002
- Syahrul, S/ Dincer, I/ Hamdullahpur, F.(2003); "Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 42, Issue 7, 2003, pp. 691-701. 2003
- Szargut, J.(2002); "Application of exergy for the determination of the pro-ecological tax replacing the actual personal taxes". *Energy*, vol. 27, Issue 4, pp. 379-389. 2002
- Szargut, J.(2001); "Sequence method of determination of partial exergy losses in thermal systems". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 2, pp. 85-90. 2001
- Szargut, J. / Ziebik, A. / Stanek, W.(2002); "Depletion of the non-renewable natural exergy resources as a measure of the ecological cost". *Energy Conversion and Management*, vol. 43, Issues 9-12, pp. 1149-1163. 2002

- Szargut, J. T.(2003); "Anthropogenic and natural exergy losses (exergy balance of the Earth's surface and atmosphere)". Energy, vol. 28, Issue 11, pp. 1047-1054. 2003
- Szargut, Jan/ Valero, A./ Stanek, W./Valero, Al.(2005); "Towards a legal international reference environment.". Proceedings of ECOS 2005;Vol 1 pp.409.
- Szarzut, J.T.(2004); "Optimization of the design parameters aiming at the minimization of the depletion of non-renewable resources". Energy, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2161-2169. 2004
- Talbi M.M/ Agnew B.(2000); "Exergy analysis: an absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids". Applied Thermal Engineering, Volume 20, Number 7, 2000, pp. 619-630. 2000
- Tamm, G. / Goswami, D.Y. / Lu, S. / Hasan, A.A.(2004); "Theoretical and experimental investigation of an ammonia–water power and refrigeration thermodynamic cycle". Solar Energy, vol. 76, Issues 1-3, pp. 217-228. - Solar World Congress 2001. 2004
- Taniguchi, H. / Mouri, K. / Nakahara, T. / Arai, N.(2005); "Exergy analysis on combustion and energy conversion processes". Energy, vol. 30, issues 2-4, pp. 111-117. 3rd International Symposium on Advanced Energy Conversion Systems and Related Technologies. 2005
- Taprap, R/ Phutthame, K.(2003); "Energy and exergy analysis of canned food plant in thailand". King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2003
- Tawfik, T. / Tsatsaronis, G. / Price, D.(1993); "Exergetic comparison of various IGCC power plant designs" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 585-593. Tennessee Technological University. 1993
- Tchouate Heteu, P.M/ Bolle, L.(2002); "Economie d'energie en trigeneration". International Journal of Thermal Sciences, Volume 41, Number 12, December 2002, pp. 1151-1159. 2002
- Teke, I / Kincay, O / Temir, G.(1993); "Determination of economic heat exchanger type according to exergy loss" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 387-91. Technical University of Yildiz, Istanbul (Turkey). 1993
- Teke, I.(1993); "Determination of economic thickness and material kind of a plane wall as insulation" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 379-85. Technical University of Yildiz, Istanbul (Turkey). 1993
- Tekin, T. / Bayramoglu, M.(2001); "Exergy and structural analysis of raw juice production and steam-power units of a sugar production plant". Energy, vol. 26, Issue 3, pp. 287-297. 2001
- Telmo Machado Ghiorzi.(1997); "Análise Exergética em Plantas de Separação Primária de Petróleo" - Mestrado. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - ENGENHARIA DE PETROLEO. 01/07/1997
- Temir, G. / Bilge, D.(2004); "Thermoeconomic analysis of a trigeneration system". Applied Thermal Engineering, vol. 24, issue 17-18, pp. 2689-2699. 2004
- Tiedeman, J.S/ Sherif, S.A.(2003); "Optimum coefficient of performance and exergetic efficiency of a two-stage vapour compression refrigeration system". Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 217, No. 9, 2003, pp. 1027-1037. 2003
- Toffolo, A. / Lazzaretto, A.(2002); "Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design". Energy vol. 27, Issue 6, 2002, pp. 549-567. 2002
- Torre-reyes, E/ navarrete-Gonzalez, J.J/ Cervantes de Gortari, J.G.(2004); "Thermodynamic optimization as an effective tool to design solar heating systems". Energy, vol. 29, Issues 12-15, pp. 2305-2315. 2004
- Torres, C.(2003); "Symbolic thermoeconomic analysis of energy systems". EOLSS PUBLISHERS; LTD U.K, 2003
- Torres, C/ Valero, A./ Serra, L/ Royo, J.(1999); "Structural Theory and Thermoeconomics Diagnosis. Part I: On Malfunction and Dysfunction Analysis". Proceedings of ECO'99, pp. 368-373, ASME. 1999
- Torres, E. R., Nuñez, M.P/Cervantes, J. de G.(1998); "Exergy analysis and optimization of a solar-assisted heat pump". Energy, vol. 23, Issue 4, 1998, pp. 337-344. 1998
- Torres, E.A/ Gallo, W.L.R.(1998); "Exergetic evaluation of a cogeneration system in a petrochemical complex". Energy Conversion and management, vol. 39, Issues 16-19, 1998, pp. 1845-1852. 1998
- Torres-Reyes, E. / Navarrete-Gonzalez, J.J. / Zaleta-Aguilar, A. / Cervantes-de Gortari, J.G.(2003); "Optimal process of solar to thermal energy conversion and design of irreversible flat-plate solar collectors". Energy, vol. 28, Issue 2, 2003, pp. 99-113. 2003
- Tozer, R./ Lozano, M. A./ Valero, A./ James, R.(1996); "Thermoeconomics applied to an air conditioning system with cogeneration". Proceedings of the Chartered Institution of Building Services A. Building Services Engineering Research and Technology. Vol. 17, No. 1, pp. 37-42. 1996
- Tran, T.M/ Gruber, R/ Appert, K/ Wuthrich, S/ Katagiri, K/ Shoji, Y/ Ebisawa, N/ Noto, K/ Shin, H.S/ Watanabe, K/ Okada, T/ Hiraoka, M/ Yuya, S/ Al-Sofi, M.A.K./ Srouji M.M.(1996); "Fuel allocation in dual-purpose plants". Desalination, Volume 100, Number 1, January 1996, pp. 65-70. 1996
- Traverso, A. / Massardo, A.F.(2002); "Thermoeconomic analysis of mixed gas–steam cycles". Applied Thermal Engineering, vol. 22, Issue 1, 2002, pp. 1-21. 2002
- Trubaev, P/ Beseden, P.(2005); "Criteria for the Thermodynamic Efficiency of Cement Clinker Production from Natural Raw Material". Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Vol. 39, Number 6, 2005, pp. 628-634. 2005

- Tsatsaronis, G./ Lin, L. / Pisa, J.(1993); "Exergy costing in exergoeconomics". JN: Journal of Energy Resources Technology (USA), vol.115:1, pp.9-16. Tennessee Technological University. 1993
- Tsatsaronis, G / Tawfik, T.A.(1993); "Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems". Prog. Energy Combustion Sci; vol 19, pp. 227-257. 1993
- Tsatsaronis, G.(2004); "Exergoeconomics: Is it only a new name?" Chemical Engineering & Technology, vol. 19, Issue 2, pp. 163- 169. 2004
- Tsatsaronis, G./ Krane, R.J.(1993); "Exergy analysis and thermoeconomics in search of cost effective solutions Part 1: Exergy analysis". 15th World energy engineering congress (WEEC), pp. 361 366. 1993
- Tsatsaronis, G./ Krane, R.J.(1993); "Exergy analysis and thermoeconomics in search of cost effective solutions Part 2: Thermoeconomics". 15 th World energy engineering congress (WEEC), pp. 367-373. 1993
- Tsatsaronis, G./ Lin, L.(1993); "Cost optimization of an advanced concept for generating electric power". 28th intersociety energy conversion engineering conference, vol. 2 , pp. 2.99 2.104. 1993
- Tsatsaronis, G/ Moran, M.J.(1997); "Exergy - aided cost minimization". Energy Conversion and Management, vol. 38, Issues 15-17, 1997, pp. 1535-1542. 1997
- Tsatsaronis, G/ Park, M-H.(2002); "On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems". Energy Conversion and Management, vol. 43, Issues 9–12, pp. 1259–1270. 2002
- Tsatsaronis, G/Pisa, J.(1994); "Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems - application to the CGAM problem". JN: Energy-Int. J; vol. 19, pp. 287-321. 1994
- Twort, C.T/ Lowndes, I.S/ Pickering, S.(2002); "An application of thermal exergy analysis to the development of mine cooling systems". Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 216, No. 8, 1 2002, pp. 845-857. 2002
- Tyagi, S.K. / Lin, G. / Kaushik, S.C. / Chen, J.(2004); "Thermoeconomic optimization of an irreversible Stirling cryogenic refrigerator cycle". Int. J. Of Refrigeration, vol. 27, Issue 8, 2004, pp. 924-931. 2004
- Uche, J./ Serra, L./ Valero, A.(2001); "Thermoeconomic optimization of a dual-purpose power and desalination plant." Elsevier Science, 2001, pp. 147-158. 2001
- Ugarte, S/ Metghalchi, H.(2005); "Evolution of adiabatic availability and its depletion through irreversible processes" International Journal of Exergy 2005 - Vol. 2, No.2 pp. 109 - 119. 2005
- Uirajara Vieira Junior.(2004); "ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PLANTA PRODUTORA DE ACETALDEÍDO" - Mestrado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/09/2004
- Ukidwe, N.U/Bakshi ,B.R.(2004); "Thermodynamic accounting of ecosystem contribution to economic sectors with application to 1992 U.S. economy". Environ Sci Technol. 2004, vol. 38, Issue 18, pp. 4810-4827. 2004
- Umetsu, T/ Ohtani, H/ Uehara, Y.(1995); "Experimental study on the intensity and probability of vapour explosions". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 8, Number 1, 1995, pp. 23-27. 1995
- Utlu, Z. / Hepbasli, A.(2005); "Analysis of energy and exergy use of the Turkish residential–commercial sector. Building and Environment", vol. 40, Issue 5, pp. 641-655. 2005
- Utlu, Z. / Hepbasli, A.(2003); "A study on the evaluation of energy utilization efficiency in the Turkish residential-commercial sector using energy and exergy analyses". Energy and buildings, vol. 35, Issue 11, pp. 1145-1153. 2003
- Utlu, Z. / Hepbasli, A.(2004); "Estimating the energy and exergy utilization efficiencies for the residential–commercial sector: an application" - ScienceDirect, Turkish Land Forces NCO Vocational College and Ege University. 2004
- Utlu, Z. / Sogut, Z. / Hepbasli, A. / Oktay, Z.(2005); "Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production". Published by Elsevier Ltd. Turkish Land Forces NCO/Ege University/Balikesir University - Turkey. 2005
- Valero, A.(1999); "Qualifying Irreversibilities through. Second Law: Exergy accounting". This Gordon Research Conference. Modern Developments in Thermodynamics. Il Ciocco, Tuscany, Italia. 1999
- Valero, A.(1995); "On the energy costs of present day society". ASME. AES, Vol. 35. Keynote presentation. Thermodynamics and the design, analysis and improvement of energy systems. Ed. R.J. Krane, ASME Book No. H01045, pp. 1-15. San Francisco, CA. 1995
- Valero, A. / Correas, L. / Zaleta, A. / Lazzaretto, A. / Verda, V. / Reini, M. / Rangel, V.(2004); "On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 2. Malfunction definitions and assessment". Energy, vol. 29, Issue 12-15, pp. 1889-1907. 2004
- Valero, A. / Lerch, F. / Serra, L. / Royo, J.(2002); "Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part II: Application to an actual power plant". Energy Conversion and Management, vol. 43, Issues 9-12, 2002, pp. 1519-1535. 2002
- Valero, A. / Lozano, M.A. / Bartolome, J.L.(1996); "On-line monitoring of power-plant performance, using exergetic cost techniques". Applied Thermal Engineering, vol, 16, issue 12, 1996, pp. 933-948. 1996
- Valero, A. / Lozano, M.A. / Serra, L. / Torres, C.(1994); "Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem". Energy, vol. 19, Issue 3, 1994, pp. 365-381. 1994
- Valero, A. / Lozano, M.A. / Serra, L. / Tsatsaronis, G. / Pisa, J. / Frangopoulos, C. / von Spakovsky, M.R.(1994); "CGAM problem: Definition and conventional solution". Energy, vol. 19, Issue 3, 1994, pp. 279-286. 1994

