

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Sérgio Augusto Araújo
da Gama Cerqueira E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 26/03/99.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

ORIENTADOR

Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas

Autor: Sérgio Augusto Araújo da Gama Cerqueira
Orientadora: Silvia Azucena Nebra

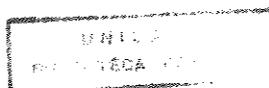
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas

*por Sérgio Augusto Araújo da Gama Cerqueira
orientadora Prof. Dra. Silvia Azucena Nebra*

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica

03/99



9912522

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	C335m
V.º	37941
D.º	229/99
	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	17/06/99
N.º C/D	

CM-00124510-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C335m Cerqueira, Sérgio Augusto Araújo da Gama
Metodologias de análise termoeconômica de
sistemas. / Sérgio Augusto Araújo da Gama Cerqueira.--
Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadora: Silvia Azucena Nebra.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

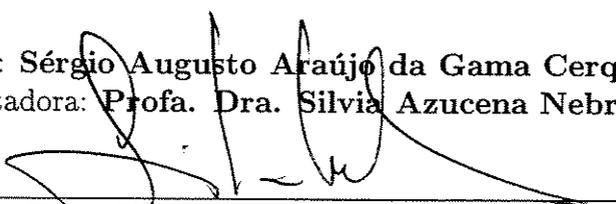
1. Termodinâmica. 2. Termoeconomia. 3. Entropia.
4. Energia elétrica e calor- Cogeração. I. Nebra, Silvia
Azucena. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

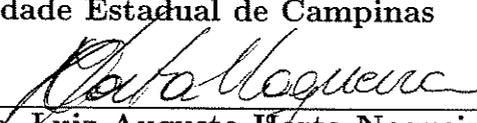
Tese de Doutorado

Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas

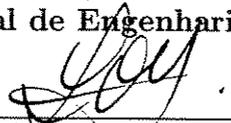
Autor: Sérgio Augusto Araújo da Gama Cerqueira
Orientadora: Profa. Dra. Silvia Azucena Nebra



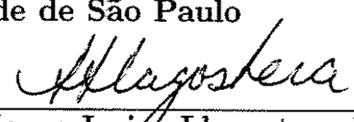
Profa. Dra. Silvia Azucena Nebra, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



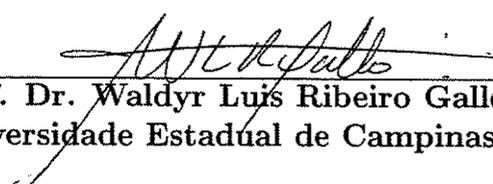
Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira
Escola Federal de Engenharia de Itajubá



Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr.
Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Jorge Isaías Llagostera Beltrán
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Waldyr Luis Ribeiro Gallo
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 26 de Março de 1999.

A Virgínia

Agradecimentos

São tantas as pessoas a quem agradecer que tenho desde já a certeza de que alguém muito querido será esquecido. A essa(s) pessoa(s) desde já me desculpo.

Este trabalho não teria sido desenvolvido com tanto prazer se não fossem os amigos, colegas, professores e funcionários do Departamento de Energia. A eles meu agradecimento por terem feito do meu período na UNICAMP uma época de que me lembrarei com saudades.

Agradeço a Neusa e Rodrigues, pela disposição em cooperar.

Aos professores que tive, em especial Gallo e Paulo, cada um três vezes bom mestre.

À CAPES e à FUNREI, por proporcionarem os meios sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

Aos amigos de mesa, do almoço e do boteco, Lourenço, Gisele, Rosilene, Cristiano, Cássia, Ricardo, Thomaz, Edna, Mônica, Artur, Gilson, Horácio, Allan, Daniel... muito obrigado pela companhia alegre, pelas conversas e debates infintos.

A Maria Eugênia e Clayton, colegas e amigos.

Aos colegas de trabalho, Ednildo, Barreda, Flávio, Madureira, pela amizade e pela paciência em ouvir mil idéias, tantas equivocadas.

Aos professores Christos Frangopoulos e Miguel Angel Lozano, pelos esclarecimentos e conselhos.

A Silvia, mais que uma orientadora perfeita, uma grande amiga, minha gratidão.

A meus pais, de quem mesmo a adversidade da doença não tirou a alegria e a genero-

cidade do ombro amigo.

A Virgínia, a quem tantas vezes tive que negar o tempo.

Conteúdo

Agradecimentos	iii
Nomenclatura	xv
Resumo	xvii
Abstract	xviii
Introdução	xix
1 Metodologias Estruturais	1
1.1 A Otimização Termoeconômica	1
1.2 Análise Funcional Termoeconômica	6
1.2.1 Otimização para Demanda Fixa	11
1.2.2 Atribuição de Custos	12
1.2.3 Análise Funcional de Engenharia	13
2 Metodologias Exergoeconômicas	14
2.1 As Alternativas	14
2.2 A Teoria do Custo Exergético	17

2.3	A Exergoeconomia	22
2.3.1	A Vertente do Custo Específico	24
2.3.2	Aperfeiçoamento Exergoeconômico de Sistemas	27
2.4	Metodologia Estrutural	28
3	Modelagem e Otimização de um Sistema de Cogeração	33
3.1	Descrição do Sistema	33
3.1.1	O Modelo Termodinâmico	34
3.1.2	O Modelo Econômico	37
3.1.3	A Otimização	38
4	Aplicação ao Sistema de Cogeração	41
4.1	Aplicação da Análise Funcional Termoeconômica	41
4.2	Aplicação da Teoria do Custo Exergético	46
4.2.1	Implementação Básica	46
4.2.2	Desagregando a Exergia	49
4.2.3	Redividindo a Irreversibilidade Externa	54
4.3	Aplicação da Metodologia Estrutural	65
4.4	Aplicação da Exergoeconomia	72
5	Análise de Resultados	76
5.1	Diagramas Produtivos	76
5.1.1	Teoria do Custo Exergético - Exergia Total	77
5.1.2	Teoria do Custo Exergético - Exergia Desagregada	77
5.1.3	Teoria do Custo Exergético - Exergia Total e Neguentropia	80
5.1.4	Teoria do Custo Exergético - Exergia Desagregada e Neguentropia	81

5.1.5	Teoria do Custo Exergético - Exergia Total e Irreversibilidade Internalizada	84
5.1.6	Teoria do Custo Exergético - Exergia Desagregada e Irreversibilidade Internalizada	84
5.1.7	Teoria do Custo Exergético - Redistribuição Externa	85
5.1.8	Exergoeconomia	87
5.1.9	Análise Comparativa	90
5.2	Tratamentos da Irreversibilidade Externa	91
5.3	Efeitos da Desagregação da Exergia	95
5.4	Efeitos da Definição de Subprodutos	99
5.5	Custos dos produtos externos	101
6	Conclusões	104
A	Coeficientes de Produção na Aplicação da Metodologia Estrutural	107
B	Resultados obtidos pela aplicação da Análise Funcional Termoeconômica	110
C	Resultados obtidos pela aplicação da Teoria do Custo Exergético	111
C.1	Variantes que consideram a exergia total	111
C.2	Variantes que consideram a exergia desagregada, função do compressor aumento da exergia total	116
C.3	Variantes que consideram a exergia desagregada, função do compressor aumento da exergia mecânica	123
D	Resultados obtidos pela aplicação da Metodologia Estrutural	130
E	Resultados obtidos pela aplicação da Exergoeconomia	131

Lista de Figuras

1.1	Sistema de n unidades em série	3
1.2	Unidade no diagrama funcional	7
1.3	Ramificação e junção no diagrama funcional	8
2.1	Sistema de cogeração com turbina de contrapressão	18
2.2	Esquema do exemplo para metodologia do custo específico	25
2.3	Diagrama exemplo para metodologia do custo específico	26
3.1	Esquema da instalação de cogeração estudada	34
4.1	Diagrama funcional para a Análise Funcional Termoeconômica.	42
4.2	Diagrama T-s para um ciclo de Rankine operando em ciclo condensante.	55
4.3	Estrutura produtiva na Metodologia Estrutural.	66
5.1	Diagrama funcional na implementação básica da Teoria do Custo Exergético.	78
5.2	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica (produto do compressor aumento da exergia total).	79
5.3	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica (produto do compressor aumento da exergia mecânica).	80

5.4	Diagrama funcional na Teoria do Custo Exergético, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa.	81
5.5	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia total).	82
5.6	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia mecânica).	83
5.7	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, internalizando a irreversibilidade externa.	84
5.8	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, internalizando a irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia total).	85
5.9	Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, internalizando a irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia mecânica).	86
5.10	Diagrama produtivo na Exergoeconomia.	87
5.11	Custos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia total.	92
5.12	Custos específicos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia desagregada (produto do compressor aumento da exergia total).	94
5.13	Custos específicos dos produtos das unidades em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia desagregada (produto do compressor aumento da exergia total).	96

5.14 Custos específicos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia total (símbolos vazados) e desagregada (símbolos cheios), considerando como produto do compressor o aumento da exergia total. . .	97
5.15 Custos totais dos insumos em variantes da Teoria do Custo Exergético, irreversibilidade internalizada, exergia total, colunas à esquerda, e desagregada (função do compressor aumento da exergia total), colunas à direita.	98
5.16 Custos específicos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético exergia desagregada (função do compressor aumento da exergia total, pontos vazados e aumento da exergia mecânica, pontos negros). . . .	99
5.17 Custos dos insumos das unidades em variantes da Teoria do Custo Exergético exergia desagregada, considerando como produto do compressor o aumento da exergia mecânica, colunas à esquerda, e o aumento da exergia total, à direita.	100
5.18 Custos dos produtos das unidades em variantes da Teoria do Custo Exergético exergia desagregada, considerando como produto do compressor o aumento da exergia mecânica, colunas à esquerda, e o aumento da exergia total, à direita.	101
5.19 Custos para potência e calor obtidos pelas diferentes metodologias.	103

Lista de Tabelas

3.1	Dados Termodinâmicos, Propriedades do Ar e Condições Operacionais . . .	34
3.2	Valores das variáveis independentes obtidos pela otimização	39
3.3	Custos dos equipamentos na condição de ótimo (US\$)	39
3.4	Propriedades das correntes no sistema	40
4.1	Estrutura produtiva do sistema na implementação básica da Teoria do Custo Exergético.	46
4.2	Matriz de Incidência e Vetor de Valoração Externa na implementação básica da Teoria do Custo Exergético.	49
4.3	Estrutura Produtiva na Teoria do Custo Exergético considerando a divisão da exergia em parcelas térmica e mecânica.	50
4.4	Estrutura produtiva considerando o uso da neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa.	56
4.5	Estrutura Produtiva considerando a divisão da exergia em parcelas térmica e mecânica e o uso da neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa.	58
B.1	Custos dos produtos na Análise Funcional Termoeconômica	110
C.1	Custos da exergia dos fluxos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético	112

C.2	Custos dos produtos e dos insumos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético ($\$/kJ^e$)	112
C.3	Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa . .	113
C.4	Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa) ($\$/kJ^e$)	113
C.5	Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, internalizando a irreversibilidade externa	114
C.6	Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, internalizando a irreversibilidade externa ($\$/kJ^e$)	114
C.7	Custos da exergia dos fluxos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa	115
C.8	Custos dos produtos internos e dos insumos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa ($\$/kJ^e$)	115
C.9	Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia total)	117
C.10	Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia total) ($\$/kJ^e$)	117
C.11	Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total)	118

C.12 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total) ($\$/kJ^e$)	119
C.13 Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total)	120
C.14 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total) ($\$/kJ^e$)	120
C.15 Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total)	121
C.16 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total) ($\$/kJ^e$)	122
C.17 Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia mecânica)	124
C.18 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia mecânica) ($\$/kJ^e$)	124
C.19 Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica)	125

C.20 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ ^e)	126
C.21 Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica)	127
C.22 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ ^e)	127
C.23 Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica)	128
C.24 Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ ^e)	129
D.1 Custos dos produtos na Metodologia Estrutural	130
E.1 Custos da exergia dos produtos internos e insumos na Exergoeconomia (\$/kJ ^e)	131
E.2 Custos da exergia dos fluxos na Exergoeconomia	132

Nomenclatura

Maiúsculas

Z, \dot{Z} custo de investimento (inclui capital, O&M)

C, \dot{C} custo monetário (\$/s)

$[\dot{H}]$ fluxo entálpico (kW)

$[\dot{E}]$ fluxo exergético (kW)

$[\dot{S}]$ fluxo neguentrópico (kW)

Minúsculas

c custo específico

l número de insumos consumidos

m número de produtos fornecidos

y produto (genérico)

x vetor das variáveis independentes

y vetor das relações entre as unidades e entre o sistema e o ambiente

h entalpia específica (kJ/kg)

e exergia específica (kJ/kg)

s neguentropia específica (kJ/kg)

Gregas

σ número de unidades reais

τ número total de unidades reais e junções

ω número total de unidades reais e virtuais no sistema

μ número de ramificações

φ número de junções

κ fator de recuperação de capital

γ fator de O&M

Superescritos

e base exergética

h base energética

m base mássica

T térmica

M mecânica

Subscritos

P produto

F insumo

T total

i, j, k, r contadores

o oriundo do ou direcionado ao ambiente

v vapor

Resumo

Cerqueira, Sérgio Augusto Araújo da Gama, *Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 137 p. Tese (Doutorado)

Neste trabalho procede-se a um estudo das principais metodologias de análise termoeconômica, através de sua aplicação a um problema de cogeração. Modelos termodinâmico e econômico de uma central de cogeração com turbina a gás regenerativa são propostos e otimizados objetivando a minimização do custo exerético médio dos produtos, calor e potência. Quatro das principais metodologias, a Análise Funcional Termoeconômica, a Teoria do Custo Exerético, a Exergoeconomia e a Metodologia Estrutural, são aplicadas a este sistema, na condição de ótimo. Variantes das metodologias são também propostas e aplicadas. Baseado nos resultados obtidos, estuda-se a influência da divisão da exergia em parcelas térmica e mecânica para a determinação dos custos dos produtos do sistema. Através da explicitação das estruturas produtivas utilizadas, cuja visualização é possibilitada pela construção de diagramas estruturais, busca-se revelar a unidade subjacente às diferentes metodologias de análise termoeconômica. Os diferentes tratamentos dados aos custos das irreversibilidades externas, advindas da saída para o ambiente de correntes portadoras de exergia, revelam-se essenciais para esclarecer os diferentes valores dos custos dos produtos do sistema.

Palavras Chave

Termoeconomia, Termodinâmica, Energia Elétrica e Calor: Cogeração, Entropia

Abstract

Cerqueira, Sérgio Augusto Araújo da Gama, *Systems Thermo-economic Analysis Methodologies*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 137 p. PhD Thesis

In this work a comparative study is made of four of the foremost thermo-economic analysis methodologies, the Thermo-economic Functional Analysis, the Theory of the Exergetic Cost, the Exergoeconomic Methodology and the Structural Methodology. Both thermodynamic and economic models of a cogeneration system consisting of a regenerative gas turbine coupled with a heat recovery steam generator are proposed. The methodologies are applied to the system in the optimum condition, found by a non-linear optimization technique. The objective function of the optimization problem is the minimization of the exergy specific average cost of the products of the system, heat and power. Alternative variants, based on the thermo-economic analysis methodologies, are proposed and applied to the system. The productive structures used by each methodology are graphically represented through structural diagrams, which are drawn based upon the analysis of the systems of equations established in the implementation of the methodologies. Their examination leads into the recognition of the underlying unity behind the different methods. The effects of the division of exergy into thermal and mechanical components are also investigated. The approach taken to deal with the external irreversibility, caused by the release to the environment of a thermal carrier, is found to generate the greatest discrepancies in the costs of the products of the system determined by the different methodologies.

Key Words

Thermoeconomy, Thermodynamics, Electrical Energy and Heat: Cogeneration, Entropy

Introdução

A aplicação de técnicas baseadas na combinação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica na análise, projeto e otimização de equipamentos e sistemas térmicos generalizou-se durante as décadas de 1970 e 1980 (Bejan, 1988; Tsatsaronis, 1993). Tais técnicas incluíam índices que facilitavam a identificação dos componentes responsáveis pelas maiores parcelas da geração de irreversibilidade total, em sistemas multicomponentes (Kotas, 1985). Ainda que sua ampla utilização represente um sinal do sucesso obtido, Lozano e Valero (1993a) apontam três importantes fatores por elas desconsiderados: (i) nem toda irreversibilidade pode ser evitada e portanto as possibilidades técnicas de redução das mesmas são sempre menores que os limites teóricos; (ii) as reduções locais na destruição da exergia não são equivalentes, logo reduções da irreversibilidade local em diferentes unidades de um sistema em geral acarretam diferentes variações na eficiência total do sistema; e (iii) as oportunidades de economia só podem ser especificadas através de um estudo mais detalhado dos mecanismos fundamentais da geração da entropia, sendo ainda necessário relacionar estes mecanismos às variáveis livres de projeto e aos custos dos investimentos necessários.

A percepção destas falhas levou ao surgimento de metodologias que relacionam a geração de irreversibilidade em um equipamento isolado com o restante dos equipamentos do sistema, através da definição do conceito de *custo exergético*. Concomitantemente, conjugam-se as análises termodinâmica e econômica, relacionando-se o custo monetário e o custo exergético, em um conjunto de metodologias às quais se denomina Termoeconomia.

A história moderna da Termoeconomia começa no final da década de 1950, com os trabalhos pioneiros de M. Tribus e R. B. Evans, da Universidade da Califórnia em Los Angeles (EUA), e de R. A. Gaggioli e de E. F. Obert, da Universidade de Wisconsin em

Madison (EUA). Em 1970, um trabalho de Y. M. El-Sayed (então professor da Universidade Assiut, no Egito) e R. B. Evans constituiu-se na primeira formulação matematicamente rigorosa da Termoeconomia.

As décadas de 1980 e 1990 representam um período de florescimento da área, com o desenvolvimento e a aplicação de metodologias termoeconômicas à análise, projeto e otimização de sistemas térmicos. Nesta fase, destacam-se os trabalhos de A. Valero e M. A. Lozano, na Universidade de Saragoça (Espanha), G. Tsatsaronis, na Universidade do Tennessee (EUA) e posteriormente na Universidade Tecnológica de Berlim (Alemanha), C. A. Frangopoulos na Universidade Nacional Técnica de Atenas (Grécia) e M. R. von Spakovsky na Escola Politécnica Federal de Lausanne (Suíça) e posteriormente no Instituto Politécnico de Virginia (EUA). Estes pesquisadores foram autores dos trabalhos publicados, em 1994, em um número especial da revista *Energy*, integralmente dedicado à Termoeconomia. Neste, um problema de cogeração empregando uma turbina a gás regenerativa com caldeira de recuperação é definido. A esse sistema, denominado CGAM, a partir das iniciais dos nomes dos principais autores (Christos Frangopoulos, George Tsatsaronis, Antonio Valero e Michael von Spakovsky), aplicam-se as quatro metodologias. Embora esses artigos tenham sido escritos com a intenção de permitir a comparação das metodologias, a leitura dos mesmos revela-se frustrante devido a diferenças nas condições de aplicação. Dessa frustração originou-se o presente trabalho, em que se pretende realizar uma análise comparativa das principais metodologias de análise termoeconômica, a partir de sua aplicação a um sistema de cogeração semelhante ao CGAM.

Talvez o primeiro obstáculo com o qual se depare aquele que se dedica ao estudo da Termoeconomia seja a definição precisa do objeto de estudo. Divergências entre enfoques, surgidos já no início de sua curta história, se refletem nas definições fornecidas por alguns dos principais pesquisadores.

Termoeconomia pretende ser uma técnica que combine a análise termodinâmica e a otimização econômica de sistemas térmicos complexos tais como centrais termoelétricas, instalações frigoríficas e instalações de dessalinização (El-Sayed e Evans, 1970)

Termoeconomia é o ramo da engenharia que combina a análise exérgica e princípios econômicos visando prover ao projetista ou operador de sistemas

informação não disponível através das análises termodinâmica e econômica convencionais mas cruciais para o projeto e operação econômica de um sistema (Bejan *et al.*, 1996)

Pode-se então definir uma vertente para a qual a otimização ¹ é parte integrante e fundamental da Termoeconomia. A utilização da exergia como *commodity* se justifica neste caso pela possibilidade de dividir instalações complexas em partes que podem ser otimizadas separadamente. Também pertence a esta vertente a preocupação com a determinação dos custos *sombra* dos produtos internos dos diversos componentes da instalação e dos custos marginais dos produtos.

A segunda vertente centra-se na alocação dos custos médios dos produtos, externos e internos, dos componentes do sistema. A alocação dos custos deve satisfazer um ou mais dos seguintes objetivos (DeGarmo *et al.*, 1989): (a) a determinação dos custos reais dos produtos e serviços, (b) prover bases racionais para a fixação dos preços dos produtos ou serviços, (c) prover meios para o controle de gastos e (d) prover informações a partir das quais decisões operacionais possam ser baseadas e avaliadas. Decisões operacionais que envolvam a variação na produção de produtos ou serviços devem entretanto ser efetuadas utilizando os custos marginais, a não ser nos casos especiais em que estes são próximos aos custos médios.

Embora restrita aos meios acadêmicos, a Termoeconomia tem sido aplicada a problemas práticos, como centrais de cogeração de refinaria (Frangopoulos *et al.*, 1996), de polo petroquímico (Torres e Nebra, 1997), de usinas de açúcar e álcool (Robles Vertiola e Oliveira Júnior, 1995; Barreda del Campo *et al.*, 1998) e de indústria de celulose (Luz Silveira e Horta Nogueira, 1992). Sistemas avançados de geração de energia tem sido estudados, como a análise de sistemas integrados de gasificação de carvão (Tsatsaronis *et al.*, 1994b,a) e de biomassa (Walter e Llagostera, 1995) e de sistemas empregando combustão em leito fluidizado (Schwarz *et al.*, 1997). Análises termoeconômicas de sistemas de cogeração empregando turbinas a gás foram apresentadas (Guarinello *et al.*, 1998). Análises de ciclos de turbinas a gás úmidas (Gallo, 1997) também têm sido realizadas, empregando diferentes metodologias (Krause e Tsatsaronis, 1997; Gallo *et al.*, 1997). Não apenas análises

¹Aqui entendida no sentido estrito do conjunto de metodologias matemáticas que visam a determinação do ótimo, ponto que maximiza/minimiza uma função objetivo submetida a restrições.

voltadas para projeto, mas também para a operação e manutenção de sistemas têm sido propostas. Trabalhos voltados para a monitoração *on-line* da operação (Valero *et al.*, 1996) e a manutenção (Carvalho e Horta Nogueira, 1996) de centrais de geração de potência são exemplos. Das poucas aplicações em outras indústrias, pode-se citar o estudo comparativo de processos de produção de cimento (Silva e Nebra, 1996).

As metodologias enquadradas na primeira vertente, aqui designada *Estrutural*, são apresentadas no Capítulo 1. São elas a Otimização Termoeconômica (El-Sayed e Evans, 1970) e a Análise Funcional Termoeconômica (Frangopoulos, 1983).

No Capítulo 2 trata-se das metodologias da segunda vertente, aqui designada *Exergoeconômica*. A contribuição dada por Reistad e Gaggioli (1980) é abordada em primeiro lugar, seguida pela Teoria do Custo Exergético (Lozano e Valero, 1993a), pela Exergoeconomia (Tsatsaronis, 1993) e pela Metodologia Estrutural (Lozano *et al.*, 1996).

No Capítulo 3, um modelo de central de cogeração com turbina a gás regenerativa é proposto. Ao modelo termodinâmico adiciona-se um modelo econômico, permitindo que o problema seja otimizado objetivando a minimização do custo exergético médio dos produtos.

No Capítulo 4, entre as metodologias apresentadas nos Capítulos 1 e 2, a Análise Funcional Termoeconômica, a Teoria do Custo Exergético, a Exergoeconomia e a Metodologia Estrutural são aplicadas à condição de ótimo determinada. São também propostas e aplicadas variações sobre a Teoria do Custo Exergético.

Os resultados da aplicação das metodologias ao problema de cogeração são apresentados e analisados no Capítulo 5. Estuda-se a influência da divisão da exergia em parcelas térmica e mecânica para a determinação dos custos dos produtos do sistema, calor e potência. Através da explicitação das estruturas produtivas utilizadas nas metodologias exergoeconômicas, cuja visualização é possibilitada pela construção de diagramas estruturais, busca-se revelar a unidade subjacente das duas vertentes da análise termoeconômica. Os diferentes tratamentos dados aos custos das irreversibilidades externas, advindas da saída para o ambiente de correntes portadoras de exergia, revelam-se essenciais para esclarecer os diferentes custos dos produtos do sistema, obtidos pela aplicação das diversas metodologias.

Na conclusão, apresentada no Capítulo 6, apresentam-se recomendações para uma aplicação mais adequada das metodologias termoeconômicas e sugerem-se encaminhamentos para o aprofundamento da análise comparativa aqui realizada.

Capítulo 1

Metodologias Estruturais

El-Sayed e Evans (1970) definem a termoeconomia como “uma técnica que combina a análise termodinâmica e a otimização econômica de sistemas térmicos complexos tais como centrais termoelétricas, instalações frigoríficas e instalações de dessalinização”. Uma importante vertente termoeconômica se desenvolveu em torno desta definição. Neste capítulo, as metodologias enquadradas nesta vertente são apresentadas.

1.1 A Otimização Termoeconômica

Os diversos componentes de sistemas térmicos complexos, tais como centrais de geração elétrica a vapor, operam de maneira acoplada, isto é, variações nas condições operacionais de um componente influenciam todos os demais. Por exemplo, a variação da pressão da água de alimentação da caldeira influenciará a eficiência tanto da caldeira quanto da turbina. Portanto, a definição de um sistema ótimo somente pode ser feita otimizando matematicamente um modelo que represente todo o sistema, que será tanto mais complexo quanto maior for a precisão desejada na otimização.