- Valero, A.(2004); "Exergy Accounting: Capacibilities and drawbacks". Copyright © 2004 Elsevier Ltd All rights reserved - ScienceDirect. 2004
- Valero, A.(1995); Thermoconomics: The Meeting Point of thermodynamics, Economics and Ecology in Second Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21 st Century, pp. 293-305, Roma. 1995
- Valero, A./Torres, L./Serra, L.(1999); "On-line Thermo-economic Diagnosis of Thermal Power Plants". A. Bejan and E. Mamut (eds.), Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems, pp. 117-136. 1999 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 1999
- Valero, A./ Royo, J./ Lozano, M. A.(1995); "The characteristic equation and second law efficiency of thermal energy systems". International Conference Second Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century. Eds. E. Sciubba, M.J. Moran. Roma "La Sapienza", pp. 99-112, ISBN 88-86662-00-9. 1995
- Valero, A/ Serra, L/ Uche, J.(2000); "Fundamentals of thermoconomics". EURO summer course on Sustainable Assessment of Clear Air Technologies. 2000
- Valero, A/ Serra, L/Lozano, M.A.(1993); "Structural Theory of Thermoconomics in thermodynamics and the Design, Analysis and Improvements of energy systems", ASME- AES vol. 30, pp. 189-198, ASME book no. H00874, New York. 1993
- Valero, A/ Torres, C/ Lerch, F.(1999); "Structural Theory and Thermoconomics Diagnosis. Part III: Intrinsic and Induced Malfunctions". Proceedings of ECO'99, pp. 35-41 ASME. 1999
- Valero, A/ Valero, A / Martinez, A.(2005); "Exergy Evaluation of the Mineral Capital on Earth, Influence of the Reference Environmental". Proceeding of IMECE 2005, ASME. 2005
- Van der Ploeg, P.(1993); "Heat pumps: Exergy and flexibility". JN: Energie Technologie (nl), vol. 3:9, pp. 20-25. Samenwerkende Electriciteits-Productiebedrijven SEP NV (Netherlands). 1993
- Van Gool, W.(1998); "Thermodynamics of chemical references for exergy analysis". Energy Conversion and Management, Volume 39, Number 16, 1998, pp. 1719-1728. 1998
- Van Schijndel, P.P.A.J/ Van Kasteran, J.M.N/ Janssen, F.J.J.G.(1998); "Exergy Analysis - A tool for sustainable technology- in engineering education". Paper published in proceeding of ENTRÉE '98, (environment training in Engineering education), netherlands. 1998
- Vandenoosterkamp, P. F./ Goorse, A. A./ Blomen, L. J. M. J.(1993); "Review of an Energy and Exergy Analysis of a Fuel-Cell System". JN: Journal of Power Sources, Vol. 41, No. 3, pp. 239-252//Exergy, Fuel Cell/// 1993
- Vargas J.V.C/ Bejan A. (2001); "Integrative thermodynamic optimization of the environmental control system of an aircraft". International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 44, Number 20, 2001, pp. 3907-3917. 2001
- Vargas, J.V.C.(2002); "Maximum exergy input rate from a hot stream in solar-driven refrigerators". Fuel and Energy Abstracts, Vol. 43, No.4, 2002, pp. 285-285. 2002
- Vargas, J.V.C. / Bejan, A.(2000); "Thermodynamic optimization of the match between two streams with phase change". Energy, vol. 25, Issue 1, 2000, pp. 15-33. 2000
- Verda, V.(2001); "Thermoconomics Diagnosis of an Urban District Heating based on Cogeneration Steam". Ph.D. Thesis. Polytechnic of Turin and University of zaragoza. 2001
- Verda, V./ Serra, L./ Valero, A.(2002); "Effects of the Productive Structure on the Results of the Thermo-economic Diagnosis of Energy Systems". JN: Int. J. Applied Thermodynamics, Vol.5 (No.3), pp. 127-137. 2002
- Verda, V./ Serra, L./ Valero, A.(2002); "Zooming Procedure for the Thermo-economic Diagnosis of Highly Complex Energy Systems". JN: Int. J. of applied thermodynamics, vol. 5, no. 2. 2002
- Verdesca, D. / Federici, M. / Torsello, L. / Basosi, R.(2003); "Exergy-economic accounting for sea-coastal systems: A novel approach Special Issue on Southern European Coastal Lagoons" - Selected Papers from the Conference on Southern European Coastal Lagoons: The Influence of River Basin--Coastal Zone Interactions, Ferrara, Italy. 2003
- Verkhivker, G.P/ Kosoy, B.V.(2001); "On the exergy analysis of power plants". Energy Conversion and Management, vol. 42, Issue 18, pp. 2053-2059. 2001
- Verschoor, M.J.E.(1993); "Process integration methods: Pinch technology versus exergy analysis and optimization". JN: Proces Technologie (nl), vol.3:10, pp.33-40. Instituut voor Milieu en Energietechnologie IMET TNO (nl). 1993
- Vicente José Fachina Deo.(2004); "ANÁLISE EXERGÉTICA NUMÉRICA DA DIGESTÃO ANAERÓBICA" - Profissionalizante. UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/05/2004
- Vieira, L.S. / Donatelli, J.L. / Cruz, M.E.(2004); "Integration of an iterative methodology for exergoeconomic improvement of thermal systems with a process simulator". Energy Conversion and Management, vol. 45, Issue 15-16, pp. 2495-2523. 2004
- Von Spakovsky, M.R.(1994); "ication of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem". Energy, vol. 19, Issue 3, 1994, pp. 343-364. 1994
- Vorotyntsev, V.M. / Drozdov, P.N.(2002); "Ultrapurification of gases in a continuous membrane column cascade". Desalination, vol. 147, Issues 1-3, 2002, pp. 433-438. 2002
- Wall,G.(2001); "Exergetics" in EOLSS Our Fragile World, Ed. M.K. Tolba, Eolss Publishers, Oxford, ISBN 0-9534944-7-0. 2001

- Wall, G.(1993); "Exergy, ecology and democracy" - concepts of a vital society ENSEC '93, pp 111-121. University of Karlstad (Sweden). 1993
- Wall, G.(1995); "An Exergy Tax", presented at "2nd European Congress on Economics and Management of Energy in Industry", Portugal, publ. I. E. Smith et al, Eds. ECEMEI, pp. 56-63. 1995
- Wall, G.(2002); "Conditions and Tools in the Design of Energy Conversion and Management Systems of a Sustainable Society" Energy Conversion and Management, vol. 43, No. 9-12, pp. 1235-1248. 2002
- Wall, G.(1995); "Exergy Analysis of Processes to Reduce Environmental Pollution", position paper at "Second Intern. Thermal Energy Congress Symposium on Thermodynamic Process Analysis", Agadir, Morocco, publ. E. Bilgen, et al, Eds. ITEC95 , Montreal, pp. 792-5. 1995
- Wall, G.(2002); "Exergy and Life Support Systems" in Knowledge Base for Sustainable Development - An Insight into the Encyclopedia of Life Support Systems, UNESCO Publishing/EOLSS Publishers, Oxford, ISBN UNESCO 92-3-103860-5, pp. 403-417. 2002
- Wall, G.(2001); "The Use of Natural Resources in Society" in EOLSS Our Fragile World, Ed. M.K. Tolba, Eolss Publishers, Oxford, ISBN 0-9534944-7-0, pp. 209-230. 2001
- Wall, G.(1997); "Energy, Society and Morals", Journal of Human Values, vol. 3, no. 2, Sage Publications New Delhi/Thousand Oaks/London, pp. 193-206. 1997
- Wall, G.(1997); "Exergy Use in the Swedish Society 1994", presented at the ITAIES'97, Beijing, China, publ. Ruixian Cai, et al. Eds., Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, pp. 453-460, Beijing World, ISBN 7-5062-3264-Z. 1997
- Wall, G.(1999); "Future Research of Exergy and Its Application" pres. "ECOS'99 - International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems" 1999
- Wall, G.(2001); "Life Support Systems and Sustainable Development" in EOLSS Our Fragile World, Ed. M.K. Tolba, Eolss Publishers, Oxford, ISBN 0-9534944-7-0. 2001
- Wall, G.(1995); "Exergy and Morals". Position paper at "Second-Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century", Rome, Italy, publ. E. Sciubba & M. J. Moran, Eds. Roma, pp. 21-29. 1995
- Wall, G.(2003); "Exergy tool". Proceedings of the I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Volume 217, Number 2, 1 April 2003, pp. 125-136. 2003
- Wall, G/ Gong, M.(1996); "Exergy Analysis versus Pinch Technology", presented at ECOS'96, Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems, Stockholm, Sweden, publ. P. Alvfors et al Eds., ISBN 91-7170-664-X, pp. 451-455. 1996
- Wall, G/ Gong, M.(2001); "On Exergy and Sustainable Development, Part I: Conditions and Concepts" Exergy An International Journal, Vol. 1, No. 3. pp. 128-145. 2001
- Wall, G/ Sciubba, E/ Naso, V.(1994); "Exergy use in the Italian society". ENERGY , Vol. 19, No. 12, pp. 1267-1274.
- Wall, G/ Gong, M.(2000); "On Exergetics, Economics and Desalination", Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE), EOLSS Publishers, Oxford, ISBN 09534 9442 X. 2000
- Wall, G/ Yantovskii, E/ Lindquist, L/ Tryggstad, J.(1994); "Exergonomics of an EOR (OCDOPUS) Project". ENERGY , Vol. 19, No. 12, pp. 1275-1278. 1994
- Wang Qiang/ Li Yanzhong/Chen Xi.(2004); "Exergy Analysis of liquefied natural gas cold energy recovering cycles". International Journal of Energy research, vol. 29, Issue 1, pp. 65-78. 2004
- Wang, F.J. / Chiou, J.S.(2004); "Integration of steam injection and inlet air cooling for a gas turbine generation system". Energy Conversion and Management, vol. 45, Issue 1, pp. 15-26. 2004
- Wang, J/ Brodianski, V.M.(1993); "Exergy in economy development" - Proceedings of ENSEC '93, pp. 161-168. North China Institute of Electric Power and Moscow Power Engineering Institute. 1993
- Wang, S.P. / Chen, Q.L. / Yin, Q.H. / Hua, B.(2005); "A phenomenological equation of exergy transfer and its application". Energy, vol. 30, Issue 1, pp. 85-95. 2005
- Wang, S.P. / Chen, Q.L. / Yin, Q.H. / Hua, B.(2003); "Exergy destruction due to mean flow and fluctuating motion in incompressible turbulent flows through a tube". Energy, vol. 28, Issue 8, 2003, pp. 809-823. 2003
- Wang, W. / Zmeureanu, R. / Rivard, H.(2005); "Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization". Building and Environment, vol. 40, Issue 11, pp. 1512-1525. 2005
- Wang, X / Hua, B.(2005); "Exergy analysis of domestic-scale solar water heaters. 13 Alternative energy supplies Solar energy". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005, 9, (6), pp. 638-645. 2005
- Wang, Y/ Feng, X. (2000); "Exergy analysis involving resources utilization and environmental influence". Computers and Chemical Engineering, vol. 24, pp. 1243 - 1246. 2000
- Watanabe, T/ Kanzawa, A.(1995); "Second law optimization of a latent heat storage system with PCMS having different melting points". Heat Recovery Systems and CHP, Volume 15, Number 7, October 1995, pp. 641-653. 1995
- Weston A. Hermann.(2005); "Quantifying global exergy resources" - ScienceDirect. Global Climate and Energy Project- Stanford University. 2005

- Woudstra, N.(1993); "Exergy and cogeneration". JN: Energie Technologie (Netherlands), vol. 3:6, pp. 26-32. Technische Univ. Delft (Netherlands). 1993
- Woudstra, Th.(1993); "Exergy analysis of Integrated Coal Gasification Combined Cycle (ICGCC) systems". JN: Energie Technologie (Netherlands), vol. 3:5, pp. 24-32. Technische Univ. Delft (Netherlands). 1993
- Wright, S. E/ Rosen, M.A.(2004); "Exergetic Efficiencies and the Exergy Content of Terrestrial Solar Radiation". Journal of Solar energy engineering, vol. 126, Issue 1, 2004, pp. 673-676. 2004
- Wright, S.E. / Rosen, M.A. / Scott, D.S. / Haddow, J.B.(2002); "The exergy flux of radiative heat transfer for the special case of blackbody radiation". Exergy, an International Journal, vol. 2, no. 1, pp. 24-733. 2002
- Wright, S.E. / Rosen, M.A. / Scott, D.S. / Haddow, J.B.(2002); "The exergy flux of radiative heat transfer with an arbitrary spectrum". Exergy, vol. 2, no. 2, pp. 69-77. 2002
- Wright, S.E.(2004); "Comparison of the theoretical performance potential of fuel cells and heat engines". Renewable Energy, vol. 29, Issue 2, pp. 179-195. 2004
- Wright, S.E./ Haddow, J.B.(2004); "Mechanical dissipation versus thermo-mechanical exergy destruction for plane shockwaves in an inviscid perfect gas". International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.2 pp. 163 - 178. 2004
- Wu, C.(1998); "Effect of heat transfer law on finite-time exergoeconomic performance of Carnot heat pump". el and Energy Abstracts, Volume 39, Number 3, May 1998, pp. 216-216. 1998
- Wu, C/ Chen, L/ Sun, F.(1996); "Effect of the heat transfer law on the finite-time, exergoeconomic performance of heat engines". Energy, vol. 21, Issue 12, 1996, pp. 1127-1134. 1996
- Wu,S/ Lin, G/ Chen, J.(2005); "Optimum thermoeconomic and thermodynamic performance characteristics of an irreversible three-heat-source heat pump". Renewable Energy, vol. 30, Issue 15, 2005, pp. 2257-2271. 2005
- X, F/ X, X.Z.(1997); "Combining pinch and exergy analysis for process modifications". Applied Thermal Engineering, Volume 17, Number 3, March 1997, pp. 249-261. 1997
- Xiangliang, P/Wei, D/Dao Yong, Z/ Fei, L.(2003); "Yongjie W. Sustainable agriculture in the semi-arid agro-pastoral interweaving belt of northern China". Outlook on Agriculture, Volume 32, Number 3, 1 September 2003, pp. 165-172. 2003
- Xiaowu, W. / Ben, H.(2003); "Exergy analysis of domestic-scale solar water heaters". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.9, Issue 6 , pp. 638-645. 2003
- Xu, F.-L/ Jorgensen, S.E/ Tao, S. (1999); "Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health". Ecological Modelling, Volume 116, Number 1, 1 March 1999, pp. 77-106. 1999
- Xu, F.(1997); "Exergy and structural exergy as ecological indicators for the development state of the Lake Chaohu ecosystem". Ecological Modelling, Volume 99, Number 1, 16 June 1997, pp. 41-49. 1997
- Xu, F.-L. / Dawson, R.W. / Tao, S. / Li, B.-G. / Cao, J.(2002); "System-level responses of lake ecosystems to chemical stresses using exergy and structural exergy as ecological indicators". vol. 83, Issues 14-15, pp. 2087-2094. Chemosphere, vol. 46, Issue 2, pp. 173-185. 2002
- Xu, F.L. / Lam, K.C. / Zhao, Z.Y. / Zhan, W. / Chen, Y.D. / Tao, S.(2004); "Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China". Ecological Modelling, vol. 173, Issue 4, pp. 355-370. 2004
- Yalçın, A. G/ Çambah, Ü/ Kavsaoğlu, M. Ş.(2002); "Exergy balance of a general system with variation of environmental conditions and some applications". Energy, vol. 27, issue 7, 2002, pp. 625- 646. 2002
- Yamada, H./ Nakata, N.(1993); "Multi purpose public utility complex with earth friendly features". JN: Ebara Jiho(Japan), vol. 159, pp. 29 - 36. Ebara Corporation, Tokyo. 1993
- Yan, Z/ Chen, L.(1996); "Optimization of the rate of exergy output for an endoreversible Carnot refrigerator". Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 29, Number 12, 1996, pp. 3017-3021. 1996
- Yang, D./ Wang, J.C.Y. / Lin, S. / Zhang, D.(1993); "A case study of exergy - anergy costing". Proceedings of ENSEC '93, pp. 533-540. Concordia University and East China University of Chemical Technology. 1993
- Yantovski, E. (2000); "Exergonomics in education". Energy, vol. 25, Issue 10, 2000, pp. 1021-1031. 2000
- Yantovski, E.I. (1996); "Stack downward - Zero Emission Fuel-Fired Power Plants Concept" . Energy Conversion and Management, Volume 37, Number 6, June 1996, pp. 867-877. 1996
- Yantovskii, E/ Wall, G./ Lindquist, L./ Tryggstad, J (1993); "Exergonomics of the Ocdopus Project/Energy Converters". Mgmt, Vol. 34, No. 9-11, pp. 1213-1218//Exergy, Carbon Dioxid Capture Processes// 1993
- Yantovskii, E.I./ Wall, G./Lindquist, L./ Tryggstad, J (1994); "Exergonomics of an EOR (OCDOPUS) project". JN: Energy (Oxford), vol. 19:12, pp.1275-78. Russian Academy of Sciences and Karlstad University.(Sweden). 1994
- YERKO HERBERT SERRATE HURTADO (1993); "SIMULACAO E ANALISE EXERGETICA DE CICLOS COMBINADOS COM TURBINAS A GAS/TURBINAS A VAPOR" - Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - ENGENHARIA MECÂNICA. 01/03/1993
- Yildirim, E.D/ Gokcen, G (2004); "Exergy analysis and performance evaluation of Kizildere Geothermal Power Plant, Turkey". JN: International Journal of Exergy 2004 - Vol. 1, No.3 pp. 316 - 333. 2004