Em um trabalho pioneiro, El-Sayed e Evans (1970) introduzem o conceito de decomposição matemática de sistemas térmicos complexos, objetivando permitir a otimização do sistema completo pela otimização de suas unidades. Estas unidades correspondem a volumes de controle, englobando um ou mais componentes do sistema. Para cada uma das

unidades são válidos, assim como para o sistema completo, os balanços de custo dos fluxos termodinâmicos e dos gastos de capital.

Os fluxos (insumos e produtos) que relacionam as diversas unidades do sistema e o sistema e o ambiente são sintetizados pelas suas exergias. A utilização da exergia é justificada pela necessidade de se comparar em bases iguais os diferentes fluxos (vapor de alta pressão, água de alimentação, potência mecânica, etc.). Pelo mesmo motivo, define-se o custo exergoeconômico unitário médio como a razão entre o custo total dos produtos e a soma de suas exergias, contabilizados os custos dos energéticos, da amortização do capital e os demais custos associados (manutenção, operação, etc.).

$$c = \frac{C_T}{\sum_o \dot{E}_o} = \frac{\sum_i c_{ei} \dot{E}_i + \sum_n \dot{Z}_n}{\sum_o \dot{E}_o} \quad (1.1)$$

Tendo em vista a importância dos resultados obtidos, reproduz-se a seguir o procedimento matemático desenvolvido pelos autores, tomando como base uma estrutura produtiva com n unidades em série (ver figura 1.1). A função objetivo do problema de otimização, em sua forma geral, é a minimização do custo exergoeconômico unitário médio dos produtos.

$$\min_{\mathbf{X}} c = \frac{C_T}{\sum_p \dot{E}_o} \quad (1.2)$$

No exemplo estudado, considera-se fixa a demanda pelo produto único, reduzindo-se a função objetivo à minimização dos custos totais:

$$\min_{\mathbf{X}} \dot{C}_T = \sum_i c_{ei} \dot{E}_i + \sum_n \dot{Z}_n \quad (1.3)$$

O conjunto \mathbf{X} de variáveis independentes (de decisão) do sistema é dividido em n subconjuntos \mathbf{X}_i , correspondendo às n unidades em que é dividido o sistema. Para cada uma das unidades expressa-se a demanda por insumos \dot{E}_i e capital (incluindo aqui os demais custos) \dot{Z}_i em termos das variáveis independentes locais e do produto. Assim,

$$\dot{E}_i = \epsilon_i(\dot{E}_{i+1}, \mathbf{X}_i) \quad (1.4)$$

e

$$\dot{Z}_i = z_i(\dot{E}_{i+1}, \mathbf{X}_i) \quad (1.5)$$

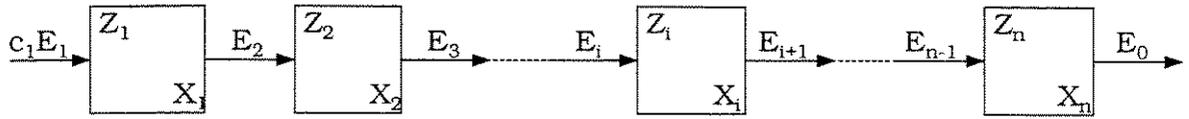


Figura 1.1: Sistema de n unidades em série

A condição de demanda fixa pelo produto final é imposta pela seguinte equação:

$$E_n = E_o \quad (1.6)$$

O Lagrangiano do problema de otimização, necessário para a determinação do ótimo utilizando o método dos Multiplicadores de Lagrange, é apresentado abaixo.

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & c_1 E_1 + z_1(\dot{E}_2, \mathbf{X}_1) + z_2(\dot{E}_3, \mathbf{X}_2) + z_3(\dot{E}_4, \mathbf{X}_3) + \lambda_1 [\epsilon_1(\dot{E}_2, \mathbf{X}_1) - E_1] + \\ & + \lambda_2 [\epsilon_2(\dot{E}_3, \mathbf{X}_2) - E_2] + \lambda_3 [\epsilon_3(\dot{E}_4, \mathbf{X}_3) - E_3] + \lambda_4 (E_4 - E_o) \end{aligned} \quad (1.7)$$

As condições necessárias de otimalidade requerem que as derivadas do Lagrangiano em relação às variáveis sejam nulas (Luenberger, 1984), ou seja,

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = 0 \quad (1.8a)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{X}} = 0 \quad (1.8b)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{E}} = 0 \quad (1.8c)$$

O conjunto de equações representado pela equação 1.8a reproduz as restrições do problema original. A equação 1.8b define um conjunto de equações na forma abaixo

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{X}_i} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{X}_i} (z_i + \lambda_i \dot{E}_i) = 0 \quad (1.9)$$

A equação 1.8c leva, para $i = 1$, a

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{E}_i} = \frac{\partial}{\partial \dot{E}_i} (c_1 \dot{E}_1 - \lambda_1 \dot{E}_1) = 0, \text{ i.e., } \lambda_1 = c_1 \quad (1.10)$$

e, para $i > 1$, a

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{E}_i} = \frac{\partial}{\partial \dot{E}_i} (z_{i-1} + \lambda_{i-1} \dot{E}_{i-1} - \lambda_i \dot{E}_i) = 0, \text{ i.e., } \lambda_i = \frac{\partial}{\partial \dot{E}_i} (z_{i-1} + \lambda_{i-1} \dot{E}_{i-1}) \quad (1.11)$$

As equações definidas por 1.9 representam funções objetivo locais, dependentes dos custos marginais internos determinados pelas equações 1.10 e 1.11. Os autores denominam *economia interna* do sistema à definida por estes custos (marginais), cuja determinação requer a definição do modelo do sistema. Analogamente, há uma *economia externa* do sistema, cujos custos (médios) podem ser determinados de forma simples, sem o conhecimento do funcionamento interno (como em um sistema econômico qualquer, com lucros nulos).

Um importante resultado é obtido considerando o caso especial em que as variáveis independentes de cada unidade são suas eficiências exérgicas, isto é,

$$\mathbf{X}_i = \{\eta_i\} \quad (1.12)$$

e em que os custos variam linearmente com o produto

$$\dot{Z}_i = z_i(\dot{E}_{i+1}, \mathbf{X}_i) = \dot{E}_{i+1} z_i(\eta_i). \quad (1.13)$$

Introduzindo-se as equações anteriores nas equações 1.10 e 1.11 e utilizando a definição de eficiência exérgica

$$\eta_i = \frac{\dot{E}_{i+1}}{\dot{E}_i}, \quad (1.14)$$

os seguintes resultados são obtidos:

$$\lambda_1 = c_1 \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned}
\lambda_i &= \frac{\partial}{\partial \dot{E}_i} \left(\dot{E} z_{i-1}(\eta_{i-1}) + \lambda_{i-1} \dot{E}_{i-1} \right) = \\
&= z_{i-1}(\eta_{i-1}) + \lambda_{i-1} \frac{\partial \dot{E}_{i-1}}{\partial \dot{E}_i} = \\
&= z_{i-1}(\eta_{i-1}) + \frac{\lambda_{i-1}}{\eta_{i-1}} = \\
&= \frac{\dot{E}_{i-1} z_{i-1}(\eta_{i-1}) + \lambda_{i-1} \dot{E}_{i-1}}{\dot{E}_i} = \\
&= \frac{Z_{i-1} + \lambda_{i-1} \dot{E}_{i-1}}{\dot{E}_i} \tag{1.16}
\end{aligned}$$

Neste caso os custos marginais são iguais aos médios e as economias *interna* e *externa* se confundem.

1.2 Análise Funcional Termoeconômica

Uma evolução da otimização termoeconômica desenvolvida por Tribus, Evans e El-Sayed, a Análise Funcional Termoeconômica (Frangopoulos, 1983, 1987) apresenta duas importantes contribuições. Em primeiro lugar, estende a decomposição do sistema (El-Sayed e Evans, 1970) ao definir a Análise Funcional de sistemas térmicos. Em segundo lugar, aplica o método dos Multiplicadores de Lagrange a sistemas térmicos complexos.

Na Análise Funcional uma instalação térmica complexa é entendida como um sistema composto por unidades interrelacionadas. Cada unidade tem uma única função (ou produto) que determina sua relação com as demais unidades e com o ambiente. As unidades podem representar equipamentos, conjunto de equipamentos ou ainda ser virtuais. Dois tipos especiais de unidades virtuais são definidas: as *junções*, em que se agrupam os produtos de duas ou mais unidades, e as *ramificações*, em que o produto de uma unidade é distribuído a outras unidades. Unidades virtuais são utilizadas quando diferentes unidades fornecem (consomem) um mesmo recurso, tal como ocorre quando vários geradores de vapor são utilizados para fornecer exergia térmica para uma central elétrica, ou quando os componentes de um único gerador são tomados individualmente (economizadores, evaporador, superaquecedores).

Os produtos podem representar correntes (materiais ou não) mas podem também representar encargos devidos a serviços como, por exemplo, a dessulfurização dos gases de combustão de uma caldeira.

A representação gráfica do sistema, elaborada a partir das regras da análise funcional, é denominada “diagrama funcional”. Neste diagrama as unidades são representadas por figuras geométricas (em geral quadrados) conectadas por linhas que representam os produtos, com setas indicando sua direção (ver figuras 1.2 e 1.3).

Uma primeira análise é feita considerando a função objetivo mais ampla, correspondente à minimização dos custos totais.

$$\min \dot{C}_T = \sum_{r=1}^{\sigma} \dot{Z}_r + \sum_{k=1}^{l_o+m_o} \dot{C}_{o,k} \quad (1.17)$$

onde σ é o número de unidades reais, l_o é o número de insumos oriundos do ambiente, m_o é o

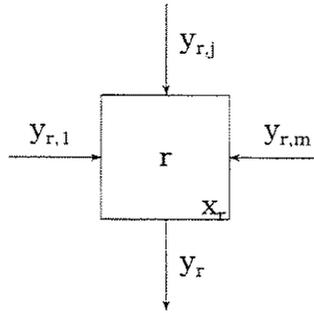


Figura 1.2: Unidade no diagrama funcional

número de produtos supridos pelo sistema ao ambiente, \dot{C}_T é o custo de aquisição e operação do sistema (\$/s), \dot{Z}_r é o custo de amortização, incluindo custos fixos (depreciação, impostos) e manutenção e $\dot{C}_{o.k}$ é o preço dos produtos $C_{o.k}$ que, para $1 \leq k \leq l_o$, corresponde ao custo dos insumos comprados ao ambiente e, para $l_o \leq k \leq l_o + m_o$, corresponde à receita obtida na venda dos produtos do sistema. O primeiro termo da equação (1.17) representa portanto o custo total das unidades reais (unidades virtuais têm custo nulo) e o segundo termo o balanço entre o custo dos insumos adquiridos e a receita dos produtos vendidos.

Assim como na otimização termoeconômica, estabelecem-se as funções matemáticas que permitem a determinação numérica das variáveis acima definidas.

$$\dot{Z}_r = Z_r(\mathbf{x}_r, y_r) \quad (1.18a)$$

$$\dot{C}_{o.k} = C_{o.k}(y_{o.k}) \quad (1.18b)$$

$$\dot{C}_T = C_T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (1.18c)$$

onde \mathbf{x}_r é o conjunto das variáveis de decisão correspondentes à unidade (real) r , y_r é o produto da unidade r , $y_{o.k}$ representa o insumo provido pelo ambiente à unidade, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_r, \dots, \mathbf{x}_\sigma)$ é o vetor das variáveis independentes e \mathbf{y} o vetor que contém todas as relações entre as unidades e entre o sistema e o ambiente.

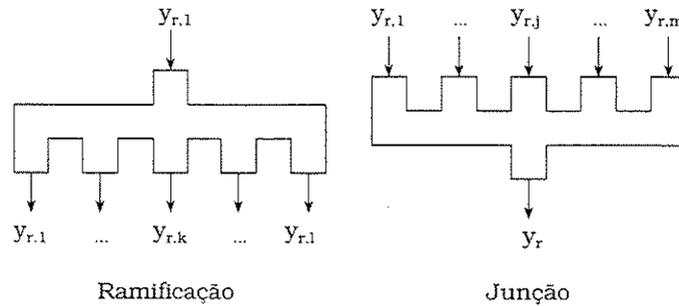


Figura 1.3: Ramificação e junção no diagrama funcional

A função objetivo (equação 1.17) toma então a forma

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \dot{C}_T = \sum_{r=1}^{\sigma} \dot{Z}_r(\mathbf{x}_r, \mathbf{y}_r) + \sum_{k=1}^{l_o+m_o} \dot{C}_{o.k}(y_{o.k}) \quad (1.19)$$

O autor utiliza somente restrições de igualdade na forma básica da Análise Funcional, visando manter a simplicidade, embora ressalte que a introdução de restrições de desigualdade não alteraria os princípios básicos do método. As restrições são:

$$y_{r,j} = Y_{r,j}(\mathbf{x}_r, \mathbf{y}_r) = Y_{r,j} \quad \begin{cases} r = 0, 1, \dots, \omega \\ j = 1, 1, \dots, m_r \end{cases} \quad (1.20)$$

$$y_{r'.k} = y_{r,j} \quad \begin{cases} r', r = 0, 1, \dots, \omega \\ k = 1, 2, \dots, l_r \\ j = 1, 1, \dots, m_r \end{cases}, \quad (1.21)$$

onde ω é o número total de unidades reais e virtuais no sistema, m_r é o número de insumos requeridos pela unidade e l_r o número de produtos fornecidos pela unidade. As restrições (equações 1.20) fornecem os insumos requeridos pela unidade r como função das variáveis

independentes locais e do produto da unidade. As restrições 1.21 impõem a igualdade entre os produtos fornecidos pela unidade r' para a unidade r e os insumos requeridos por esta última. Representam assim as interconexões entre as diversas unidades do sistema.