- Yilmaz, M. / Sara, O.N. / Karsli, S (2001); "Performance evaluation criteria for heat exchangers based on second law analysis". *Exergy, An International Journal*, vol. 1, Issue 4, 2001, pp. 278-294. 2001
- Yilmaz, T (2004); "Optimization of cogeneration systems under alternative performance criteria". *Energy Conversion and Management*, vol. 45, Issue 6, pp. 939-945. 2004
- Ying, Y/ Hu, E.J. (1999); "Thermodynamic advantages of using solar energy in the regenerative Rankine power plant". *Applied Thermal Engineering*, Volume 19, Number 11, 1999, pp. 1173-1180. 1999
- Yoshida, S/ Yamamoto, H (2005); "Exergy analysis of a diesel engine cycle and its performance improvement". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.3 pp. 284 - 298. 2005
- Yumrutas, R./Kunduz, M/Kanoglu, M (2002); "Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems". *Exergy*, vol. 2, no. 4, pp. 226-272. 2002
- Zaleta, A/ Ranz, L/ Valero, A (1997); "Toward a Unified Measure of Renewable Resources Availability: The Exergy Method Applied to the water of a River (G. Manfrida, Ed.)" *FLOWERS'97, Clean Energy for the Future*, SGE Editorially, Padova, pp. 315-22. 1997
- Zedtwitz P.v/ Steinfeld A (2003); "The solar thermal gasification of coal — energy conversion efficiency and CO₂ mitigation potential". *Energy*, vol. 28, no. 5, 2003, pp. 441-456. 2003
- Zemp R.J./de Faria S.H.B./Maia M.d.L.O (1997); "Driving Force Distribution and Exergy Loss in the Thermodynamic Analysis of Distillation Columns". *Computers and Chemical Engineering*, Volume 21, Supplement, 1997, pp. 523-528. 1997
- Zhang J/ Jorgensen S.E/ Beklioglu M/ Ince O (2003); "Hysteresis in vegetation shift-Lake Mogan prognoses". *Ecological Modelling*, vol. 164, Issue 2, 2003, pp. 227-238. 2003
- Zhang, C. / Wang, Y. / Zheng, C. / Lou, X (2004); "Exergy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of thermoeconomics" - *ScienceDirect*, Huazhong University of Science and Technology and ALSTOM. 2004
- Zhang, G.Q/ Wang, L/ Liu, L/ Wang, Z (2004); "Thermoeconomic optimization of small size central air conditioner". *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, Issue 4, pp. 471-485. 2004
- Zhang, G/ Hua, B/ Chen, Q (2000); "Exergoeconomic methodology for analysis and optimization of process systems". *Computers and Chemical Engineering*, Volume 24, Number 2, 15 July 2000, pp. 613-618. 2000
- Zhang, J/ Jorgensen, S.E/ Tan, C.O/ Beklioglu, M (2003); "A structurally dynamic modelling-Lake Mogan, Turkey as a case study". *Ecological Modelling*, vol. 164, Issue 2, 2003, pp. 103-120. 2003
- Zhang, N./ Lior, N.(2005); "A novel near-zero CO₂ emission thermal cycle with LNG cryogenic exergy utilization". Copyright © 2005 Elsevier Ltd All rights reserved- *ScienceDirect*. Chinese Academy of Sciences and University of Pennsylvania. 2005
- Zheng, D/ Ji, P/ Qi, J (2001); "Maximum excess Gibbs function of working pairs and absorption cycle performance". *International Journal of Refrigeration*, Volume 24, Number 8, December 2001, pp. 834-840. 2001
- Zheng, J. / Sun, F. / Chen, L. / Wu, C (2001); "Exergy analysis for a Braysson cycle". *Exergy An International Journal*, Vol. 1, No. 1. pp. 41-45. 2001
- Zhu, M. / Wang, B. / Xiao, Y (1993); "A multi-criterial decision making procedure for the analysis of an energy system" - *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 399-407. Tsinghua University, Beijing (China). 1993
- Zhu, X./Chen, L./Sun, F./Wu, C (2005); "The ecological optimization of a generalized irreversible Carnot heat pump for a generalized heat transfer law". *Journal of the Energy Institute*, Vol.78, No.1, 2005, pp. 5-10. 2005
- Zhu, X/ Chen, L/ Sun, F/ Wu, C (2005); "Effect of heat transfer law on the ecological optimisation of a generalised irreversible Carnot heat pump". *International Journal of Exergy* 2005 - Vol. 2, No.4 pp. 423 - 436. 2005
- Ziebig, A (1993); "Comparison of the exergetic method and replacement method in partitioning the production costs of cogeneration processes" - *ENSEC '93*, pp. 409-418 *Technical University of Silesia, Gliwice (Poland)*. 1993
- Ziegler, F./ Feurecker, G./ Alefeld, G (1993); "Evaluation of complex energy conversion systems by advanced thermodynamic analysis". *Proceedings of ENSEC '93*, pp. 449-456. *Technische Universität Munchen*. 1993
- Zubair, S.M (1998); "Thermoeconomic considerations in the design and rating of two-phase heat exchangers". *Energy*, vol. 23, Issue 12, 1998, pp. 1057-1063. 1998
- Zubair, S.M. / El-Nakla, M. / Shuja, S.Z (2002); "Thermoeconomic design and analysis of a sensible-heat thermal energy storage system with Joulean heating of the storage element". *Exergy, An International Journal*, vol. 2, Issue 4, 2002, pp. 237-247. 2002

APÊNDICE B - FOLHAS DE CÁLCULO- ANÁLISE EXERGÉTICA E TERMOECONÔMICA, SOFTWARE ENGINEERING SOLVER ENGINEERING (EES)

B1 - Análise exergética

Diagrama de fluxo do sistema LM-6000 foi feito com o software EES, Engineering Equation Solver. As variáveis conhecidas e de estado de referência são usados pelo software para o calculo dos valores exergéticos de cada fluxo participante no processo e os valores das outras propriedades termodinâmicas.

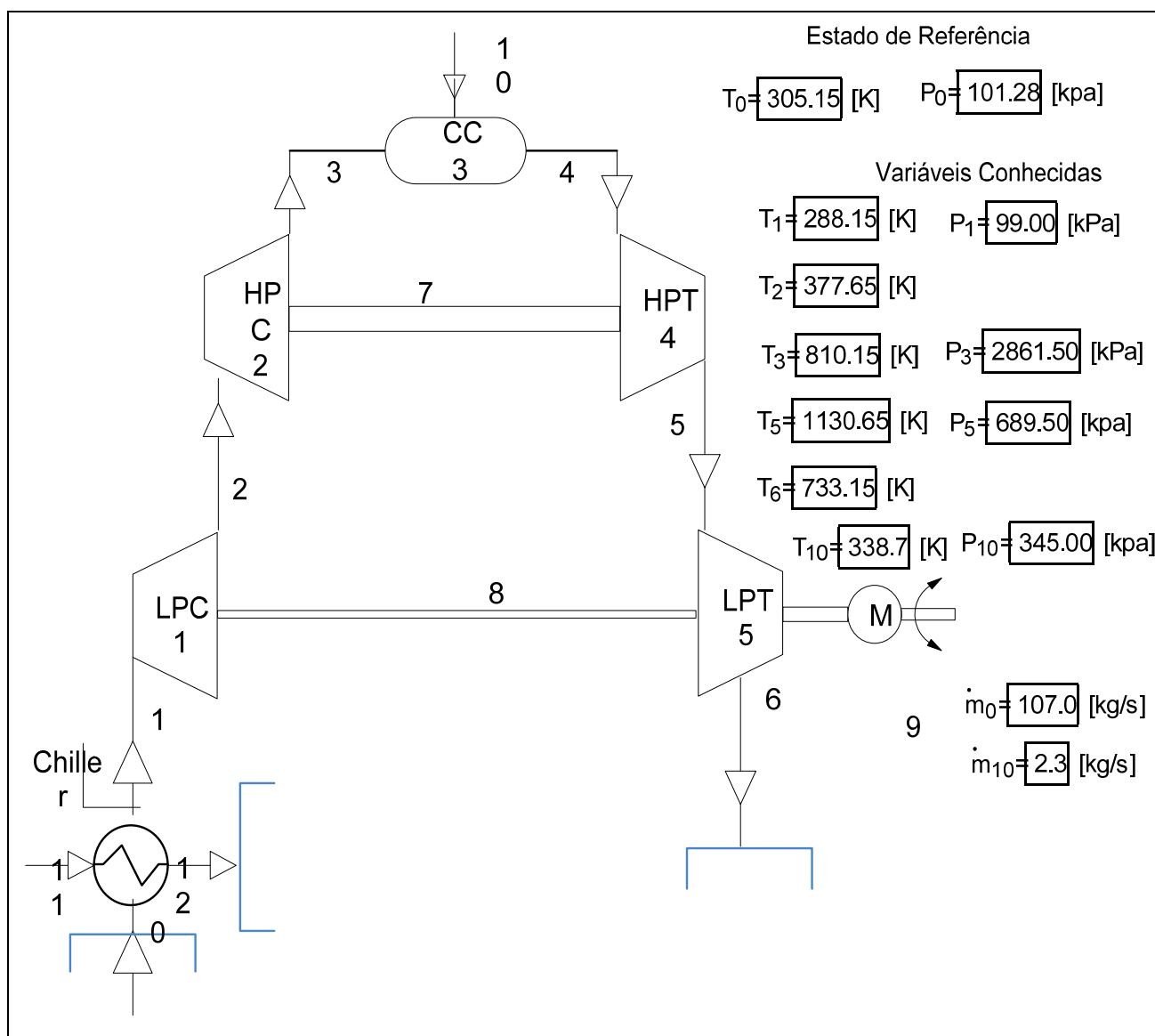


Figura B.1 - Diagrama de fluxo da unidade LM-6000 –software EES

A seguinte tabela B1 mostra o programa desenvolvido no software EES para o cálculo dos valores exergéticos e as outras propriedades termodinâmicas dos fluxos.