O problema de otimização é resolvido através do método dos Multiplicadores de Lagrange, para o que se determina o Lagrangiano:

$$\mathcal{L} = \sum_{r=1}^{\sigma} \dot{Z}_r + \sum_{k=1}^{l_o+m_o} \dot{C}_{o.k} + \sum_{r=0}^{\omega} \sum_{j=1}^{m_r} \lambda_{r,j} (Y_{r,j} - y_{r,j}) + \sum_{r'=0}^{\omega} \sum_{k=1}^{l_{r'}} \lambda_{r'.k} (y_{r,j} - y_{r'.k}) \quad (1.22)$$

As condições necessárias de otimalidade são

$$\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) = \mathbf{0}, \quad (1.23a)$$

$$\nabla_{\mathbf{y}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) = \mathbf{0}, \quad (1.23b)$$

$$\nabla_{\lambda} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \lambda) = \mathbf{0}. \quad (1.23c)$$

A introdução das condições de otimalidade (eq. 1.23a) permite que, após alguma manipulação matemática, o Lagrangiano possa ser expresso na forma abaixo.

$$\mathcal{L} = \sum_{r=1}^{\omega} \left(\dot{C}_r - \sum_{k=1}^{l_r} \lambda_{r.k} y_{r.k} \right) + \sum_{k=1}^{l_o+m_o} \left(\dot{C}_{o.k} - \lambda_{o.k} y_{o.k} \right) \quad (1.24)$$

onde

$$\dot{C}_r = \dot{Z}_r + \sum_{j=1}^{m_r} \lambda_{r,j} Y_{r,j} \quad (1.25)$$

O custo C_r determinado pela equação (1.25) corresponde à soma dos custos de amortização e manutenção e dos custos relativos à aquisição de insumos da unidade r . Desta forma, o primeiro termo da equação (1.24) representa o somatório dos balanços entre os custos e as receitas obtidas por cada unidade, real ou virtual, e o segundo termo o somatório dos custos dos insumos externos adquiridos pelo sistema.

O conjunto de equações derivadas da aplicação das condições necessárias de otimalidade (eq. 1.23a) ao Lagrangiano na forma da equação (1.24) é utilizado para a solução do pro-

blema de otimização. As condições expressas pela equação 1.23c reproduzem as restrições de igualdade e das condições expressas nas equações (1.23a) e (1.23c) obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x_{ri}} \left(\sum_{r=1}^{\sigma} \dot{C}_r \right) = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} r = 1, 2, \dots, \sigma \\ i = 1, 2, \dots, n_r \end{array} \right. , \quad (1.26)$$

onde n_r é o número de variáveis independentes no vetor \mathbf{x}_r ,

$$\frac{\partial \dot{C}_{o,k}}{\partial y_{o,k}} - \lambda_{o,k} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, l_o + m_o, \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial \dot{C}_r}{\partial y_{r,k}} - \lambda_{r,k} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} r = 1, 2, \dots, \omega \\ k = 1, 2, \dots, l_r \end{array} \right. . \quad (1.28)$$

A interpretação econômica dos multiplicadores de Lagrange, como custos marginais dos produtos correspondentes, é apontada pelas equações (1.27) e (1.28).

As unidades virtuais representam um caso particular, visto que o custo de capital é nulo e que existem variáveis independentes a elas associadas. Para as *junções*, unidades virtuais em que se agrupam os produtos de duas ou mais unidades, o custo do produto é expresso por:

$$\dot{C}_r = \sum_{j=1}^{m_r} \lambda_{r,j} Y_{r,j} \quad r = \sigma + 1, \sigma + 2, \dots, \tau, \quad (1.29)$$

onde τ é o número de unidades e junções do sistema. Como as junções não tem variáveis independentes, as restrições (1.20)

$$y_{r,j} = Y_{r,j} \quad (1.20)$$

devem ser vistas como identidades, e não como a aplicação de funções determinando valores de variáveis. A única restrição real a ser atendida é a de que a soma dos insumos consumidos pela junção seja igual ao produto por ela fornecido (ver figura 1.3).

$$y_{r,1} + y_{r,2} + \dots + y_{r,m_r} = y_r. \quad (1.30)$$

Assim sendo, o multiplicador de Lagrange associado ao produto de junções não pode ser determinado pela equação (1.28). Por outro lado, sendo unidades virtuais, sem variáveis

independentes a elas associadas, as junções não afetam o resultado da otimização desde que os termos associados a sua existência na equação (1.24) sejam nulos a todo momento. Uma expressão que atende a esta demanda e será então utilizada neste caso é a do custo médio.

$$\lambda_r = \frac{\dot{C}_r}{y_r} \quad (1.31)$$

Para as *ramificações*, unidades em que o produto de uma unidade é distribuído a outras unidades, um resultado semelhante pode ser obtido, embora de forma diferente. O custo do produto é dado por

$$\dot{C}_r = \lambda_{r,1} Y_{r,1} \quad r = \tau + 1, \tau + 2, \dots, \omega \quad (1.32)$$

Como para as junções, são válidas ainda as restrições (1.20) e a consideração de que todo o insumo suprido a uma ramificação é por ela fornecido a outras unidades (ver figura 1.3).

$$y_{r,1} = y_{r,1} + y_{r,2} + \dots + y_{r,l_r}. \quad (1.33)$$

Combinando as três equações anteriores, encontra-se

$$\dot{C}_r = \lambda_{r,1} (y_{r,1} + y_{r,2} + \dots + y_{r,l_r}). \quad (1.34)$$

Substituindo a expressão anterior na equação (1.28), resultante da aplicação das condições de otimalidade, encontra-se a seguinte expressão, que é utilizada para determinar o custo dos produtos de ramificações.

$$\lambda_{r,k} = \lambda_{r,1} \begin{cases} r = \tau + 1, \tau + 2, \dots, \omega \\ k = 1, 2, \dots, l_r \end{cases} \quad (1.35)$$

1.2.1 Otimização para Demanda Fixa

A metodologia até aqui apresentada é utilizada quando são conhecidos os preços dos produtos do sistema e se deseja determinar a quantidade a ser produzida. Algumas adequações

são necessárias se, pelo contrário, os preços são desconhecidos, mas é conhecida a demanda pelos produtos.

$$y_{o.k} = \hat{y}_{o,j} \quad (k = l_o + j, \quad j = 1, 2, \dots, m_o) \quad (1.36)$$

Neste caso, a função objetivo corresponde à minimização dos custos totais do sistema e toma a forma seguinte:

$$\min \dot{C}_T = \sum_{r=1}^{\sigma} \dot{Z}_r + \sum_{k=1}^{l_o} \dot{C}_{o.k}. \quad (1.37)$$

Diferentemente do caso anterior (equação 1.17) o segundo termo representa apenas o somatório dos custos dos insumos adquiridos pelo sistema. O Lagrangiano, neste caso, se torna:

$$\mathcal{L} = \sum_{r=1}^{\omega} \left(\dot{C}_r - \sum_{k=1}^{l_r} \lambda_{r.k} y_{r'.k} \right) + \sum_{k=1}^{l_o} \left(\dot{C}_{o.k} - \lambda_{o.k} y_{o.k} \right) + \sum_{j=1}^{m_o} \lambda_{o.j} \hat{y}_{o.j} \quad (1.38)$$

Também aqui, assim como no caso anterior, o primeiro termo da equação (1.38) representa o somatório dos balanços entre os custos e as receitas obtidas por cada unidade, real ou virtual. O segundo termo representa apenas o somatório dos custos dos insumos externos adquiridos pelo sistema e o terceiro o dos produtos fornecidos pelo sistema ao ambiente. O procedimento de solução é o mesmo do caso anterior.

1.2.2 Atribuição de Custos

A estrutura funcional permite também distribuir os custos às unidades e aos produtos finais do sistema. Para cada unidade, pode-se escrever um balanço de custos na forma seguinte:

$$\dot{Z}_r + \sum_{r'=0}^R c_{r'} y_{r',r} = c_r y_r \quad (1.39)$$

O sistema de equações é determinado e pode ser resolvido para os custos unitários c_r .

1.2.3 Análise Funcional de Engenharia

Um desenvolvimento posterior, a Análise Funcional de Engenharia (von Spakovsky e Evans, 1990a,b), apresenta como contribuição maior o estudo das condições de desacoplamento do sistema (isolamento termoeconômico), nas quais a otimização em separado das unidades constitutivas conduz à otimização global. Na determinação da estrutura funcional e dos custos marginais e médios dos produtos, assemelha-se bastante à Análise Funcional Termoeconômica.

Capítulo 2

Metodologias Exergoeconômicas

Uma série de metodologias foi desenvolvida com o objetivo primário de permitir uma forma racional de alocação de custos em sistemas térmicos. Segundo Reistad e Gaggioli (1980), Keenan (1932) foi o primeiro a estabelecer que a alocação de custos devia ser baseada na *energia disponível (exergia)* e não na energia. O conceito foi utilizado por Obert, em conjunto com Gaggioli e outros, a quem coube dar continuidade em trabalhos publicados (Gaggioli e Fehring, 1978; Gaggioli e Wepfer, 1978; Wepfer, 1980). Mais recentemente duas importantes metodologias foram propostas, por Tsatsaronis (1993) e por Lozano e Valero (1993a).

2.1 As Alternativas

Em Reistad e Gaggioli (1980) estuda-se o uso da energia e da exergia (por ele designada *energia útil*) na alocação de custos utilizando como exemplo uma central de cogeração com turbina de contrapressão, produzindo vapor de baixa pressão e potência mecânica (ver figura 2.1). Baseados em considerações de ordem econômica, propõem-se não uma mas diversas metodologias, aplicáveis a diferentes propósitos. A central é dividida em dois subsistemas, o gerador de vapor e a turbina de contrapressão, para cada um dos quais é escrito um balanço de custos. O custo do vapor de alta pressão é fixado diretamente pelo

balanço, uma vez que não se considera o custo do condensado.

$$\dot{C}_{AP} = \dot{C}_F + \dot{Z} \quad (2.1)$$

Aqui, \dot{C}_{AP} representa o custo do vapor de alta pressão (\$/s), \dot{C}_F o custo do combustível (\$/s) e \dot{Z} os custos de capital, operação e manutenção. Os custos unitários em base energética (exergética) (\$/kJ) são definidos como a razão entre o custo (\$/s) e fluxo entálpico (exergético) (kW) do fluxo.

$$c^h = \frac{\dot{C}}{\dot{H}} \quad (2.2)$$

$$c^e = \frac{\dot{C}}{\dot{E}} \quad (2.3)$$

Os superscritos h e e indicam o custo em base energética e exergética, respectivamente, \dot{H} o fluxo entálpico e \dot{E} o fluxo exergético. Os custos unitários do vapor de alta pressão podem então ser reescritos:

$$c_{AP}^h = \frac{c_F^h \dot{H}_F}{\dot{H}_{AP}} + \frac{\dot{Z}}{\dot{H}_{AP}} \quad (2.4)$$

$$c_{AP}^e = \frac{c_F^e \dot{E}_F}{\dot{E}_{AP}} + \frac{\dot{Z}}{\dot{E}_{AP}} \quad (2.5)$$

Para a turbina, a equação de balanço somente é insuficiente para determinar os custos dos dois fluxos de saída, a potência gerada e o vapor de baixa pressão. É necessária portanto a definição de critérios racionais para repartição destes custos. Se a energia é utilizada para valorar os fluxos, prática corrente na indústria, o custo específico em base energética do vapor de baixa pressão é igualado ao de alta.

$$c_{AP}^h = c_{BP}^h \quad (2.6)$$

Como a turbina a vapor se aproxima de um sistema adiabático, o vapor de extração tem entalpia ainda elevada. Por isso o custo da potência produzida pela turbina, determinado por este método, é em geral baixo, próximo ao do vapor.

A seguir são apresentadas as opções apontadas para a análise em base exergética, estabelecendo-se as circunstâncias em que seu emprego é recomendado pelos autores.

Método das Extrações Esse método, equivalente ao utilizado na análise em base energética, corresponde a considerar como finalidade única da turbina a geração de potência. Os custos de capital e da irreversibilidade gerada na turbina devem ser imputados a esse produto único, o que corresponde a igualar os custos unitários (em base exergética):

$$c_{AP}^e = c_{BP}^e \quad (2.7)$$

onde o subscrito AP indica o vapor de alta pressão e o subscrito BP indica o vapor de baixa pressão.