Tabela B.1 – Análise exergetica em EES

"Usina Rio Madeira - Porto Velho, Rondonia - Brasil"

"propriedades do meio ambiente"

{T[0]=converttemp(C,K,32)
P[0]=101.28[kPa]}
H[0]=m_dot[0]*ENTHALPY(Air,T=T[0])*convert(kJ/s,MW)

"sistema Chiller"

"temperaturas"
T_0=converttemp(C,K,32)
{T[1]=converttemp(C,K,15)}
T[11]=converttemp(F,K,42)
T[12]=converttemp(F,K,60)

"Pressao"

P_0=101.28[kPa]
P[11]=60*convert(psig,kPa)
{P[1]=99[kPa]}
P[12]=60*convert(psig,kPa)

"Fluxo de massa"

rho_water=DENSITY(Water,T=T[11],P=P[11])
v=3600*convert(gpm,m^3/s)
m_dot[1]=m_dot[0]
m_dot[11]=v*rho_water
m_dot[12]=m_dot[11]
R_gi_air=R#/MOLARMASS(Air)
Cp_air=CP(Air,T=T_0)

"Trocador de calor"

H[11]=m_dot[11]*ENTHALPY(Water,T=T[11],P=P[11])*convert(kJ/s,MW)
H[12]=m_dot[12]*ENTHALPY(Water,T=T[12],P=P[12])*convert(kJ/s,MW)

"exergia"

Bph_dot[11]=(m_dot[11]*ENTHALPY(Water,T=T[11],P=P[11])-ENTHALPY(Water,T=T_0,P=P_0)-
T_0*(ENTROPY(Water,T=T[11],P=P[11])-ENTROPY(Water,T=T_0,P=P_0)))*convert(kJ/s,MW)
Bch_dot[11]=m_dot[11]*45/MOLARMASS(Water)*convert(kJ/s,MW) {valor da exergia química padrão da
água do livro de Bejan}
Bph_dot[12]=(m_dot[12]*ENTHALPY(Water,T=T[12],P=P[12])-ENTHALPY(Water,T=T_0,P=P_0)-
T_0*(ENTROPY(Water,T=T[12],P=P[12])-ENTROPY(Water,T=T_0,P=P_0)))*convert(kJ/s,MW)
Bch_dot[12]=Bch_dot[11] {valor da exergia química padrão da água do livro de Bejan}

"Exergias totais"

B_dot[11]=Bch_dot[11]+Bph_dot[11]
B_dot[12]=Bch_dot[12]+Bph_dot[12]
"Balanço de energia"
H[11]+Q_trocador-W_trocador=H[12]
W_trocador=2[MW]
Cp_air2=CP(Air,T=T[2])

"LPC, Low Pressure Compressor, "

{T[2]=converttemp(C,K,104.5)}
P[2]=P[1]*2.4 [kPa]
m_dot[2]=m_dot[1]
H[1]=m_dot[1]*ENTHALPY(Air,T=T[1])*convert(kJ/s,MW)
H[2]=m_dot[2]*ENTHALPY(Air,T=T[2])*convert(kJ/s,MW)

{hh_2-(H[1]/m_dot[1])*convert(MJ/kg,kJ/kg)=CP(Air,T=T[1])*(T[2]-T[1])
H[2]=hh_2*m_dot[1]*convert(kJ/s,MW)} {calculo extra do h2 }

"balanço de energia: H1+W=H2"
H[1]+W_dot_LPC=H[2]

"exergia"

Bph_dot[0]=0
Bch_dot[0]=0
Bph_dot[1]=-1*m_dot[1]*(CP(Air,T=T[1])*(T[1]-T[0]-
T[0]*LN(T[1]/T[0])+R_gi_air*T[0]*LN(P[1]/P[0])))*convert(kJ/s,MW)
Bch_dot[1]=0 {modelo I, ver Bejan l.a. 1996}
Bph_dot[2]=m_dot[2]*(CP(Air,T=T[2])*(T[2]-T[0]-
T[0]*LN(T[2]/T[0])+R_gi_air*T[0]*LN(P[2]/P[0])))*convert(kJ/s,MW)
Bch_dot[2]=0 {modelo I, em equilibrio químico com o meio externo, ver Bejan at.al. 1996}

"Exergias totais"

B_dot[0]=Bph_dot[0]+Bch_dot[0]
B_dot[1]=Bph_dot[1]+Bch_dot[1]
B_dot[2]=Bph_dot[2]+Bch_dot[2]
cp3=CP(Air,T=T[3])

"HPC, High Pressure Compressor"

{T[3]=converttemp(C,K,537)
P[3]=2861.5[kPa]}
H[3]=m_dot[3]*ENTHALPY(Air,T=T[3])*convert(kJ/s,MW) {hh_3-
(H[2]/m_dot[1])*convert(MJ/kg,kJ/kg)=CP(Air,T=T[2])*(T[3]-T[2])
H[3]=hh_3*m_dot[1]*convert(kJ/s,MW)} {outra forma para calcular H3}
m_dot[3]=m_dot[2]

"balanço de energia: H2+W=H3"
H[2]+W_dot_HPC=H[3]

"exergia"

Bph_dot[3]=m_dot[3]*(CP(Air,T=T[2])*(T[3]-T[0]-
T[0]*LN(T[3]/T[0])+R_gi_air*T[0]*LN(P[3]/P[0])))*convert(kJ/s,MW)
Bch_dot[3]=0 {modelo I, em equilibrio químico com o meio externo, ver Bejan l.a 1996}
B_dot[3]=Bph_dot[3]+Bch_dot[3]

"câmara de combustão"

{T[10]=converttemp(F,K,150)
P[10]=345[kpa]
m_dot[10]=2.27[kg/s]}
HHV=19597*convert(BTU/lbm,kJ/kg)
LHV=18400*convert(BTU/lbm,kJ/kg)
H[10]=m_dot[10]*HHV*convert(kJ/s,MW)
C=0.863; H=0.128; S=0.009; O=0

"exergia fuel- óleo diesel"

Bph_dot[10]=0 "a exergia física do combustível é negligenciada"
Bch_dot[10]=m_dot[10]*LHV*(1.0401+0.1728*(H/C)+0.0432*(O/C)+0.2169*(S/C)*
(1-(2.0628*(H/C))))*convert(kJ/s,MW)
B_dot[10]=bph_dot[10]+Bch_dot[10]

"Saída da Câmara"

m_dot[4]=m_dot[3]+m_dot[10] {gases de combustão}
{T[5]=converttemp(C,K,857.5)
P[5]=689.5[kpa]}

"o cp a temperatura quatro vamos a assumir que é igual a cp à temperatura cinco"

$$\begin{aligned} \text{Cp_gases_5} &= (75.625/100)*\text{CP}(\text{N2}, T=T[5]) + (14.3451/100)*\text{CP}(\text{O2}, T=T[5]) + (4.9669/100)* \\ &\text{CP}(\text{Steam}, T=T[5], P=P[5]) + (4.1161/100)*\text{CP}(\text{CO2}, T=T[5]) + (0.9047/100)* \\ &\text{CP}(\text{Air}, T=T[5]) + (0.0397/100)*\text{CP}(\text{NO2}, T=T[5]) + (0.0018/100)*\text{CP}(\text{SO2}, T=T[5]) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(0.0006/100)*\text{CP}(\text{CO}, T=T[5]) \\ \text{M_gases} &= (0.9047/100)*\text{MOLARMASS}(\text{Air}) + (75.625/100)*\text{MOLARMASS}(\text{N2}) + (14.3451/100)* \\ &\text{MOLARMASS}(\text{O2}) + (4.9669/100)*\text{MOLARMASS}(\text{Steam}) + (4.1161/100)*\text{MOLARMASS}(\text{CO2}) + \\ &(0.0397/100)*\text{MOLARMASS}(\text{NO2}) + (0.0018/100)*\text{MOLARMASS}(\text{SO2}) + \\ &(0.0006/100)*\text{MOLARMASS}(\text{CO}) \\ \text{Cp_gases_4} &= \text{Cp_gases_5} \end{aligned}$$

"balanço de energia"

$H[3] + H[10] = H[4]$ {desde que o componentes principal seja o nitrogeno, a saída se pode aproximar mediante

as propriedades do ar}

$$m_dot[10]*\text{HHV} + m_dot[3]*\text{CP}(\text{Air}, T=T[3])*T[3] = m_dot[4]*\text{Cp_gases_4}*T[4]$$

$$R_gi_gases = R\#/M_gases$$

$$R_gi_gases = \text{Cp_gases_5} - \text{Cv_gases}$$

$$\gamma_5 = \text{Cp_gases_5} / \text{Cv_gases}$$

$$P[4]/P[5] = (T[4]/T[5])^{\gamma_5/(\gamma_5-1)}$$

$$W_dot_net = 38[\text{MW}]$$

$$\eta_{termica} = 0.391$$

"exergia dos produtos"

$$\text{Bph_dot}[4] = m_dot[4]*(\text{Cp_gases_4}*(T[4]-T[0]-T[0]*(\text{LN}(T[4]/T[0])) + R_gi_gases* \\ T[0]*\text{LN}(P[4]/P[0]))) * \text{convert}(\text{kJ/s}, \text{MW})$$

$$\{\text{Bph_dot}[4] = 123.6\}$$

$$\{b4 = 125.1*(1.242*(1371.67-305.15-305.15*(\text{LN}(1371.67/305.15)))) + 0.2731* \\ 305.15*\text{LN}(1659.92/101.28)\}$$

"exergia quimica padrão dos compostos, Kotas(1985)"

$$\text{B_ch_N2} = 720; \text{B_ch_O2} = 3970; \text{B_ch_CO2} = 20140; \text{B_ch_CO} = 275430;$$

$$\text{B_ch_steam} = 11710; \text{B_ch_SO2} = 303500;$$

$$\text{B_ch_NO2} = 56220; \text{B_ch_ar} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{Bch_dot}[4] &= (m_dot[4]/M_gases)*(((75.625/100)*\text{B_ch_N2}) + ((14.3451/100)*\text{B_ch_O2}) + \\ &((4.9669/100)*\text{B_ch_steam}) + ((4.1161/100)*\text{B_ch_CO2}) + ((0.0397/100)*\text{B_ch_NO2}) + \\ &((0.0018/100)*\text{B_ch_SO2}) + ((0.0006/100)*\text{B_ch_CO}) + ((0.9047/100)*\text{B_ch_ar}) + (R\#*T_0)* \\ &(((75.625/100)*\text{LN}(75.625/100)) + ((14.3451/100)*\text{LN}(14.3451/100)) + ((4.9669/100)* \\ &\text{LN}(4.9669/100)) + ((4.1161/100)*\text{LN}(4.1161/100)) + ((0.0397/100)*\text{LN}(0.0397/100)) + \\ &((0.0018/100)*\text{LN}(0.0018/100)) + ((0.0006/100)*\text{LN}(0.0006/100)) + ((0.9047/100)* \\ &\text{LN}(0.9047/100)))) * \text{convert}(\text{kJ/s}, \text{MW}) \end{aligned}$$

$$\text{B_dot}[4] = \text{Bph_dot}[4] + \text{Bch_dot}[4]$$

"HPT, high pressure turbine"

$$m_dot[5] = m_dot[4]$$

$$(H[4]/m_dot[4])* \text{convert}(\text{MJ/kg}, \text{kJ/kg}) - \text{hh}_5 = \text{Cp_gases_5}*(T[4]-T[5])$$

$$H[5] = \text{hh}_5*m_dot[5]* \text{convert}(\text{kJ/s}, \text{MW})$$

"exergia da mistura de gas"

$$\text{Bph_dot}[5] = (m_dot[5]*\text{Cp_gases_5}*(T[5]-T_0 - T_0*\text{LN}(T[5]/T_0)) + R_gi_gases* \\ T_0*\text{LN}(P[5]/P_0)) * \text{convert}(\text{kJ/s}, \text{MW})$$

$$\begin{aligned} \text{Bch_dot}[5] &= (m_dot[5]/M_gases)*(((75.625/100)*\text{B_ch_N2}) + ((14.3451/100)* \\ &\text{B_ch_O2}) + ((4.9669/100)*\text{B_ch_steam}) + ((4.1161/100)*\text{B_ch_CO2}) + ((0.0397/100)* \\ &\text{B_ch_NO2}) + ((0.0018/100)*\text{B_ch_SO2}) + ((0.0006/100)*\text{B_ch_CO}) + ((0.9047/100)*\text{B_ch_ar}) + \\ &(R\#*T_0)*(((75.625/100)*\text{LN}(75.625/100)) + ((14.3451/100)*\text{LN}(14.3451/100)) + \\ &((4.9669/100)*\text{LN}(4.9669/100)) + ((4.1161/100)*\text{LN}(4.1161/100)) + ((0.0397/100)*\text{LN}(0.0397/100)) + \\ &((0.0018/100)*\text{LN}(0.0018/100)) + ((0.0006/100)*\text{LN}(0.0006/100)) + ((0.9047/100)* \end{aligned}$$

```

LN(0.9047/100))) * convert(kJ/s, MW)
B_dot[5] = Bph_dot[5] + Bch_dot[5]
{Bph_dot[5] = 86.16}

"balanço de energia: H4=H5+W7"
H[4] = W_dot_HPT + H[5] {energia que alimenta o HPC}
"LPT, Low Pressure Turbine"
{T[6] = converttemp(C, K, 460)}
m_dot[6] = m_dot[5]
(H[5]/m_dot[5]) * convert(MJ/kg, kJ/kg) - hh_6 = Cp_gases_6 * (T[5] - T[6])
H[6] = hh_6 * m_dot[6] * convert(kJ/s, MW)
Cp_gases_6 = (75.625/100) * CP(N2, T=T[6]) + (14.3451/100) * CP(O2, T=T[6]) + (4.9669/100) *
CP(Steam, T=T[6], P=P[6]) + (4.1161/100) * CP(CO2, T=T[6]) + (0.9047/100) * CP(Air, T=T[6]) +
(0.0397/100) * CP(NO2, T=T[6]) + (0.0016/100) * CP(SO2, T=T[6]) + (0.0006/100) * CP(CO, T=T[6])
R_gi_gases6 = R#/M_gases
R_gi_gases6 = Cp_gases_6 - Cv_gases_6
gamma_6 = Cp_gases_6 / Cv_gases_6
P[6]/P[5] = (T[6]/T[5])^(4.215) {P[6]/P[5] = (T[6]/T[5])^(gamma_6/(gamma_6-1))}

"balanço de energia: H5=W+H6+Wnet"
H[5] = H[6] + W_dot_LPT {energia que alimenta o LPC e gera energia elétrica}

"exergia dos gases de exaustão"
Bph_dot[6] = (m_dot[6] * Cp_gases_6 * (T[6] - T_0 - T_0 * LN(T[6]/T_0) + R_gi_gases * T_0 * LN(P[6]/P_0))) *
convert(kJ/s, MW)
Bch_dot[6] = (m_dot[6]/M_gases) * (((75.625/100) * B_ch_N2) + ((14.3451/100) * B_ch_O2) +
((4.9669/100) * B_ch_steam) + ((4.1161/100) * B_ch_CO2) + ((0.0397/100) * B_ch_NO2) + ((0.0016/100) *
B_ch_SO2) + ((0.0006/100) * B_ch_CO) + ((0.9047/100) * B_ch_ar)) + (R# * T_0) * (((75.625/100) *
LN(75.625/100)) + ((14.3451/100) * LN(14.3451/100)) + ((4.9669/100) *
LN(4.9669/100)) + ((4.1161/100) * LN(4.1161/100)) + ((0.0397/100) * LN(0.0397/100)) + ((0.0016/100) *
LN(0.0016/100)) + ((0.0006/100) * LN(0.0006/100)) + ((0.9047/100) * LN(0.9047/100))) * convert(kJ/s, MW)
B_dot[6] = Bph_dot[6] + Bch_dot[6]

"exergias dos outros subsistemas"
B_dot[7] = W_dot_HPT
B_dot[8] = W_dot_LPT - W_dot_net
B_dot[9] = W_dot_net
eta_Wtermica = W_dot_net / (W_dot_LPT + W_dot_HPT)

"Fluxo de massas para esses subsistemas"
m_dot[7] = 0
m_dot[8] = 0
m_dot[9] = 0

"matriz de incidência"
"matrix incidente 5x10"
duplicate i=3,7; A[1,i]=0; end
duplicate j=9,10; A[1,j]=0; end
A[1,1]=1; A[1,2]=-1; A[1,8]=1
duplicate i=4,6; A[2,i]=0; end
duplicate j=8,10; A[2,j]=0; end
A[2,2]=1; A[2,3]=-1; A[2,7]=1; A[2,1]=0
duplicate i=1,2; A[3,i]=0; end
duplicate j=5,9; A[3,j]=0; end
A[3,3]=1; A[3,4]=-1; A[3,10]=1
duplicate i=1,3; A[4,i]=0; end
duplicate j=8,10; A[4,j]=0; end
A[4,4]=1;
A[4,5]=-1; A[4,6]=0; A[4,7]=-1

```

```
duplicate i=1,4; A[5,i]=0; end
A[5,5]=1; A[5,6]=-1; A[5,7]=0; A[5,8]=-1; A[5,9]=-1; A[5,10]=0
```

"Obtenção do vetor destruição de exergia D, este vetor representa a exergia destruída dos componentes"

```
duplicate i=1,5
D_dot[i]=sum(A[i,k]*B_dot[k], k=1,10)
end
```

"comprovante de massa, comprova que AXM=0, para os componentes"

```
duplicate i=1,5
AxM[i]=sum(A[i,k]*m_dot[k], k=1,10)
end
```

"comprovante de energia, comprova que AXE=0, para os componentes"

```
H[7]=W_dot_HPT
H[8]= W_dot_LPT-W_dot_net
H[9]=W_dot_net
duplicate i=1,5
AxE[i]=sum(A[i,k]*H[k], k=1,10)
end
```

"matriz combustível"

```
duplicate i=1,7; A_F[1,i]=0; end
duplicate j=9,10; A_F[1,j]=0; end
A_F[1,8]=1
duplicate i=1,6; A_F[2,i]=0; end
duplicate j=8,10; A_F[2,j]=0; end
A_F[2,7]=1
duplicate i=1,2; A_F[3,i]=0; end
duplicate j=4,9; A_F[3,j]=0; end
A_F[3,3]=1; A_F[3,10]=1
duplicate i=1,3; A_F[4,i]=0; end
duplicate j=6,10; A_F[4,j]=0; end
A_F[4,4]=1; A_F[4,5]=-1
duplicate i=1,4; A_F[5,i]=0; end
duplicate j=6,10; A_F[5,j]=0; end
A_F[5,5]=1
```

"Obtenção do vetor de exergia F dos componentes"

```
duplicate i=1,5
F_dot[i]=sum(A_F[i,k]*B_dot[k], k=1,10)
End
```

"matrix incidente 5x10"

```
duplicate i=3,10; A_P[1,i]=0; end
A_P[1,1]=-1; A_P[1,2]=1
duplicate i=4,10; A_P[2,i]=0; end
A_P[2,2]=-1; A_P[2,3]=1; A_P[2,1]=0
duplicate i=1,3; A_P[3,i]=0; end
duplicate j=5,10; A_P[3,j]=0; end
A_P[3,4]=1
duplicate i=1,6; A_P[4,i]=0; end
duplicate j=8,10; A_P[4,j]=0; end
A_P[4,7]=1
duplicate i=1,7; A_P[5,i]=0; end
A_P[5,8]=1; A_P[5,9]=1; A_P[5,10]=0
```

"Obtenção do vetor de exergia P dos componentes"

```
duplicate i=1,5
```



```
P_dot[i]=sum(A_P[i,k]*B_dot[k], k=1,10)
end
```

"Obtenção do vetor R dos componentes"

```
duplicate i=1,4; R_dot[i]=0; end
R_dot[5]=B_dot[6]
```

"Obtenção do vetor I dos componentes, irreversibilidades do processo"

```
duplicate i=1,5
I_dot[i]=R_dot[i]+D_dot[i]
end
```

"eficiências exergetica dos subsistemas - método valero"

```
Eta_valero[1]=P_dot[1]/F_dot[1]
Eta_valero[2]=P_dot[2]/F_dot[2]
Eta_valero[3]=P_dot[3]/F_dot[3]
Eta_valero[4]=P_dot[4]/F_dot[4]
Eta_valero[5]=P_dot[5]/F_dot[5]
Eta_valero[6]=B_dot[9]/B_dot[10] "eficiência exergetica total da da planta de geração"
```

B2 - Análise exergoeconômica – método Exergetic Cost Theory (ECT)

Folhas de cálculo da análise exergoeconômica baseado no método Exergetic Cost Theory, mediante o software EES, Engineering Equation Solver, versão comercial

Tabela B. 2 - Análise exergoeconômica baseado no método Exergetic Cost Theory

"Preposições para criar a matriz de coeficientes"

```
x_2=B_dot[9]/B_dot[8]
x_3=B_dot[4]/B_dot[5]
```

"Matriz de coeficientes"

```
duplicate i=2,10; A[6,i]=0; end
A[6,1]=1
duplicate i=1,9; A[7,i]=0; end
A[7,10]=1
duplicate i=1,7; A[8,i]=0; end
A[8,10]=0
A[8,8]=-x_2; A[8,9]=1
duplicate i=1,3; A[9,i]=0; end
duplicate j=6,10; A[9,j]=0; end
A[9,4]=1; A[9,5]=-x_3
duplicate i=1,5; A[10,i]=0; end
duplicate j=7,10; A[10,j]=0; end
A[10,6]=1
```

"vetor da matriz de coeficiente"

```
Y|star[1]=0; Y|star[2]=0; Y|star[3]=0; Y|star[4]=0; Y|star[5]=0; Y|star[6]=B_dot[1]; Y|star[7]=B_dot[10];
Y|star[8]=0; Y|star[9]=0; Y|star[10]=0
```

"Custo exergetico unitário"

```
kappa|star[10]=1; kappa|star[6]=0; kappa|star[1]=1 {preposições de FP, valor nulo para perdas de exergia, valor unitário para fluxos de entrada ao sistema}
kappa|star[4]=kappa|star[5]
kappa|star[8]=kappa|star[9]
B_dot[8]*kappa|star[8]=(B_dot[2]*kappa|star[2])-(B_dot[1]*kappa|star[1])
```

```

B_dot[7]*kappa|star[7]=(B_dot[3]*kappa|star[3])-(B_dot[2]*kappa|star[2])
B_dot[4]*kappa|star[4]=(B_dot[10]*kappa|star[10])+(B_dot[3]*kappa|star[3])
(B_dot[4]*kappa|star[4])-(B_dot[5]*kappa|star[5])=B_dot[7]*kappa|star[7]
(B_dot[5]*kappa|star[5])-(B_dot[6]*kappa|star[6])=(B_dot[8]*kappa|star[8])+(B_dot[9]*kappa|star[9])

```

"Custo exergetico "

{quantidade de exerxia por unidade de tempo requerida para produzir esse fluxo}

```

kappa|star[1]=B|star[1]/B_dot[1]
kappa|star[2]=B|star[2]/B_dot[2]
kappa|star[3]=B|star[3]/B_dot[3]
kappa|star[4]=B|star[4]/B_dot[4]
kappa|star[5]=B|star[5]/B_dot[5]
kappa|star[6]=B|star[6]/B_dot[6]
kappa|star[7]=B|star[7]/B_dot[7]
kappa|star[8]=B|star[8]/B_dot[8]
kappa|star[9]=B|star[9]/B_dot[9]
kappa|star[10]=B|star[10]/B_dot[10]

```

"Custo exergetico fuel de cada subsistema "

```

duplicate i=1,5
F|star[i]=sum(A_F[i,k]*B|star[k], k=1,10)
end

```

"Custo exergetico produtode cada subsistema "

```

duplicate i=1,5
P|star[i]=sum(A_P[i,k]*B|star[k], k=1,10)
end

```

"custo termoeconômico"

{quando o vetor de amortização é zero então $Z=0/-cw*w$ e $A*I+Z=0$, cálculo feito em matlab}
gamma[1]=0; gamma[2]=0.964; gamma[3]=3.415; gamma[4]=6.47; gamma[5]=4.019; gamma[6]=0;
gamma[7]=2.451; gamma[8]=0.964; gamma[9]=3.055; gamma[10]=3.055;

"Custo termoeconômico fuel de cada componente"

```

duplicate i=1,5
Gamma_F[i]=sum(A_F[i,k]*gamma[k], k=1,10)
end

```

"Custo termoeconômico produto de cada componente"

```

duplicate i=1,5
Gamma_P[i]=sum(A_P[i,k]*gamma[k], k=1,10)
end

```

"custo termoeconômico unitário"

```

c|star[1]=0; c|star[6]=0
duplicate i=2,5
Gamma[i]=c|star[i]*B|star[i]*convert(MJ/s,GJ/s)
end
duplicate j=7,10
Gamma[j]=c|star[j]*B|star[j]*convert(MJ/s,GJ/s)
end

```

"custo exergoeconômico unitário"

```

c[1]=0; c[6]=0
duplicate i=2,5
Gamma[i]=c[i]*B_dot[i]*convert(MJ/s,GJ/s)
end
duplicate j=7,10
Gamma[j]=c[j]*B_dot[j]*convert(MJ/s,GJ/s)

```

```

end

"custo exergoeconômico unitário fuel de cada componente"
duplicate i=1,5
Gamma_F[i]=c_F[i]*F_dot[i]*convert(MJ/s,GJ/s)
end

"custo exergoeconômico unitário produto de cada componente"
duplicate i=1,5
Gamma_P[i]=c_P[i]*P_dot[i]*convert(MJ/s,GJ/s) end

```

B3 - Análise exergoeconômica – Método Exergoeconômico (ME)

Folhas de cálculo da análise exergoeconômica baseado no método Exergoeconômico (ME), mediante o software EES, Engineering Equation Solver, versão comercial

Tabela B.3 - Análise exergoeconômica baseado no método exergoeconômico (EM)

```

"custo termoeconômico e custo exergoeconômico unitário"
c[8]=c[9]; c[4]=c[5]
duplicate i=1,10
gamma[i]=c[i]*B_dot[i]*convert(MJ/s,GJ/s)
end
gamma[10]=3.055[R$/s]; gamma[1]=0; gamma[6]=0
gamma[1]+gamma[8]=gamma[2]
gamma[2]+gamma[7]=gamma[3]
gamma[3]+gamma[10]=gamma[4]
gamma[4]=gamma[5]+gamma[7]
gamma[5]=gamma[6]+gamma[8]+gamma[9]

"custo termoeconômico fuel"
gamma_F[1]=gamma[8]
gamma_F[2]=gamma[7]
gamma_F[3]=gamma[3]+gamma[10]
gamma_F[4]=gamma[4]-gamma[5]
gamma_F[5]=gamma[5]

"custo termoeconômico produto"
gamma_P[1]=gamma[2]-gamma[1]
gamma_P[2]=gamma[3]-gamma[2]
gamma_P[3]=gamma[4]
gamma_P[4]=gamma[7]
gamma_P[5]=gamma[8]+gamma[9]

"custo exergoeconômico unitário fuel"
duplicate i=1,5
gamma_F[i]=c_F[i]*Fuel[i]*convert(MJ/s,GJ/s)
end

"custo exergoeconômico unitário produto"
duplicate i=1,5
gamma_P[i]=c_P[i]*Produto[i]*convert(MJ/s,GJ/s)
end

"custo termoeconômico da destruição de exergia"
{mostra como as ineficiências em cada componente custa ao sistema operador, quando so o custo de
combustível é considerado no sistema}

```

```
duplicate i=1,5  
gamma_D[i]=c_F[i]*D_dot[i]*convert(MJ/s,GJ/s)  
end
```

"custo exergético"

```
duplicate i=1,10  
B|star[i]=(gamma[i]/c[10])*convert(GJ/s, MJ/s)  
end
```

"custo exergético unitário"

```
duplicate i=1,10  
k|star[i]=c[i]/c[10]  
end
```

"relação de custos"

{contabiliza quantas unidades de combustível externo devem ser fornecidas ao sistema total para prover ao respectivo componente com uma unidade de exergia fuel. comparando esses valores com valores de desing permite detetar logo a malfunção de um componente e ajuda a identificar a fonte dessa malfunção}

```
duplicate i=1,5  
PHI[i]=c_F[i]/c[10]  
end
```

ANEXOS

Anexos 1 – VALORES DE EXERGIA QUÍMICA PADRÃO DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS

Appendix A 243

Table A.3 Standard enthalpy of devaluation and standard chemical exergy of inorganic substances. Reproduced from Ref [6.31], by permission. ($T^0 = 298,15\text{ K}$, $p^0 = 1,01325\text{ bar}$.)