Método das Igualdades Considerando que o custo unitário em base exergética do vapor seria aumentado caso uma válvula fosse utilizada para efetuar a expansão da quantidade requerida de vapor de baixa pressão, há situações em que se quer considerar como produto da turbina também o vapor. Nessas situações, os custos de capital e da irreversibilidade devem ser compartilhados pelos dois produtos, e para isso se igualam os seus custos unitários em base exergética.

$$c_W^e = c_{BP}^e \quad (2.8)$$

Método do Trabalho como Subproduto Este método deve ser empregado se a produção do vapor de baixa pressão é considerada a finalidade principal do sistema de cogeração, sendo a produção de potência apenas uma forma de aproveitar eficientemente a necessária redução de pressão de vapor. O custo do vapor nesse método é determinado como se um equipamento alternativo (um gerador de vapor de baixa pressão) fosse utilizado unicamente para gerar o vapor requerido.

$$\begin{aligned} c_{BP} &= \frac{c_F \dot{E}_F}{\dot{E}_{BP}} + \frac{\dot{Z}_{caldBP}}{\dot{E}_{BP}} \\ &= \frac{c_F}{\eta_{BP}} + \frac{\dot{Z}_{caldBP}}{\dot{E}_{BP}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Aqui o custo \dot{Z}_{caldBP} e a eficiência η_{BP} referem-se à caldeira de baixa pressão que substitui o conjunto caldeira de alta pressão/turbina.

O custo determinado por este método para o vapor de baixa pressão é em geral maior que o determinado pelos dois métodos anteriores, em função da menor eficiência exergetica da caldeira de baixa pressão. Não se recomenda seu uso para determinar o custo a ser cobrado pelos usuários de vapor em uma indústria, mas apenas para avaliar a oportunidade da cogeração. Neste caso, o valor determinado para a potência deve ser comparado com o cobrado por fornecedores externos.

Método do Vapor como Subproduto Em algumas situações a potência é considerada o principal produto do sistema e o vapor é apenas um subproduto. Neste caso, o estudo de viabilidade deve considerar o custo específico da potência produzida por um sistema dedicado à produção de potência (ciclo a vapor com turbina de condensação ou turbina a gás) ou da potência comprada (eletricidade da rede mais motor elétrico), ou seja,

$$c_W = c_{W_{cond}}$$

ou

$$c_W = c_{W_{rede}} \tag{2.10}$$

Também se recomenda que este método seja empregado para avaliar a oportunidade de investimentos, sendo o custo do vapor obtido através do balanço de custos. Este custo é em geral menor que o obtido pela aplicação dos métodos da extração e da igualdade.

2.2 A Teoria do Custo Exergetico

A Teoria do Custo Exergetico (TCE), proposta por Lozano e Valero (1993a), utiliza um conjunto de regras (postulados) para construir o sistema de equações utilizado para a determinação dos custos dos fluxos do sistema. Faz uso extensivo das ferramentas de análise de sistemas, em especial a representação matricial.

O primeiro passo para a aplicação da TCE é a definição da *estrutura física* do sistema,

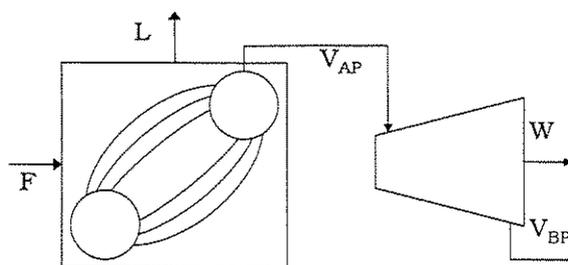


Figura 2.1: Sistema de cogeração com turbina de contrapressão

através de sua divisão em unidades e da relação dos fluxos materiais e/ou energéticos entre as unidades e entre unidades e o ambiente. Especial atenção é dada à definição de um grau adequado de desagregação do sistema, tendo em vista seu impacto na qualidade dos resultados.

O segundo passo constitui-se na definição da *estrutura produtiva*, definindo a função termodinâmica de cada unidade do sistema em consonância com suas definições de eficiência exergética. Especificam-se os fluxos, ou combinação de fluxos, que constituem os produtos (P), os insumos (F) e as perdas (L) de cada unidade, seguindo as seguintes condições.

1. todos os fluxos que se relacionam com uma unidade estarão presentes uma única vez nas definições de P, F e L da unidade;
2. todos os componentes das definições de P, F e L, sejam eles fluxos individuais ou combinação de fluxos, terão exergia positiva ou nula;
3. o balanço de exergia poderá ser determinado por

$$I = F - P - L \quad (2.11)$$

Observa-se ainda que a eficiência exergética de cada unidade será determinada segundo

$$\eta = \frac{P}{F} = 1 - \frac{I}{F} \quad (2.12)$$

A determinação dos custos é feita seguindo as quatro proposições apresentadas a seguir, que utilizam as definições prévias de estrutura física e produtiva. Importante observar que a mesma estrutura é empregada para a determinação tanto do custo exergético, definido como a quantidade de exergia necessária para a produção da exergia de um fluxo, produto ou insumo, quanto do custo exergoeconômico (custo monetário). Este é definido como a soma dos custos da exergia utilizada e dos demais custos associados (capital, operação e manutenção) à produção de um fluxo, produto ou insumo.

(P1) Os custos exergético (\dot{C}_e^e) e exergoeconômico (\dot{C}_s^e) são quantidades conservativas, como consequência de suas definições, e pode-se portanto escrever uma equação de balanço para cada unidade do sistema. Na determinação do custo exergético, o lado direito de cada equação de balanço será igual a zero e, na determinação do custo exergoeconômico, igual aos demais custos associados ao sistema, com o sinal negativo ($-\dot{Z}$).

(P2) Na ausência de informações externas, o custo exergético de um insumo suprido externamente ao sistema é igual à sua exergia ($\dot{C}_{e_i}^e = \dot{E}_i$); o custo exergoeconômico é o custo de aquisição do insumo ($\dot{C}_{s_i}^e = \dot{C}_i$).

(P3) Todos os custos gerados no processo produtivo devem ser incluídos no custo final dos produtos, o que se traduz na atribuição de custo zero a todas as perdas ($\dot{C}_{e_i}^e = \dot{C}_{s_i}^e = 0$).

As proposições 2 e 3 permitem escrever tantas equações quantos forem os fluxos supridos ao sistema e as perdas. Como em geral o número de fluxos é superior à soma do número de sistemas, dos fluxos de entrada e das perdas, as equações obtidas pela aplicação das proposições 1 a 3 não constituem um sistema determinado. As equações adicionais serão obtidas pela aplicação das duas proposições finais.

(P4a) Se uma parcela ou todo o insumo de uma unidade é a variação da exergia de um fluxo que a atravessa, então o custo exergético unitário do fluxo é constante através da unidade.

(P4b) Se o produto de uma unidade é composto por mais de um fluxo, então são iguais os custos exergéticos unitários de cada um destes fluxos.

A Teoria do Custo Exergético não estabelece regras gerais para unidades dissipativas, cujo produto não pode ser definido em termos termodinâmicos. Apenas estabelece que os custos das irreversibilidades associadas a sua operação devem ser cobrados como insumo

para as unidades produtivas.

Para uma dada estrutura produtiva, o sistema de equações definido pela aplicação das proposições acima é único e determinado ¹. Como são equações lineares, é conveniente representar o sistema na forma de matrizes e vetores:

$$\mathbf{MC} = \mathbf{Y} \quad (2.13)$$

A *matriz de custos* \mathbf{M} é constituída por quatro submatrizes, correspondentes às quatro proposições: a *matriz de incidência* (Proposição 1), a *matriz de entradas* (P2), *matriz de perdas* (P3) e a *matriz de bifurcações* (P4). Associados a estas submatrizes estão os quatro subvetores em que se divide o *vetor de valoração externa* \mathbf{Y} , correspondente ao lado direito das equações.

A *matriz de incidência* $\mathbf{A}_{n \times m}$, com número (n) de linhas igual ao número de unidades e número de colunas (m) igual ao de fluxos é construída atribuindo aos elementos (a_{ij}) da matriz, o valor +1 se o fluxo j entra na unidade i , -1 se deixa a unidade e 0 se não se relaciona com ela. Na determinação do custo exergético, o subvetor a ela associado (\mathbf{Y}^A) é o vetor nulo e, na determinação do custo exergoeconômico, cada elemento Y_i^A é igual aos demais custos associados à unidade, com sinal negativo ($-Z_i$).

Os balanços energético e exergético do sistema podem ser realizados se, utilizando as definições da estrutura produtiva P-F-L, forem construídas as matrizes dos produtos \mathbf{A}_P , dos insumos \mathbf{A}_F e das perdas \mathbf{A}_L , tais que

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_P - \mathbf{A}_F - \mathbf{A}_L \quad (2.14)$$

¹Uma demonstração rigorosa da unicidade e determinação do sistema de equações pode ser encontrada em Lozano (1987). Resumidamente, o número de variáveis é igual à soma do número de insumos externos, do número de fluxos internos, do número de perdas e do número de produtos externos. Para que o sistema seja único e determinado, basta que se estabeleça um número igual de equações. As proposições P2 e P3 permitem estabelecer equações em número igual à soma do número de insumos externos e de perdas. A partir da proposição P1 estabelecem-se equações em número igual ao número de unidades; se apenas um fluxo (não perda) deixa cada uma das unidades então esta proposição gera o número necessário de equações, igual à soma do número de fluxos internos e produtos externos. Se existem unidades que têm mais de um fluxo de saída, então são necessárias tantas equações quantas sejam as unidades nesta situação, que podem ser estabelecidas utilizando as proposições P4a e P4b. Um fluxo (não perda) deixando uma unidade pode ser a continuação de um fluxo de entrada ou um produto. Para cada fluxo que dá continuidade a um fluxo de entrada, a proposição P4a permite estabelecer uma equação. Um número de equações igual ao de produtos extras, no caso de múltiplos fluxos-produto, pode ser construído seguindo a proposição P4b. Assim, o número de equações é igual ao de variáveis e o sistema é único e determinado.

e empregando ainda os vetores \mathbf{H} e \mathbf{E} dos fluxos entálpicos (energéticos) e exergéticos, segundo as equações seguintes.

$$\mathbf{F}^h = \mathbf{A}_F \times \mathbf{H} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{P}^h = \mathbf{A}_P \times \mathbf{H} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{L}^h = \mathbf{A}_L \times \mathbf{H} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{A}_F \times \mathbf{E} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_P \times \mathbf{E} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}_L \times \mathbf{E} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} \times \mathbf{E} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{F} - \mathbf{P} = \mathbf{L} + \mathbf{D} \quad (2.22)$$

A *matriz de entradas* (\mathbf{E}) tem tantas linhas quantas forem as entradas do sistema. Em cada linha atribui-se a todos os elementos o valor zero, exceção feita apenas ao elemento correspondente ao fluxo de entrada, ao qual se atribui valor 1. Ao elemento do vetor correspondente (\mathbf{Y}^E) atribui-se, na determinação do custo exergético, valor igual ao fluxo de exergia ($Y^E_i = E_i$), e, na determinação do custo exergoeconômico, valor igual ao custo de aquisição do fluxo, por unidade de tempo ($Y^E_i = C_i$).

Em cada linha i da *matriz de perdas* (\mathbf{L}) atribui-se ao elemento correspondente ao fluxo de perda o valor 1 e aos demais o valor zero. No vetor correspondente (\mathbf{Y}^L) o elemento terá valor zero, independente do custo que se pretenda determinar ($Y^L_i = 0$). O número de linhas da matriz é igual ao de fluxos que se considerem perdas.

As equações suplementares são representadas na *matriz de bifurcações* (\mathbf{B}), que tem número de linhas igual ao necessário para transformar a matriz \mathbf{M} numa matriz quadrada. O vetor correspondente (\mathbf{Y}^{Bf}) tem sempre todos os elementos iguais a zero.

Ao conjunto das três matrizes \mathbf{E} , \mathbf{L} e \mathbf{B} denomina-se *matriz de produção*.

2.3 A Exergoeconomia

A metodologia aqui denominada exergoeconômica foi desenvolvida em uma série de trabalhos publicados por G. Tsatsaronis e seus colaboradores a partir da década de 1980 (Tsatsaronis e Pisa, 1994; Tsatsaronis, 1993; Tsatsaronis *et al.*, 1993; Tsatsaronis e Winhold, 1985a,b; Tsatsaronis *et al.*, 1994a; Krause e Tsatsaronis, 1997; Bejan *et al.*, 1996). Uma evolução da metodologia foi apresentada nos trabalhos mais recentes (Lazzaretto e Tsatsaronis, 1996, 1997).

Tal como as metodologias descritas nas seções anteriores, a metodologia exergoeconômica requer em um primeiro passo a execução das análises termodinâmica e econômica do sistema. Destas análises resultam a identificação e determinação dos fluxos exergéticos, energéticos e materiais e dos custos associados à aquisição e manutenção dos equipamentos. Estas informações são utilizadas para construir balanços de custos para cada unidade.

O segundo passo da metodologia consiste em definir se serão utilizadas correntes de exergia totais ou parciais (térmica, mecânica, química), o que depende basicamente do propósito do estudo. A utilização de correntes de exergia totais leva a uma estrutura produtiva mais simples, enquanto a consideração de correntes parciais, além de ser necessária em certos sistemas, fornece um resultado mais detalhado.

No terceiro passo são estabelecidas as equações auxiliares. Observa-se uma evolução ao longo dos anos da metodologia utilizada pelo autor. A metodologia é apresentada a seguir na forma utilizada na análise do problema CGAM (Tsatsaronis e Pisa, 1994; Tsatsaronis, 1993) duas vertentes metodológicas são abordadas: *custo médio* e *custo específico*.

Ambas as vertentes têm em comum o tratamento dado ao custo dos insumos utilizados e das perdas. Para o primeiro, considera-se simplesmente o custo de aquisição do insumo. Para as perdas, três procedimentos são estabelecidos, de acordo com o objetivo da análise.

1. Cálculo dos custos dos produtos do sistema - o método mais simples é assumir que o custo das perdas é zero. Caso haja a necessidade de tratamento posterior dos efluentes (como na dessulfurização de gases de escape) o custo deste tratamento pode ser cobrado fixando-se o custo do efluente, que será então negativo.
2. Para entender o processo de formação de custos e a distribuição dos custos no siste-



ma - o custo das perdas é calculado normalmente, para ser utilizado como subsídio na escolha de procedimentos de redução de perdas. Este custo deve, ao final do procedimento, ser distribuído aos diversos produtos.

3. Para otimizar o sistema - neste caso o custo das perdas é igualado a zero, exceto quando uma corrente deixa o sistema através de uma unidade. Neste caso o custo da perda deve ser distribuído aos diversos produtos.

Dentre os diversos procedimentos possíveis para distribuir custos de perdas entre os produtos do sistema, dá-se preferência à distribuição proporcional ao conteúdo exergético dos produtos. Na análise do problema CGAM, este procedimento é adotado mesmo para o cálculo dos custos dos produtos.

Algumas definições também comuns às duas vertentes são introduzidas aqui por conveniência. O custo específico em base exergética do insumo, custo pelo qual a exergia é fornecida à unidade, e o custo específico em base exergética do produto da unidade i , custo da exergia cedida pela unidade, são determinados através das expressões seguintes.

$$c_{F_i}^e = \frac{C_{F_i}}{E_{F_i}} \quad (2.23)$$

$$c_{P_i}^e = \frac{C_{P_i}}{E_{P_i}} \quad (2.24)$$

A diferença de custo relativa (r_i) entre os custos do insumo e do produto de uma unidade é utilizada para identificar as origens dos custos adicionados na unidade, que são o custo da irreversibilidade (C_{I_i}) e o custo de investimento (Z_i), que engloba os custos de capital, manutenção e operação dos componentes da unidade.

$$r_i = \frac{c_{P_i}^e - c_{F_i}^e}{c_{F_i}^e} = \frac{Z_i + C_{I_i}}{c_{F_i}^e E_{P_i}}. \quad (2.25)$$

Na determinação do custo da irreversibilidade (C_{I_i}) deve-se utilizar o custo específico do produto, caso o produto da unidade seja fixo, e o custo do insumo, caso este seja estabelecido.

O fator exergoeconômico (f_i) é a razão entre o custo de investimento de um componente e o custo total do componente e expressa a relação entre o custo de investimento e a

diferença de custo relativa de uma unidade. O fator exergoeconômico é utilizado na técnica de aperfeiçoamento de sistemas energéticos delineada na Subseção 2.3.2.

$$f_i = \frac{Z_i}{Z_i + C_{Ii}} \quad (2.26)$$

Com relação à vertente do custo médio, não é estabelecida uma metodologia rigorosa para a definição das equações auxiliares. Estas são diretamente apresentadas, para cada unidade do sistema, levando a resultado análogo ao encontrado pelo método das extrações de Gaggioli (Reistad e Gaggioli, 1980) e pela Teoria do Custo Exergético (Lozano e Valero, 1993a). Por esta razão, evita-se aprofundar aqui o estudo desta vertente, indicando-se a literatura apresentada no início da seção ao interessado.

2.3.1 A Vertente do Custo Específico

A vertente do custo específico (Tsatsaronis, 1993; Tsatsaronis e Pisa, 1994), previamente denominada LIFO (*last in, first out*), baseia-se em princípios de contabilidade e procura acompanhar o processo de formação de custos. Sua denominação original *o último a entrar é o primeiro a sair* resume simplificadaamente a regra fundamental da metodologia. O custo associado ao fornecimento de exergia a uma corrente em uma determinada unidade é preservado enquanto esta corrente passa por outras unidades e recebe exergia adicional, a custo diferenciado. À medida que a corrente cede exergia ao passar pelas unidades seguintes, a exergia fornecida por último é cedida em primeiro lugar. Já o custo desta exergia cedida é o mesmo pelo qual esta foi recebida pela corrente.

Uma situação hipotética, esquematizada na Figura 2.2, é utilizada para ilustrar a metodologia. Uma corrente (ex: de água), inicialmente com exergia e_1 , recebe exergia sequencialmente em duas unidades (ex: bomba e gerador de vapor). Nestas, passa aos estados e_2 e e_3 , ao custo específico, em base exergética, $c_{P_1}^e$ e $c_{P_2}^e$, respectivamente (ver diagrama da figura 2.3). Posteriormente a corrente cede exergia em uma terceira unidade (ex: turbina), a qual deixa com exergia e_4 . Caso a exergia e_4 seja, conforme ilustrado, maior que e_2 e menor que e_3 , toda a exergia fornecida advirá do processo 2 e portanto o custo específico associado ao fornecimento da exergia no processo 3, $(e_3 - e_4)$, será igual a $c_{P_2}^e$. O custo total será igual ao produto da vazão mássica da corrente e do produto $c_{P_2}^e(e_3 - e_4)$ (área

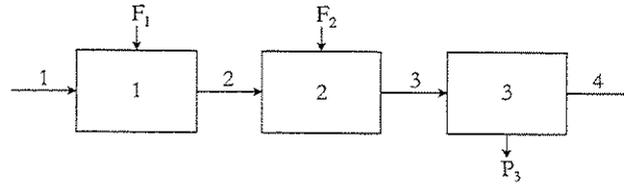


Figura 2.2: Esquema do exemplo para metodologia do custo específico

listrada na figura). Pode-se ainda definir o custo em base mássica da corrente em estado i , c_i^m , como o somatório dos produtos entre o custo da adição da exergia e da exergia adicionada até aquele estado. É característico dessa metodologia a utilização de custo unitário em massa para as correntes físicas. Para facilitar a determinação deste custo é definido o seguinte operador:

$$\langle e_a, e_b, e_c \rangle = \begin{cases} e_b - e_a & \text{se } e_b < e_c \\ e_c - e_a & \text{se } e_a \leq e_c \leq e_b \\ 0 & \text{se } e_c < e_a \end{cases} \quad (2.27)$$

Na utilização deste, os termos e_a e e_b serão em geral utilizados para as exergias dos estados inicial e final de um processo e o termo e_c para a exergia do estado cujo custo se quer determinar. A fórmula geral para o custo, em base mássica, da corrente no exemplo, utilizando o operador, é apresentada a seguir.

$$c_i^m = c_{P1}^e \langle e_1, e_2, e_i \rangle + c_{P2}^e \langle e_2, e_3, e_i \rangle \quad (2.28)$$

Note-se que, como indica o superscrito (e) o custo do fornecimento da exergia ($c_{P_i}^e$) está em base exergética. Assim, a expressão seguinte permite calcular o custo da corrente no estado 3,

$$c_3^m = c_{P1}^e (e_2 - e_1) + c_{P2}^e (e_3 - e_2) \quad (2.29)$$

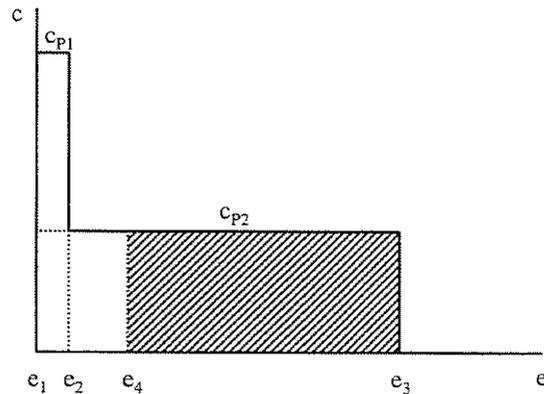


Figura 2.3: Diagrama exemplo para metodologia do custo específico

enquanto o custo da corrente no estado 4 é calculado através da expressão:

$$c_4^m = c_{P1}^e(e_2 - e_1) + c_{P2}^e(e_4 - e_2). \quad (2.30)$$

O custo em base mássica do fornecimento da exergia na terceira unidade será então apenas a diferença entre os custos da corrente nos estados 3 e 4.

Ainda considerando o exemplo, se a exergia e_4 for menor que e_2 , parte da exergia fornecida à terceira unidade terá sido suprida à corrente na primeira unidade. Neste caso, o custo da exergia fornecida será:

$$C_{F3} = m(c_3^m - c_4^m) \quad (2.31)$$

$$= m \{ [c_{P1}^e(e_2 - e_1) + c_{P2}^e(e_3 - e_2)] - [c_{P1}^e(e_4 - e_1)] \} \quad (2.32)$$

$$= m [c_{P1}^e(e_2 - e_4) + c_{P2}^e(e_3 - e_2)] \quad (2.33)$$

Se a exergia total é considerada, é determinado o sistema de equações composto pelas equações de balanço de custo, pela atribuição de custos aos insumos fornecidos ao sistema e pelas equações auxiliares, na forma acima descrita. Caso termos parciais da exergia sejam utilizados na análise, como a parcela associada a um aumento da temperatura, ou da pressão, equações adicionais são necessárias. Estas expressam a relação entre o custo da

variação das parcelas em unidades cujos produtos sejam compostos por variações em mais de uma parcela (em um compressor, por exemplo). Embora não estabeleça procedimento padronizado para estas relações de custos, nos exemplos apresentados os custos específicos são igualados.

2.3.2 Aperfeiçoamento Exergoeconômico de Sistemas

Em geral, o engenheiro não dispõe de informação completa a respeito da instalação que pretende aperfeiçoar. Informações sobre o custo, em especial, são disponíveis em quantidade e maneira limitadas. A otimização de sistemas nessas condições torna-se impossível, restando buscar o aperfeiçoamento do mesmo. Com o objetivo de sistematizar este aperfeiçoamento foi desenvolvida uma técnica que, como extensão da Exergoeconomia, é abaixo descrita de forma sumária. Ressalte-se que, não obstante tenha o caráter de extensão de uma determinada metodologia, a técnica requer resultados que podem ser obtidos por qualquer metodologia de análise termoeconômica de sistemas (Tsatsaronis e Pisa, 1994)

1. Classifique as unidades em ordem decrescente de importância utilizando a soma $Z_i + C_{Ii}$.
2. Considere mudanças de projeto inicialmente para as unidades para as quais o valor da soma é alto.
3. Considere em especial as unidades que tem elevada diferença relativa de custo r_i , ainda mais se o a soma $Z_i + C_{Ii}$ também for elevada.
4. Utilize o fator exergoeconômico f_i para identificar as maiores fontes de custo (de investimento ou de irreversibilidade).
 - (a) Se o valor de f_i é elevado, considere se a redução do capital investido, à custa da redução da eficiência da unidade, proporciona retorno compensatório.
 - (b) Se o valor de f_i é baixo, procure aumentar a eficiência da unidade investindo mais capital.

5. Elimine quaisquer subprocessos que aumentem a destruição ou perda da exergia sem contribuir para a redução do capital investido e/ou dos custos de insumos para outros componentes.
6. Considere aumentar a eficiência exergética de um componente se ele tem uma eficiência relativamente baixa ou relativamente grandes valores da taxa de destruição de exergia, da razão de destruição de exergia ou da razão de perda de exergia.

Um exemplo da aplicação da metodologia a um sistema de cogeração pode ser encontrada em Bejan *et al.* (1996).

2.4 Metodologia Estrutural

Na variante estrutural da Teoria do Custo Exergético (Lozano *et al.*, 1996; Valero *et al.*, 1993; Torres *et al.*, 1996; Lozano *et al.*, 1993) a estrutura produtiva não necessariamente reproduz a estrutura física da instalação. Como reconhecem os autores, em muitos aspectos se assemelha à Análise Funcional Termoeconômica proposta por Frangopoulos (ver Capítulo 1).

A estrutura produtiva na Metodologia Estrutural é composta por unidades reais, sejam produtivas ou dissipativas, (representadas por retângulos e numeradas de 1 a σ), junções (losangos, numeradas de σ a τ) e ramificações (círculos). Toda unidade, seja ela produtiva ou dissipativa, tem necessariamente um produto, podendo ainda ter subprodutos. Todos os produtos (e subprodutos) de unidades são direcionados a ramificações, de onde são distribuídos. Em cada junção, produtos advindos de diferentes unidades são somados resultando num único produto. O número de ramificações (μ) é então igual à soma dos números de unidades (σ), junções (φ) e insumos externos (l_o). A soma dos números de unidades e junções fornece então o número total de produtos internos do sistema cujos custos se quer determinar (τ).