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, $\Delta_f H^0 / [\text{kJ}/\text{kmol}]$	Standard chemical exergy, $e^0 / [\text{kJ}/\text{kmol}]$
1	2	3	4	5
Ag	s	107,870	46 260	73 730
Ag ₂ CO ₃	s	275,749	-20 180	121 940
AgCl	s	143,323	0	23 420
AgF	s	126,868	43 950	120 810
AgNO ₃	s	169,875	-76 960	46 580
Ag ₂ O	s	231,739	61 910	64 540
Ag ₂ O ₂	s	247,739	67 620	179 036
Ag ₂ S	s	247,804	785 280	714 060
Ag ₂ SO ₄	s, α	311,802	103 250	144 220
Al	s	26,981 5	927 800	887 890
Al ₄ C ₃	s	143,959	4 763 080	4 661 880
AlCl ₃	s	133,340 5	474 510	426 940
Al ₂ O ₃	s, corundum	101,961 2	184 690	204 270
Al ₂ O ₃ · H ₂ O	s	119,976 5	125 520	199 450
Al ₂ O ₃ · 3H ₂ O	s, gibbsite	156,007 2	12 160	209 210
Al ₂ S ₃	s	150,155	3 520 230	3 079 540
Al ₂ (SO ₄) ₃	s	342,148	592 060	502 100
Al ₂ SiO ₅	s, andalusite	162,046	28 030	45 940
Al ₂ SiO ₅	s, cyanite	162,046	25 940	49 200
Al ₂ SiO ₅	s, sillimanite	162,046	0	15 400
Ar	g	39,948	0	11 690
Au	s	196,967	0	18 920
AuCl	s	232,42	46 100	63 410
AuCl ₃	s	303,326	124 070	152 110
AuF ₃	s	253,962	253 490	437 260
Au ₂ O ₃	s	441,932	-80 810	121 550
Ba	s, II	137,34	741 640	760 050
BaCO ₃	s, II, witherite	197,35	-84 190	37 170
BaCl ₂	s	208,25	42 710	63 610
BaF ₂	s	175,34	-58 050	61 470
BaO	s	153,34	183 120	244 880
BaO ₂	s	169,34	111 530	175 770
Ba(OH) ₂	s	171,36	36 590	145 520
BaSO ₃	s	169,40	1 022 420	896 670
BaSO ₄	s	217,40	282 750	257 450
Bi	s, barite	233,40	0	13 470
BiO	s	208,980	288 680	271 370
Bi ₂ O ₃	s	224,979	81 240	92 440
Bi ₂ S ₃	s	465,958	0	52 260
C	s, graphite	12,011 15	2 567 720	2 165 480
C	s, diamond	12,011 15	393 780	410 820
CCl ₄	l	153,823	395 686	413 690
CO	g	28,010 5	584 270	583 180
CO ₂	g	44,009 5	283 150	275 430
CO ₂	g	44,009 5	0	20 140

CS ₂	l	76,139	1 932 410	1 673 670
Ca	s, II	40,08	813 930	717 400
Ca	s	64,10	1 538 670	1 471 210
CaC ₂	s, calcite	100,09	0	5 050
CaCO ₃	s, aragonite	100,09	-170	6 100
CaCl ₂	s	110,99	180 130	84 910
CaCl ₂ · H ₂ O	s	129,00	107 700	63 610
CaFe ₂ O ₄	s	215,77	104 600	56 480
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	s	271,85	324 680	213 620
Ca(NO ₃) ₂	s	164,089 8	-123 290	-11 970
Ca(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O	s	200,120 5	-241 790	-17 020
Ca(NO ₃) ₂ · H ₂ O	s	181,135 8	-289 290	-8 740
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	s	236,151 2	-349 290	-8 870
CaO	s	56,08	177 940	119 620
CaO · Al ₂ O ₃	s	158,04	388 690	326 780
2CaO · Al ₂ O ₃	s	214,12	105 760	339 540
4CaO · Al ₂ O ₃	s	326,28	—	485 420
12CaO · 7Al ₂ O ₃	s	1 386,68	3 362 640	2 211 220
Ca(OH) ₂	s	74,09	68 660	62 500
Ca ₃ (PO ₄) ₂	s, α	310,18	0	31 910
CaS	s	72,14	1 055 750	838 880
CaSO ₄	s, anhydrite	136,14	104 950	4 300
CaSO ₄ · H ₂ O	s, α	145,15	83 260	4 350
CaSO ₄ · 1/2H ₂ O	s, β	145,15	85 350	5 310
CaSO ₄ · 2H ₂ O	s, gypsum	172,17	0	2 760
CaSiO ₃	s	116,16	93 780	27 590
Ca ₂ SiO ₄	s	172,24	235 290	116 680
Ca ₃ SiO ₃	s	228,32	419 240	250 770
Cd	s, α	112,40	354 410	290 920
CdCl ₂	s	172,41	0	36 960
CdO	s	183,31	126 750	65 810
CdO	s	128,40	99 600	65 980
Cd(OH) ₂	s	146,41	38 480	61 370
CdS	s	144,46	934 550	749 050
CdSO ₄	s	208,46	152 200	81 290
CdSO ₄ · H ₂ O	s	226,48	88 520	63 070
Cl ₂	g	70,906	161 710	117 520
Cl	g	35,453	201 850	163 940
Cl	s, III	58,913 2	293 080	260 520
Co	s	188,810 75	1 312 790	1 222 110
Co ₂ C	s	118,942 6	-36 200	29 630
CoCO ₃	s	129,839	129 060	103 800
CoCl ₂	s	74,932 6	53 600	51 070
CoO	s	240,797 2	0	37 560
Co ₂ O ₄	s	92,947 9	-14 230	47 120
Co(OH) ₂	s	109,955 3	-83 310	27 240
CoS	s	90,997	933 090	765 580
CoSO ₃	s	214,058	2 590 640	2 108 250
CoSO ₄	s	154,995	148 900	103 220
CoSO ₄ · H ₂ O	s	51,996	564 590	539 260
Cr	s	180,010	2 393 410	2 348 290
Cr ₂ C ₃	s	219,995	2 583 480	2 494 900
Cr ₂ C	s	400,005	4 955 530	4 819 010
Cr ₂ C ₃	s	122,902	330 400	306 000
CrCl ₃	s	158,355	243 610	221 120

Table A.3—continued

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, Δ_f^0 [kJ/kmol]		Standard chemical energy, e^0 [kJ/kmol]
			4	5	
I	2	3	4	5	
CrO ₃	s	99.994	-14 850	42 910	71 840
Cr ₂ O ₃	s	151.990	0	36 510	52 960
Cs	s	132.905	352 480	408 530	-52 330
CsCl	s	168.358	0	62 850	-44 030
CsNO ₃	s	194.910	-141 980	22 310	18 015 34
Cs ₂ O	s	281.809	387 180	544 370	0
CsOH	s	149.912	66 520	164 090	98 850
Cs ₂ S	s	297.874	1 089 990	1 091 020	804 770
Cs ₂ SO ₄	s	361.872	8 590	123 020	161 010
Cu	s	63.54	201 590	134 400	30 290
CuCO ₃	s	123.55	0	33 210	122 700
CuCl	s	98.99	146 370	77 050	68 560
CuCl ₂	s	134.45	157 310	120 450	-89 390
CuFe ₂ O ₄	s	239.23	36 580	22 790	63 100
CuO	s	79.54	46 260	6 590	153 740
Cu ₂ O	s	143.08	236 380	123 500	64 240
Cu(OH) ₂	s	97.55	-5 230	19 770	679 430
Cu ₂ S	s, II	95.60	877 600	668 020	150 580
CuSO ₄	s	159.14	1 048 210	773 000	234 880
Cu ₂ SO ₄	s	159.60	155 800	80 940	371 520
D ₂	s	223.14	377 490	222 450	90 110
D ₂ O	g	4.029 46	249 370	266 220	21 390
D ₂ O	l	20.028 86	0	33 450	125 900
F ₂	g	20.028 86	-45 430	24 520	2 430
Fe	g	37.996 8	401 500	448 820	-6 880
Fe ₃ C	s, cementite	55.847	411 350	377 740	62 680
FeCO ₃	s	179.552	1 648 760	1 558 570	158 038
FeCl ₂	s, siderite	115.856	56 950	120 410	-15 290
FeCl ₃	s	126.753	231 840	193 130	348 820
FeCr ₂ O ₄	s	162.206	248 630	225 600	50 200
FeO	s	223.837	108 990	133 490	1 016 560
Fe ₂ O ₃	s, hematite	71.846	140 800	133 750	317 780
Fe ₂ O ₃	s, magnetite	159.692	0	20 370	590
Fe ₃ O ₄	s	231.539	116 170	126 960	1 542 550
Fe(OH) ₃	s	106.869	-50 450	46 530	12 700
FeS	s, α	87.911	1 040 810	879 000	60 200
FeS	s, β	87.911	1 046 540	890 180	38 350
FeS ₂	s, pyrite	119.975	1 682 480	1 447 410	75 620
FeSO ₄	s	151.909	212 740	170 240	76 520
FeSi	s	83.933	1 190 140	1 099 080	626 710
Fe ₂ SiO ₄	s	131.931	115 690	111 260	13 700
Fe ₂ SiO ₄	s	203.778	243 670	228 310	151 860
FeTiO ₃	s	151.75	86 870	99 530	29 400
H ₂	g	2.015 94	242 000	238 490	875 550
H ₂	l	1.007 97	360 860	322 410	305 400
HCl	g	36.461	109 490	85 950	67 480

HF	l	20.006 4	52 960	71 840
HNO ₃	l	63.012 9	-52 330	45 650
H ₂ O	l	18.015 34	-44 030	3 120
H ₂ O	g	18.015 34	0	11 710
H ₃ PO ₄	s	98.001 3	-75 360	98 850
H ₂ S	g	34.080	946 420	804 770
H ₂ SO ₄	l	98.077	154 720	161 010
He	g	4.002 6	0	30 290
Hg	l	200.59	68 560	122 700
HgCO ₃	s	260.60	-89 390	193 550
HgCl ₂	s	271.50	0	63 100
Hg ₂ Cl ₂	s	472.09	33 720	153 740
HgO	s, red	216.59	-22 210	64 240
HgS	s, red	232.65	734 940	679 430
HgSO ₄	s	296.65	88 500	150 580
Hg ₂ SO ₄	s	497.24	119 210	234 880
K	s	39.102	355 330	371 520
K ₂ CO ₃	s	138.213	-42 450	90 110
KCl	s	74.555	0	21 390
KClO ₄	s	138.553	2 430	125 900
KF	s	58.100	-6 880	59 760
KMnO ₄	s	158.038	62 680	148 840
KNO ₃	s	101.106 9	-137 380	-15 290
K ₂ O	s	94.203	348 820	425 540
KOH	s	56.109	50 200	101 320
K ₂ S	s	110.268	1 016 560	928 230
K ₂ SO ₃	s	158.266	317 780	384 910
K ₂ SO ₄	s, II	174.266	590	38 470
K ₂ SiO ₃	s	154.288	1 308 010	1 565 320
Kr	g	83.80	0	34 280
Li	g	6.939	328 200	396 170
Li ₂ CO ₃	s	73.887	-166 250	77 180
LiCl	s	42.392	0	70 160
LiNO ₃	s	68.934	-154 450	12 700
Li ₂ O	s	29.877	60 200	233 460
LiOH	s	23.946	-38 350	75 620
Li ₂ SO ₄	s	109.940	-54 380	76 520
Mg	s	24.312	719 920	626 710
MgCO ₃	s	84.321	0	13 700
MgCl ₂	s	95.218	239 370	151 860
MgFe ₂ O ₄	s	200.004	76 640	38 230
Mg(OH) ₂	s	40.311	117 690	59 170
Mg(OH) ₂	s	58.327	36 610	33 830
Mg(NO ₃) ₂	s	148.321 8	-69 680	50 950
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	s	256.413 8	-440 400	29 400
MgS	s	56.376	1 097 000	875 550
MgSO ₃	s	104.374	438 730	305 400
MgSO ₄	s	120.374	165 430	67 480
MgSiO ₃	s	100.396	81 430	25 060
Mg ₂ SiO ₄	s	140.708	255 810	140 770
Mg ₂ TiO ₄	s	160.52	185 980	92 200
Mn	s, α, IV	54.938 1	1 953 370	1 856 770
Mn ₂ C	s, II	116.947 6	19 480	35 360
MnCO ₃	s	125.844	200 230	159 340
MnCl ₂	s			