A metodologia faz uso de *coeficientes técnicos de produção*, definidos, para unidades, pelas equações (2.34a) e (2.34b) e, para junções, pelas equações (2.35a) e (2.35b). Os coeficientes técnicos de produção representam a demanda média por um determinado insumo, externo ou interno, para cada unidade de produto.

- Para unidades

$$k_{oej} = \frac{y_{oe.j}}{y_j} \begin{cases} e = 1, 2, \dots, l_o \\ j = 1, 2, \dots, \sigma \end{cases} \quad (2.34a)$$

$$k_{i.j} = \frac{y_{i.j}}{y_j} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, \tau \\ j = 1, 2, \dots, \sigma \end{cases} \quad (2.34b)$$

- Para junções

$$r_{oej} = \frac{y_{oe.j}}{y_j} \begin{cases} e = 1, 2, \dots, l_o \\ j = \sigma + 1, \sigma + 2, \dots, \tau \end{cases} \quad (2.35a)$$

$$r_{i.j} = \frac{y_{i.j}}{y_j} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, \tau \\ j = \sigma + 1, \sigma + 2, \dots, \tau \end{cases} \quad (2.35b)$$

onde y_j representa o produto da unidade j , $y_{oe.j}$ o consumo do insumo externo e na unidade j , e $y_{i.j}$ o consumo do insumo interno i na unidade j . Os coeficientes representam uma normalização dos insumos necessários à operação de uma unidade pelo produto desta unidade. O número total de coeficientes técnicos necessários para descrever a operação do sistema é então $\mu\tau$. A maior parte destes coeficientes é, em geral, igual a zero.

Para as unidades, definem-se ainda coeficientes que incorporam os custos não-exergéticos (capital, operação e manutenção dos componentes).

$$k_j^z = \frac{\dot{Z}_j}{y_j} \quad (j = 1, 2, \dots, \sigma) \quad (2.36)$$

A demanda do sistema pelo insumo externo e é igual à soma da demanda em todas as unidades e junções, e pode ser expressa em termos dos coeficientes técnicos, como mostra a equação 2.37.

$$y_{oe} = \sum_{j=1}^{\sigma} y_{oe.j} + \sum_{j=\sigma+1}^{\tau} y_{oe.j}$$

$$y_{oe} = \sum_{j=1}^{\sigma} k_{oe.j} y_j + \sum_{j=\sigma+1}^{\tau} r_{oe.j} y_j \quad (e = 1, 2, \dots, \varphi) \quad (2.37)$$

As definições dos coeficientes técnicos podem, da mesma forma, ser introduzidas na expressão da demanda pelo produto interno i , que é igual à soma das demandas totais do produto nas unidades e nas junções e da demanda externa (equação 2.38).

$$\begin{aligned}
 y_i &= \sum_{j=1}^{\sigma} y_{i,j} + \sum_{j=\sigma+1}^{\tau} y_{i,j} + y_{i,o} \\
 y_i &= \sum_{j=1}^{\sigma} k_{i,j} y_j + \sum_{j=\sigma+1}^{\tau} r_{i,j} y_j + y_{i,o} \quad (i = 1, 2, \dots, \tau)
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

É possível ainda introduzir as definições dos coeficientes técnicos nas equações de balanço para custos para unidades (equação 2.39) e junções (equação 2.40).

$$\begin{aligned}
 C_j &= \sum_{e=1}^{l_o} c_{oe,j} y_{oe,j} + \sum_{i=1}^{\tau} c_{i,j} y_{i,j} + \zeta Z_j \\
 c_j &= \sum_{e=1}^{l_o} c_{oe,j} k_{oe,j} + \sum_{i=1}^{\tau} c_{i,j} k_{i,j} + k_j^z \quad (j = 1, 2, \dots, \sigma)
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

$$\begin{aligned}
 C_j &= \sum_{e=1}^{l_o} c_{oe,j} y_{oe,j} + \sum_{i=1}^{\tau} c_{i,j} y_{i,j} \\
 c_j &= \sum_{e=1}^{l_o} c_{oe,j} r_{oe,j} + \sum_{i=1}^{\tau} c_{i,j} r_{i,j} \quad (j = \sigma + 1, \sigma + 2, \dots, \tau)
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

Nas equações anteriores, o custo do produto da unidade (ou junção) j é expresso pela soma dos custos totais dos insumos externos e dos produtos internos ali consumidos e do custo de investimento, que é igual a zero para as junções.

As equações anteriores são escritas de forma mais elegante utilizando a notação matricial, para o que são definidos os seguintes vetores.

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{\sigma}, y_{\sigma+1}, \dots, y_{\tau}]^t \tag{2.41a}$$

$$\mathbf{y}_s = [y_{1,o}, y_{2,o}, \dots, y_{\sigma,o}, \dots, y_{\tau,o}]^t \tag{2.41b}$$

$$\mathbf{y}_o = [y_{o1}, y_{o2}, \dots, y_{ol_o}]^t \tag{2.41c}$$

$$\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_\sigma, \dots, c_\tau]^t \quad (2.41d)$$

$$\mathbf{c}_o = [c_{o1}, c_{o2}, \dots, c_{o\iota_o}]^t \quad (2.41e)$$

$$\mathbf{k}^z = [k_1^z, k_2^z, \dots, k_\sigma^z, \underbrace{0, \dots, 0}_\varphi]^t$$

Constroem-se também as matrizes $\mathbf{K}_{\tau \times \sigma}$ e $\mathbf{R}_{\tau \times \varphi}$ cujos elementos são os coeficientes de produção referentes aos insumos internos $k_{i,j}$ e $r_{i,j}$, respectivamente, as quais, compostas, formam a matriz $\mathbf{KR}_{\tau \times \tau}$.

$$\mathbf{KR} = [\mathbf{K} \quad | \quad \mathbf{R}] \quad (2.42)$$

A matriz $\mathbf{KR}_{o\iota_o \times \tau}$ é analogamente constituída pelas matrizes $\mathbf{K}_{o\iota_o \times \sigma}$ e $\mathbf{R}_{\iota_o \times \varphi}$ cujos elementos são os coeficientes de produção referentes aos insumos externos $k_{oi,j}$ e $r_{oi,j}$, respectivamente.

$$\mathbf{KR}_o = [\mathbf{K}_o \quad | \quad \mathbf{R}_o] \quad (2.43)$$

Feitas estas definições, pode-se reescrever o conjunto de equações definido pela equação (2.38)

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_\tau &= \mathbf{KR}_{\tau \times \tau} \mathbf{y}_\tau + \mathbf{y}_{s\tau} \\ \mathbf{y} &= (\mathbf{I} - \mathbf{KR})^{-1} \mathbf{y}_s \end{aligned} \quad (2.44)$$

As equações para os insumos externos, representadas originalmente pela equação (2.37), são também escritas na forma matricial.

$$\mathbf{y}_{o\iota_o} = \mathbf{KR}_{o\iota_o \times \tau} \mathbf{y}_\tau \quad (2.45)$$

Combinando as duas equações anteriores, encontra-se

$$\mathbf{y}_o = \mathbf{KR}_o (\mathbf{I} - \mathbf{KR})^{-1} \mathbf{y}_s \quad (2.46)$$

Finalmente, os custos dos produtos podem ser determinados utilizando a equação seguinte

$$\mathbf{c}_\tau = [\mathbf{KR}_{o\iota_o \times \tau}]^t \mathbf{c}_{o\iota_o} + [\mathbf{KR}_{\tau \times \tau}]^t \mathbf{c}_\tau + \mathbf{k}_{z\tau}$$

$$\mathbf{c} = [\mathbf{I} - [\mathbf{KR}]^t]^{-1} [[\mathbf{KR}_o]^t \mathbf{c}_o + \mathbf{k}_z] \quad (2.47)$$

Capítulo 3

Modelagem e Otimização de um Sistema de Cogeração

A comparação de metodologias termoeconômicas requer a definição de um problema sobre o qual todas possam ser aplicadas. Neste capítulo, modelos termodinâmico e econômico de uma central de cogeração com turbina a gás regenerativa são propostos e otimizados objetivando a minimização do custo exergético médio dos produtos, vapor e potência (Cerqueira e Nebra, 1998).

3.1 Descrição do Sistema

Partindo da experiência do problema CGAM (Valero *et al.*, 1994), foi escolhido um sistema de cogeração consistindo de uma turbina a gás com regeneração e uma caldeira de recuperação (veja figura 3.1). O sistema apresenta complexidade suficiente para destacar as diferenças entre as metodologias ao mesmo tempo em que evita a complexidade excessiva que poderia ocultar essas mesmas diferenças.

Uma vez que o problema é proposto apenas para servir como base para a comparação entre as metodologias, optou-se por uma modelagem termodinâmica simples, considerando um ciclo a ar com propriedades constantes. O modelo econômico utilizado é bastante semelhante ao definido no problema CGAM (Valero *et al.*, 1994), empregando as mesmas

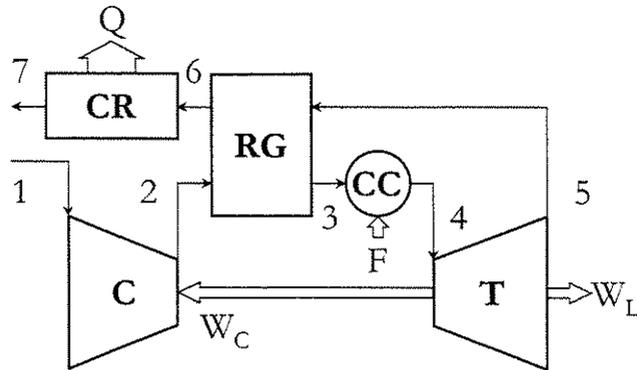


Figura 3.1: Esquema da instalação de cogeração estudada

Tabela 3.1: Dados Termodinâmicos, Propriedades do Ar e Condições Operacionais

T_0	288,15K
P_0	1bar
γ	1,40
c_p	1kJ/kgK
\dot{m}_a	10kg/s
P_v	10bar

equações de custo ali utilizadas com as modificações de Lozano e Valero (1993b). O modelo, englobando os modelos termodinâmico e econômico, é otimizado considerando uma função objetivo em consonância com os trabalhos de El-Sayed e Evans (1970) e Frangopoulos (1983), qual seja a minimização do custo exergético (monetário) médio dos produtos.

3.1.1 O Modelo Termodinâmico

Como se estabeleceu acima, o modelo utilizado considera como fluido de trabalho o ar, com propriedades constantes, definidas na Tabela 3.1. Embora o fluido de trabalho seja o ar, em todo o sistema, usa-se a designação “gases” para o fluido de trabalho a jusante da câmara de combustão. Considera-se que a troca de calor na caldeira de recuperação ocorre, do lado do vapor, a temperatura constante, igual à temperatura de saturação.

As equações seguintes são empregadas para a determinação das propriedades termodinâmicas, entalpia (h), exergia total (e), exergia térmica (e_T) e exergia mecânica (e_M) dos fluxos.

$$e_T = c_p \left[T - T_o - T_o \log \left(\frac{T}{T_o} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$e_M = RT_o \log \left(\frac{P}{P_o} \right) \quad (3.2)$$

$$e = c_p(T - T_o) - T_o \left[c_p \log \left(\frac{T}{T_o} \right) - R \log \left(\frac{P}{P_o} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$h = c_p(T - T_o) \quad (3.4)$$

A neguentropia é definida como entropia negativa. Neste trabalho, assim como em Lozano e Valero (1993b), será utilizada a neguentropia multiplicada pela temperatura do estado morto. Embora a denominação tenha caído em desuso, encontram-se na literatura (Bejan, 1982) referências a esse produto como *anergia*, diferença entre a energia e a exergia de um fluxo. Uma breve discussão acerca do significado físico da neguentropia é apresentada na Subseção 4.2.3, página 54.

$$s = T_o \left[c_p \log \left(\frac{T}{T_o} \right) - R \log \left(\frac{P}{P_o} \right) \right] \quad (3.5)$$

As equações que compõem o modelo são apresentadas a seguir para cada componente do sistema. Naturalmente, o conjunto destas equações não compõe um sistema determinado, uma vez que as dez variáveis consideradas independentes (ver Tabela 3.2) são obtidas na otimização.