246 Appendix A

Table A.3—continued

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, \bar{h}_f^0 /(kJ/kmol)	Standard chemical exergy, \bar{e}^0 /(kJ/kmol)
1	2	3	4	5
MnFe ₂ O ₄	s	230.630	118.430	131.730
MnO	s, I	70.937 5	136.070	122.390
MnO ₂	s, I	86.936 9	0	21.110
Mn ₂ O ₃	s, II	157.874 4	70.760	79.110
Mn ₃ O ₄	s, I	228.811 9	176.270	177.600
Mn(OH) ₂	s	88.952 8	78.620	110.810
Mn(OH) ₃	s, green	105.960 2	-41.630	89.130
MnS	s, I	87.002	1.041 520	873.540
MnSO ₄	s	151.000	181.390	137.540
MnSO ₄ ·H ₂ O	s	169.015	127.400	115.130
MnSiO ₃	s	131.022	114.720	106.800
Mo	s	95.94	755.010	715.540
Mo ₂ C	s	203.89	1.921 800	1.853 700
MoO ₂	s	127.94	210.730	228.310
MoO ₃	s	143.94	0	43.940
Mo ₂ S ₃	s	288.07	3.256 710	2.811 400
N ₂	g	28.013 4	0	720
N ₂ (air)	g	28.953 4	0	690
NH ₃	g	17.030 5	316.780	341.250
NH ₄ Cl	g	53.491	249.260	331.150
NH ₄ NO ₃	s	80.043 48	118.320	300.020
(NH ₄) ₂ SO ₄	s	132.138	513.240	660.470
NO	g	30.006 1	90.430	89.040
NO ₂	g	46.005 5	33.870	56.220
N ₂ O	g	44.012 8	81.600	106.220
N ₂ O ₄	g	92.011 0	9.670	107.040
Na	s	22.989 8	330.410	343.830
NaAlO ₂	s	81.970 1	114.050	120.280
NaAlSi ₃ O ₈ ·H ₂ O	s	220.055	5.730	95.250
Na ₂ CO ₃	s	105.989 1	-77.090	53.130
Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O	s	124.004 3	-138.710	52.790
Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	s	232.096 3	-457.330	69.640
NaCl	s	58.443	0	22.200
NaHCO ₃	s	84.007 1	-103.120	224.370
NaNO ₃	s	84.994 7	-94.430	-15.745
Na ₂ O	s	61.979 0	244.650	313.260
NaOH	s	39.997 2	23.100	84.490
Na ₂ S	s, II	78.044	1.011 940	930.340
Na ₂ SO ₃	s	126.042	294.320	82.840
Na ₂ SO ₄	s	142.041	0	35.000
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	s	322.195	-521.570	54.380
Na ₂ SiO ₃	s	122.064	980	71.660
Na ₂ Si ₂ O ₅	s	182.149	-8.620	61.190
Na ₄ SiO ₄	s	184.043	175.640	312.120
Nc	g	20.183	0	27.120
Ni	s, II	58.71	244.510	252.800

Ni ₃ C	s	188.14	1.173 370	1 209.430
NiCO ₃	s	118.72	-42.890	42.980
NiCl ₂	s	129.62	90.120	111.150
Ni(NO ₃) ₂	s	182.72	-183.380	25.110
NiO	s	74.71	0	38.460
Ni(OH) ₂	s	92.72	-51.910	49.160
Ni(OH) ₃	s	109.73	-71.170	74.370
NiS	s, I	90.77	895.820	775.450
Ni ₃ S ₂	s	240.26	1 999.700	1 774.810
NiSO ₄	s	154.77	77.300	76.080
NiSO ₄ ·6H ₂ O	s, green	262.86	-279.310	72.830
O ₂	g	31.998 8	0	3.970
O	g	15.999 4	247.520	232.110
O ₃	g	47.998 2	142.350	169.100
P	g	30.973 8	843.640	859.600
PCl ₃	l	137.333	764.650	744.060
P ₂ O ₃	s	141.944 6	574.430	319.540
Pb	s	207.19	306.680	226.940
PbCO ₃	s	267.20	0	17.090
PbCl ₂	s	278.10	108.950	30.410
PbO	s	223.19	88.670	40.020
PbO ₂	s, I, yellow	223.19	87.290	39.400
Pb ₂ O ₃	s, II, red	239.19	29.850	17.380
Pb ₃ O ₄	s	685.57	184.840	71.510
Pb(OH) ₂	s	241.20	33.700	41.560
PbSO ₄	s	239.25	936.890	724.390
PbSiO ₃	s, II	303.25	112.260	21.660
PbSiO ₄	s	283.27	83.110	36.120
Pb ₂ SiO ₇	s	506.46	164.120	69.530
Rb	s	85.47	349.370	398.800
Rb ₂ CO ₃	s	230.95	-36.240	170.630
RbCl	s	120.92	0	51.440
RbNO ₃	s	147.47	-140.650	14.490
Rb ₂ O	s	186.94	368.400	608.590
RbOH	s	102.48	56.300	147.840
Rb ₂ SO ₄	s	203.00	1 074.980	1 052.290
S	s	267.00	-2.290	92.110
S, II, rhombic	s	32.064	724.580	598.850
S, I, monoclinic	s	32.064	724.880	598.950
SO ₂	g	64.062 8	427.480	303.500
SO ₃	g	80.062 2	329.140	225.070
Sb	s, III	121.75	490.690	359.190
Sb ₂ O ₃	s	291.50	270.040	269.730
Sb ₂ O ₄	s	307.50	85.400	104.530
Sb ₂ O ₅	s	323.60	0	52.250
Si	s	28.086	859.970	803.010
SiC	s	40.097	1 141.960	1 104.220
SiCl ₄	l	169.898	542.810	465.010
SiO ₂	s, II, quartz	60.085	0	1.860
SiO ₂	s, II	60.085	1.680	3.280
SiS ₂	s, white	92.214	2 102.470	996.740
SiS ₄	s, II, white	118.69	581.130	542.660
Sn	s, III, grey	118.69	583.640	547.180
Sn	s	189.60	392.810	355.630
SnCl ₂	s	134.69	294.380	287.550
SnO	s			

6.3.72 203

Table A.3—continued

Substance	State*	Relative molecular mass	Standard enthalpy of devaluation, f_0^0 [kJ/kmol]	Standard chemical exergy, e^0 [kJ/kmol]
1	2	3	4	5
SnO ₂	s	150.69	0	26 820
SnS	s	150.75	1 227 840	1 059 060
SnS ₂	s	182.82	1 862 820	1 581 260
Sr	s	87.62	825 430	737 650
SrCO ₃	s, III, strontianite	147.63	0	16 570
SrCl ₂	s	158.53	1 58 150	74 480
SrCl ₂ ·6H ₂ O	s	266.62	-186 400	66 330
SrO	s	103.62	234 670	165 750
SrO ₃	s	119.62	182 340	153 800
Sr(OH) ₂	s	121.68	107 400	109 310
SrS	s	119.68	1 097 420	988 710
SrSO ₄	s	183.68	1 043 310	9 170
Tl	s, II	47.90	912 720	876 000
TiC	s	59.91	1 080 410	1 064 120
TiO	s, II	63.90	393 710	388 840
TiO ₂	s, III, rutile	79.90	0	21 090
Ti ₂ O ₃	s, II	143.80	306 050	325 100
Ti ₃ O ₅	s, II	223.70	281 760	322 200
TiS ₂	s, II	112.03	2 026 940	1 743 640
U	s, III	238.03	1 264 400	1 224 180
UCl ₃	s	344.39	615 170	534 850
UCl ₄	s	379.84	536 100	483 790
UCl ₅	s	415.30	571 310	508 710
UO ₂	s	270.03	1 79 180	151 450
UO ₃	s	286.03	0	43 940
V	s	50.942	780 840	725 880
VO	s	62.953	1 121 520	1 086 170
VO ₂	s	66.941	355 550	328 880
VO ₃	s	82.940	1 64 850	68 990
V ₂ O ₃	s	149.882	330 760	324 280
V ₂ O ₅	s	181.881	0	32 530
W	s	183.85	840 880	799 680
WC	s	195.86	1 196 600	1 173 270
WO ₂	s	215.85	270 220	284 540
WO ₃	s	231.85	0	42 220
WS ₂	s, yellow	249.98	2 096 190	1 803 920
Xe	g	131.30	0	40 250
Zn	s	65.37	419 310	353 160
ZnCO ₃	s	125.38	0	38 080
ZnCl ₂	s	136.28	164 850	101 340
ZnFe ₂ O ₄	s	241.06	40 830	27 630
ZnO	s	81.37	71 090	37 080
Zn(OH) ₂	s	99.38	18 640	34 260
ZnS	s, II, sphalerite	97.43	940 830	764 860
ZnSO ₄	s	161.43	164 680	93 280
ZnSiO ₃	s	141.45	45 810	12 590
Zn ₂ SiO ₄	s	222.82	187 860	121 280

* s—solid, l—liquid, g—gaseous.

Table A.4 Standard enthalpy of devaluation and standard chemical exergy of organic substances. Reproduced from Ref [3.3], by permission. ($T^0 = 298.15$ K, $p^0 = 1.01325$ bar.)

No.	Substance	State	Relative molecular mass	Standard enthalpy of chemical devaluation, f_0^0 [kJ/kmol]	Standard chemical exergy, e^0 [kJ/kmol]
1	2	3	4	5	6
1	CH ₄	g	16.042	802 320	836 510
2	C ₂ H ₆	g	30.068	1 428 780	1 504 360
3	C ₃ H ₈	g	44.094	2 045 380	2 163 190
4	C ₄ H ₁₀	g	58.120	2 658 830	2 818 930
5	C ₅ H ₁₂	g	72.146	3 274 290	3 477 050
		g	72.146	3 247 240	3 475 590
6	C ₆ H ₁₄	g	86.172	3 889 280	4 134 590
		g	86.172	3 857 630	4 130 570
7	C ₇ H ₁₆	g	100.198	4 467 820	4 786 300
8	C ₈ H ₁₈	g	114.224	5 078 000	5 440 030
9	C ₉ H ₂₀	g	128.250	5 688 230	6 093 550
10	C ₁₀ H ₂₂	g	142.276	6 298 410	6 749 750
11	C ₁₁ H ₂₄	g	156.302	6 908 600	7 404 520
12	C ₁₂ H ₂₆	g	170.328	7 518 820	8 059 340
13	C ₁₃ H ₂₈	g	184.354	8 129 010	8 714 200
14	C ₁₄ H ₃₀	g	198.380	8 739 190	9 368 970
15	C ₁₅ H ₃₂	g	212.406	9 349 370	10 023 870
16	C ₁₆ H ₃₄	g	226.432	9 959 640	10 678 810
17	C ₃ H ₆	g	42.078	1 960 640	2 052 490
18	C ₄ H ₈	g	56.104	2 569 770	2 707 730
19	C ₅ H ₁₀	g	84.156	3 691 380	3 928 100
		g	84.156	3 658 260	3 922 990
20	C ₆ H ₁₄	g	98.182	4 295 490	4 573 030
		g	98.182	4 260 070	4 566 080
21	C ₈ H ₁₆	g	112.208	4 914 260	5 246 900
		g	112.208	4 873 770	5 224 290
22	C ₁₀ H ₁₈	g	126.234	5 483 330	5 878 430
23	C ₁₀ H ₁₂ O	g	140.260	6 094 260	6 534 510
24	C ₂ H ₄	g	28.052	1 323 870	1 366 610
25	C ₃ H ₆	g	42.078	1 927 730	2 010 840
26	C ₄ H ₈	g	56.104	2 542 940	2 668 920
27	C ₅ H ₁₀	g	84.156	3 772 890	3 984 330
		g	84.156	3 742 240	3 981 650
28	C ₇ H ₁₄	g	98.182	4 387 970	4 641 570
		g	98.182	4 338 490	4 620 680
29	C ₂ H ₂	g	26.036	1 256 460	1 269 310
30	C ₃ H ₄	g	40.062	1 850 860	1 904 070
31	C ₄ H ₆	g	54.088	2 466 360	2 561 190
32	C ₆ H ₁₀	g	82.140	3 696 320	3 876 600
33	C ₇ H ₁₂	g	96.166	4 311 440	4 534 300
34	C ₆ H ₆	g	78.108	3 171 630	3 310 540
		g	78.108	3 137 670	3 305 350

Table A.4—continued

No.	Substance	State	Relative molecular mass			Standard enthalpy of formation, $\Delta_f H^\circ$ /kJ/mol	Standard enthalpy of chemical exergy, e° /kJ/mol
			3	4	5		
35	C ₇ H ₈	g	92.134	3 774 440	3 952 550		
	toluene	g	92.134	3 774 440	3 952 550		
36	C ₈ H ₁₀	g	106.160	4 389 980	4 610 250		
	ethylbenzene	g	106.160	4 389 980	4 610 250		
37	C ₉ H ₁₂	l	120.186	4 957 510	5 262 930		
	propylbenzene	l	120.186	4 957 510	5 262 930		
38	C ₁₀ H ₁₄	l	134.212	5 567 730	5 908 120		
	butylbenzene	l	134.212	5 567 730	5 908 120		
39	C ₁₀ H ₁₆	l	138.248	5 918 310	6 258 510		
	decylbenzene	l	138.248	5 918 310	6 258 510		
40	C ₁₀ H ₈	s	128.164	4 984 220	5 264 190		
	naphthalene	s	128.164	4 984 220	5 264 190		
41	C ₁₀ H ₁₄	s	134.212	5 532 980	5 896 060		
	1,2,4,5-tetra-methylbenzene	s	134.212	5 532 980	5 896 060		
42	C ₁₁ H ₁₀	s	142.190	5 574 930	5 892 920		
	2-methylnaphthalene	s	142.190	5 574 930	5 892 920		
43	C ₁₁ H ₁₆	s	148.238	6 131 610	6 534 420		
	pentamethylbenzene	s	148.238	6 131 610	6 534 420		
44	C ₁₂ H ₁₈	s	162.264	6 739 110	7 191 670		
	hexamethylbenzene	s	162.264	6 739 110	7 191 670		
45	C ₁₄ H ₁₀	s	178.220	6 850 940	7 229 600		
	anthracene	s	178.220	6 850 940	7 229 600		
46	C ₁₄ H ₁₀	s	178.220	6 835 870	7 213 270		
	phenanthrene	s	178.220	6 835 870	7 213 270		
47	C ₁₄ H ₁₄	s	182.252	7 250 910	7 682 020		
	1,1-diphenylethane	s	182.252	7 250 910	7 682 020		
48	C ₁₀ H ₁₆	s	142.190	5 574 930	5 892 920		
	octadecane	s	142.190	5 574 930	5 892 920		
49	C ₁₁ H ₁₆	s	154.272	6 013 420	6 363 090		
	triphenylmethane	s	154.272	6 013 420	6 363 090		
50	C ₁₂ H ₁₈	s	166.274	6 534 420	6 901 000		
	1,3,5-triphenylbenzene	s	166.274	6 534 420	6 901 000		
51	C ₁₂ H ₂₀	s	170.276	6 835 870	7 213 270		
	tetraphenylmethane	s	170.276	6 835 870	7 213 270		
52	CH ₂ O	g	30.026	519 870	541 650		
	formaldehyde	g	30.026	519 870	541 650		
53	CH ₂ O ₂	g	46.026	259 080	303 580		
	formic acid	g	46.026	259 080	303 580		
54	C ₂ H ₆ O	g	46.068	1 278 230	1 370 800		
	ethanol	g	46.068	1 278 230	1 370 800		
55	C ₂ H ₆ O	g	46.068	1 328 140	1 426 440		
	dimethylether	g	46.068	1 328 140	1 426 440		
56	C ₂ H ₄ O	g	44.052	1 105 520	1 167 860		
	acetaldehyde	g	44.052	1 105 520	1 167 860		
57	C ₂ H ₄ O	g	44.052	1 220 530	1 288 990		
	ethylene oxide	g	44.052	1 220 530	1 288 990		
58	C ₂ H ₆ O ₂	l	62.068	1 058 630	1 214 210		
	ethylene glycol	l	62.068	1 058 630	1 214 210		
59	C ₂ H ₄ O ₂	g	60.052	834 140	923 570		
	acetic acid	g	60.052	834 140	923 570		
60	C ₃ H ₈ O	l	60.094	1 830 590	2 007 820		
	propan-2-ol	l	60.094	1 830 590	2 007 820		
61	C ₃ H ₆ O	g	58.078	1 659 600	1 795 380		
	acetone	g	58.078	1 659 600	1 795 380		
62	C ₄ H ₈ O	l	72.104	2 296 460	2 472 470		
	butanol	l	72.104	2 296 460	2 472 470		
63	C ₄ H ₈ O	g	72.104	2 264 050	2 441 780		
	butan-2-one	g	72.104	2 264 050	2 441 780		
64	C ₄ H ₆ O	g	68.072	2 024 360	2 123 420		
	furan	g	68.072	2 024 360	2 123 420		
65	C ₄ H ₈ O ₂	l	88.104	2 018 750	2 224 950		
	butyric acid	l	88.104	2 018 750	2 224 950		
66	C ₄ H ₈ O ₂	l	88.104	2 073 550	2 278 750		
	ethyl acetate	l	88.104	2 073 550	2 278 750		
67	C ₅ H ₁₂ O	l	88.146	3 060 720	3 325 530		
	pentan-1-ol	l	88.146	3 060 720	3 325 530		
68	C ₅ H ₁₂ O	l	88.146	3 017 220	3 285 530		
	2-methylbutan-2-ol	l	88.146	3 017 220	3 285 530		
69	C ₅ H ₁₀ O	l	86.130	2 878 680	3 121 220		
	cyclopentanol	l	86.130	2 878 680	3 121 220		
70	C ₅ H ₈ O ₂	l	98.098	2 418 550	2 694 580		
	furfuryl alcohol	l	98.098	2 418 550	2 694 580		
71	C ₆ H ₁₄ O	l	102.172	3 668 890	3 977 170		
	hexan-1-ol	l	102.172	3 668 890	3 977 170		

72	C ₆ H ₁₂ O	l	100.156	3 465 410	3 764 560	
	cyclohexanol	l	100.156	3 465 410	3 764 560	
73	C ₇ H ₁₀ O	l	116.198	4 285 570	4 637 550	
	heptan-1-ol	l	116.198	4 285 570	4 637 550	
74	C ₇ H ₈ O	l	108.134	3 563 430	3 804 960	
	benzyl alcohol	l	108.134	3 563 430	3 804 960	
75	C ₄ H ₁₀ O ₄	s	122.124	1 874 680	2 204 470	
	erythritol	s	122.124	1 874 680	2 204 470	
76	C ₄ H ₆ O ₄	s	118.092	1 356 860	1 616 310	
	succinic acid	s	118.092	1 356 860	1 616 310	
77	C ₄ H ₄ O ₄	s	116.076	1 271 280	1 500 300	
	maleic acid	s	116.076	1 271 280	1 500 300	
78	C ₄ H ₄ O ₄	s	116.076	1 249 090	1 476 100	
	fumaric acid	s	116.076	1 249 090	1 476 100	
79	C ₆ H ₁₀ O	s	94.114	2 925 860	3 135 370	
	phenol	s	94.114	2 925 860	3 135 370	
80	C ₆ H ₁₄ O ₆	s	182.178	2 729 580	3 212 360	
	galactitol	s	182.178	2 729 580	3 212 360	
81	C ₆ H ₁₄ O ₆	s	182.178	2 739 590	3 220 860	
	mannitol	s	182.178	2 739 590	3 220 860	
82	C ₆ H ₁₂ O ₆	s	180.162	2 529 580	2 942 570	
	α -D-galactose	s	180.162	2 529 580	2 942 570	
83	C ₆ H ₁₂ O ₆	s	180.162	2 544 610	2 952 820	
	L-sorbose	s	180.162	2 544 610	2 952 820	
84	C ₇ H ₆ O ₂	s	138.125	3 097 230	3 350 440	
	benzoic acid	s	138.125	3 097 230	3 350 440	
85	C ₇ H ₆ O ₂	s	154.125	2 888 100	3 158 140	
	O-hydroxybenzoic acid	s	154.125	2 888 100	3 158 140	
86	C ₇ H ₆ O ₂	s	148.120	3 173 800	3 439 410	
	phthalic anhydride	s	148.120	3 173 800	3 439 410	
87	C ₈ H ₆ O ₄	s	166.136	3 094 300	3 419 530	
	phthalic acid	s	166.136	3 094 300	3 419 530	
88	C ₁₂ H ₁₀ O	s	170.212	5 903 140	6 293 850	
	diphenyl ether	s	170.212	5 903 140	6 293 850	
89	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	s	342.308	5 154 200	6 013 420	
	β -lactose	s	342.308	5 154 200	6 013 420	
90	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	s	342.308	5 166 180	6 033 090	
	sucrose	s	342.308	5 166 180	6 033 090	
91	C ₁₂ H ₂₄ O ₁₂	s	360.324	5 152 190	6 070 860	
	α -lactose monohydrate	s	360.324	5 152 190	6 070 860	
92	C ₁₂ H ₂₄ O ₁₂	s	360.324	5 173 210	6 091 000	
	β -maltose monohydrate	s	360.324	5 173 210	6 091 000	
93	C ₁₆ H ₃₄ O ₂	s	242.448	9 731 250	10 532 980	
	hexadecan-1-ol	s	242.448	9 731 250	10 532 980	
94	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	s	256.432	9 290 260	10 089 060	
	palmitic acid	s	256.432	9 290 260	10 089 060	
95	C ₁₂ H ₂ O ₄	s	90.038	202 720	370 950	
	oxalic acid	s	90.038	202 720	370 950	
96	C ₃ H ₄ N ₄	s	84.084	1 296 480	1 481 960	
	cyanoguanidine	s	84.084	1 296 480	1 481 960	
97	C ₁₁ H ₁₆ N ₂	s	126.124	1 835 620	2 127 440	
	melamine	s	126.124	1 835 620	2 127 440	
98	C ₃ H ₃ N ₃	s	135.130	2 664 860	2 946 840	
	adenine	s	135.130	2 664 860	2 946 840	
99	C ₄ H ₄ N ₂	s	104.108	3 106 060	3 251 510	
	2-yanopyridine	s	104.108	3 106 060	3 251 510	
100	C ₁₂ H ₁₁ N	s	169 216	6 188 050	6 553 430	
	diphenyl amine	s	169 216	6 188 050	6 553 430	
101	CH ₄ ON ₂	s	60.058	544 660	693 580	
	urea	s	60.058	544 660	693 580	
102	CH ₄ O ₂ N ₂	s	78.074	474 780	673 570	
	ammonium carbonate	s	78.074	474 780	673 570	
103	C ₂ H ₃ O ₂ N	s	75.068	867 630	1 055 280	
	glycine	s	75.068	867 630	1 055 280	
104	C ₃ H ₇ O ₂ N	s	89.094	1 462 410	1 697 540	
	(\pm) alanine	s	89.094	1 462 410	1 697 540	
105	C ₃ H ₇ O ₂ N	s	133.104	1 445 160	1 751 920	
	L-aspartic acid	s	133.104	1 445 160	1 751 920	
106	C ₄ H ₉ O ₃ N ₂					

Table A.4—continued

No.	Substance	State	Relative	Standard	Standard	
			molecular	enthalpy of	chemical	
			mass	devaluation,	exergy,	
				\bar{h}_f^0	\bar{e}^0	
				kJ/kmol	kJ/kmol	
1	2	3	4	5	6	
125	C ₄ H ₁₀ S	methyl propyl sulphide	l	90.190	3 384 940	3 452 810
126	C ₄ H ₄ S	thiophene	l	84.142	2 864 570	2 850 290
127	C ₄ H ₁₀ S ₂	ethyl butyl disulphide	l	122.256	4 114 540	4 063 330
128	C ₅ H ₁₂ S	pentane-1-thiol	l	104.217	3 993 510	4 101 510
129	C ₅ H ₆ S	2-methyl thiophene	l	98.169	3 373 220	3 402 110
130	C ₅ H ₆ S	3-methyl thiophene	l	98.169	3 374 770	3 403 780
131	C ₆ H ₆ S	thiophenol	l	110.180	3 875 260	3 921 690
132	C ₆ H ₁₄ S ₂	dipropyl disulphide	l	150.310	5 333 860	5 370 870
133	C ₆ H ₁₀ O ₄ S ₂	3,3'-dithiodipropionic acid	s	210.278	4 050 480	4 176 460
134	C ₃ H ₇ OSN	cysteine	s	105.163	2 218 000	2 292 610
135	C ₆ H ₁₂ O ₄ S ₂ N ₂	cystine	s	240.310	4 210 160	4 425 660

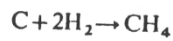
Key: s—solid, l—liquid, g—gas.

Example A.1

Calculate the value of standard molar chemical exergy of methane vapour. Its Gibbs function of formation is^[A.4]

$$(\Delta \bar{g}_f^0)_{\text{C}_{\text{H}_4(\text{g})}} = -50\,810 \text{ kJ/kmol}$$

Solution: The reaction of formation is:



Hence (A.10) becomes:

$$\bar{e}_{\text{C}_{\text{H}_4(\text{g})}}^0 = (\Delta \bar{g}_f^0)_{\text{C}_{\text{H}_4(\text{g})}} + \bar{e}_{\text{C}(\text{s})}^0 + 2\bar{e}_{\text{H}_2(\text{g})}^0$$

From Table A.2:

$$\bar{e}_{\text{C}(\text{s})}^0 = 410\,530 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{e}_{\text{H}_2(\text{g})}^0 = 238\,350 \text{ kJ/kmol}$$

Substituting

$$\bar{e}_{\text{C}_{\text{H}_4(\text{g})}}^0 = -50\,810 + 410\,530 + 2 \times 238\,350 = \underline{836\,420 \text{ kJ/kmol}}$$

Correcting \bar{e}^0 for environmental temperature

If the environmental temperature T_0 differs appreciably from the standard temperature T^0 a correction for this effect on the value of chemical exergy may be required. The main error arises^[A.5] in such a case because modules Y and Z interact thermally with the actual environment over a finite temperature difference. If the heat transfers to the two modules are denoted by Q_Y and Q_Z , the correction is equal to the reversible work