Compressor de Ar

$$T_1 = T_o \quad (3.6)$$

$$P_1 = P_o \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.8)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \eta_C \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3.9)$$

$$\dot{W}_C = \dot{m}c_p(T_2 - T_1) \quad (3.10)$$

Regenerador (RG)

$$\varepsilon_{RG} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2} = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_2} \quad (3.11)$$

$$\alpha_{RGa} = \frac{P_3}{P_2} \quad (3.12)$$

$$\alpha_{RGg} = \frac{P_6}{P_5} \quad (3.13)$$

Câmara de Combustão (CC)

$$\dot{F} = \dot{m}c_p(T_4 - T_3) \quad (3.14)$$

$$\alpha_{CC} = \frac{P_4}{P_3} \quad (3.15)$$

Turbina (T)

$$\dot{W}_T = \dot{m}c_p(T_5 - T_4) \quad (3.16)$$

$$\dot{W}_L = \dot{m}c_p [(T_5 - T_4) - (T_2 - T_1)] \quad (3.17)$$

$$\frac{T_5}{T_4} = 1 - \eta_T \left[1 - \left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (3.18)$$

Caldeira de Recuperação (CR)

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_6 - T_7) \quad (3.19)$$

$$\dot{E}_Q = Q \left(1 - \frac{T_o}{T_v} \right) \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_{CR} = \frac{T_7 - T_6}{T_6 - T_v} \quad (3.21)$$

$$T_7 = T_o \quad (3.22)$$

3.1.2 O Modelo Econômico

O objetivo do desenvolvimento de um modelo econômico é permitir o cálculo do custo de aquisição dos componentes do sistema e do custo de operação e manutenção destes mesmos componentes. É também estabelecer valores que descrevam o ambiente econômico e que permitam determinar, a partir das informações anteriores, o custo por unidade de tempo para cada componente e para o sistema como um todo.

Para determinar o custo de aquisição dos componentes, foram utilizadas as equações de custo 3.23 a 3.27). Estas equações são as mesmas utilizadas no problema CGAM (Valero *et al.*, 1994) modificadas por Lozano e Valero (1993b). As equações apresentam em comum uma tendência de elevar ao infinito os custos quando a medida de eficiência da unidade, ou a variação de pressão, tende a um valor determinado, impraticável de fato. O custo de aquisição da câmara de combustão e da turbina de expansão apresenta ainda um crescimento expressivo com o aumento da temperatura de máxima do ciclo.

$$Z_c = 40\dot{m} \frac{\beta \log(\beta)}{0,9 - \eta_c} \quad (3.23)$$

$$Z_{rg} = 370\dot{m} \left(\frac{\varepsilon_{rg}}{1 - \varepsilon_{rg}} \right) (P_2 - P_3)^{-0,38} (P_5 - P_6)^{-0,11} \quad (3.24)$$

$$Z_{cc} = 25\dot{m} \frac{1 + e^{0,018T_4 - 26,4}}{0,995 - \alpha_{cc}} \quad (3.25)$$

$$Z_t = 265\dot{m} \log(\beta) \frac{1 + e^{0,036T_4 - 54,4}}{0,92 - \eta_t} \quad (3.26)$$

$$Z_{cr} = 260\dot{m} \log \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{cr}} \right)^{1,32} (P_6 - P_0)^{0,55} \quad (3.27)$$

Nestas equações, os subscritos *c*, *rg*, *cc*, *t*, e *cr* representam respectivamente o compressor, o regenerador (pré-aquecedor de ar), a câmara de combustão, a turbina e a caldeira de recuperação.

O ambiente econômico considera uma taxa de juros (*i*) de 12% e um período (*n*) de dez anos, implicando em um fator de recuperação de capital (κ), o inverso do fator de

valor presente em série uniforme, de 17,7%, segundo a equação 3.28, abaixo. Aumentos de custos inflacionários e reais são desconsiderados no presente modelo.

$$\kappa = \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]^{-1} \quad (3.28)$$

Os custos de operação e manutenção foram introduzidos através de um fator de O&M (γ) igual a 1,06. Considerou-se um total de 8000 h de operação anual, implicando num tempo anual de operação (τ) igual a $2,88 \times 10^6$ s. O fator de capital, operação e manutenção (ζ) é determinado pela equação 3.29 e resulta igual a $6,51 \times 10^{-9} s^{-1}$.

$$\zeta = \frac{\kappa\gamma}{\tau} \quad (3.29)$$

O fator de capital, operação e manutenção é utilizado para determinar o custo de investimento (\dot{Z})

$$\dot{Z} = \zeta Z \quad (3.30)$$

3.1.3 A Otimização

A função objetivo do problema de otimização foi definida como a minimização do custo médio específico da exergia fornecida pelo sistema nas formas de calor e potência (El-Sayed e Evans, 1970; Frangopoulos, 1983):

$$\min \frac{\dot{Z}_c + \dot{Z}_{rg} + \dot{Z}_{cc} + \dot{Z}_t + \dot{Z}_{cr} + c_f^e \dot{F}}{\dot{E}_q + \dot{W}_L}, \quad (3.31)$$

onde \dot{Z} representa o custo de investimento, c_f^e o custo em base exergética do combustível, \dot{F} o fluxo de exergia associado ao combustível, \dot{E}_q a exergia do fluxo de calor cedido na caldeira de recuperação e \dot{W}_L a potência líquida fornecida pela turbina.

Para determinação do ótimo, o método do gradiente ótimo (Luenberger, 1984) e os modelos termodinâmico e econômico foram implementados em linguagem Pascal. Para a otimização, os modelos foram combinados em uma função das variáveis independentes, permitindo a utilização de método de otimização irrestrita.

Tabela 3.2: Valores das variáveis independentes obtidos pela otimização

Variável	Valor	
β	relação de pressões na turbina a gás	5,89
T_4	temperatura de entrada do ar na turbina de expansão	1406,7
η_c	eficiência isoentrópica do compressor	0,854
η_t	eficiência isoentrópica da turbina	0,877
α_{cc}	perda de pressão relativa na câmara de combustão	0,975
α_{rga}	perdas de pressão relativas no regenerador (ar)	0,975
α_{rgg}	perdas de pressão relativas no regenerador (gases)	0,993
α_{cr}	perda de pressão relativa na caldeira de recuperação	0,973
ε_{rg}	efetividade do regenerador	0,881
ε_{cr}	efetividade da caldeira de recuperação	0,932

Tabela 3.3: Custos dos equipamentos na condição de ótimo (US\$)

Z_c	90821,5
Z_{cc}	29568,5
Z_t	150420,5
Z_{rg}	97536,2
Z_{cr}	68878,7

Os valores determinados para as dez variáveis consideradas independentes são apresentados na Tabela 3.2 e na Tabela 3.1.3 os custos de aquisição na condição de ótimo. A Tabela 3.4 lista os valores das propriedades das correntes do sistema, também obtidos pela otimização.

A utilização prática de turbinas a gás regenerativas acopladas a caldeiras de recuperação é pouco usual, uma vez que a baixa temperatura dos gases na saída do regenerador (T_6) determina grandes áreas de transferência de calor na caldeira e limita a temperatura e a vazão do vapor produzido. No sistema estudado, a determinação dos valores das variáveis independentes por um processo de otimização assegura uma temperatura mais elevada que a encontrada em turbinas comerciais, mas limitando em consequência a relação de pressões (β), a eficiência da turbina (η_t) e a efetividade do regenerador (ε_{rg}) e exigindo uma elevada temperatura máxima do ciclo (T_4). Esta é limitada pelo custo da turbina, equação (3.26), e da câmara de combustão, equação (3.25), e compromete assim a eficiência da

Tabela 3.4: Propriedades das correntes no sistema

Fluxo	T (K)	P (bar)	\dot{H} (kW)	\dot{E} (kW)	\dot{E}^T (kW)	\dot{E}^P (kW)	\dot{S} (kW)
1	288,2	1,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	512,0	5,89	2238,7	2048,7	582,2	1466,5	190,1
3	928,0	5,74	6398,7	4474,1	3028,6	1445,5	1924,6
4	1484,0	5,60	11958,2	8660,1	7235,5	1424,6	3298,2
5	984,2	1,03	6960,6	3449,5	3421,1	28,4	3511,1
6	568,2	1,03	2800,6	866,7	844,1	22,6	1934,0
7	461,0	1,00	1728,2	374,3	374,3	0,0	1353,9
\dot{W}_L			2758,9	2758,9			
\dot{W}_c			2238,7	2238,7			
\dot{Q}			1072,4	390,5			

turbina, componente de maior custo no sistema. Ainda como consequência da configuração escolhida, a relação entre a potência líquida da turbina e o fluxo de energia do vapor produzido é elevada (igual a 2,57).

Capítulo 4

Aplicação ao Sistema de Cogeração

A existência de diversas metodologias termoeconômicas, tendo como fundamento comum a análise exergética, mas apresentando significativas diferenças entre si, representa um obstáculo à aplicação prática da análise termoeconômica. O conhecimento das diferenças permite o entendimento dos (prováveis) diferentes resultados obtidos pela aplicação de distintas metodologias.

No fascículo especial da revista *Energy* (Valero *et al.*, 1994), dedicado à Análise Termoeconômica, um problema de sistema de cogeração com turbina a gás, denominado CGAM, é definido e sobre ele aplicam-se quatro das metodologias descritas nos Capítulos 1 e 2. Infelizmente inexistente uma comparação e, por se apresentarem as análises como artigos isolados, carecendo de uniformidade, revela-se árduo ao leitor realizá-la por si mesmo.

Neste capítulo, um sistema de cogeração é definido e a ele aplicam-se a Análise Funcional Termoeconômica, a Teoria do Custo Exergético, a Exergoeconomia e a Metodologia Estrutural. São também propostas e aplicadas variações sobre a Teoria do Custo Exergético.

4.1 Aplicação da Análise Funcional Termoeconômica

A elaboração do diagrama funcional do sistema (figura 4.1) é o primeiro passo para a aplicação da Análise Funcional Termoeconômica. O sistema é dividido em cinco unidades reais, correspondendo aos cinco componentes do sistema, e uma unidade virtual, uma

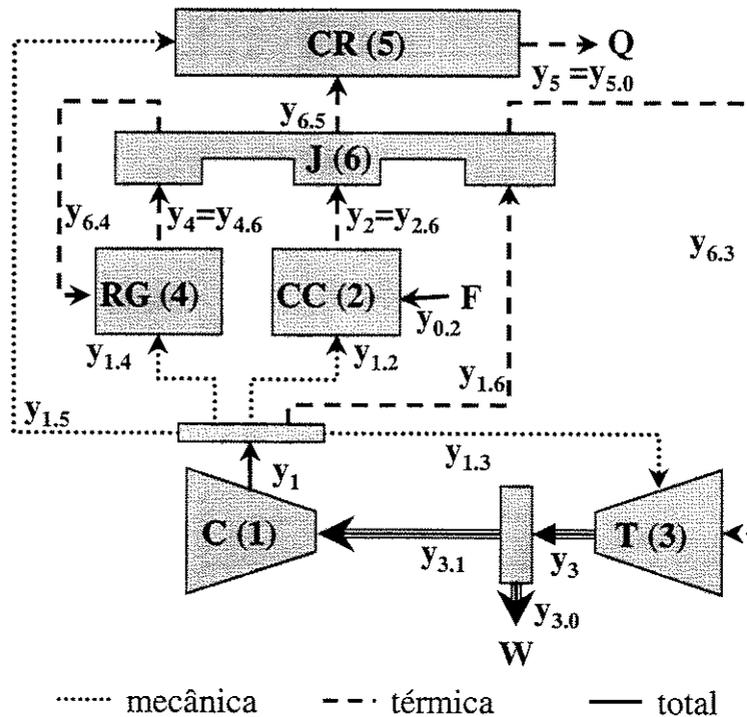


Figura 4.1: Diagrama funcional para a Análise Funcional Termoeconômica.

junção.

O produto do compressor (unidade 1) é a variação total da exergia no processo de compressão,

$$y_1 = \dot{E}_2 - \dot{E}_1 \quad (4.1)$$

utilizando a potência fornecida pela turbina (unidade 3).

$$y_{3.1} = \dot{W}_C = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 \quad (4.2)$$

O produto da câmara de combustão (unidade 2) é a variação da exergia térmica através da unidade.

$$y_2 = \dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T \quad (4.3)$$

Para isso, utiliza a exergia de pressão fornecida pelo compressor (unidade 1)

$$y_{1.2} = \dot{E}_3^M - \dot{E}_4^M \quad (4.4)$$

e a exergia do combustível, fornecida pelo ambiente.

$$y_{0.2} = \dot{F} \quad (4.5)$$

A turbina (unidade 3) produz a potência total

$$y_3 = \dot{W}_T = \dot{H}_4 - \dot{H}_5 \quad (4.6)$$

utilizando a exergia de pressão do compressor (unidade 1)

$$y_{1.3} = \dot{E}_4^M - \dot{E}_5^M \quad (4.7)$$

e a exergia térmica fornecida pela junção (unidade 6).

$$y_{6.3} = \dot{E}_4^T - \dot{E}_5^T \quad (4.8)$$

O regenerador (unidade 4) produz exergia térmica,

$$y_4 = \dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T \quad (4.9)$$

utilizando a exergia térmica suprida pelo compressor (unidade 1)

$$y_{1.4} = (\dot{E}_2^M - \dot{E}_3^M) + (\dot{E}_5^M - \dot{E}_6^M) \quad (4.10)$$

e a exergia térmica fornecida pela junção (unidade 6).

$$y_{6.4} = \dot{E}_5^T - \dot{E}_6^T \quad (4.11)$$

O produto da caldeira de recuperação (unidade 5) é o calor suprido para geração de vapor.

$$y_5 = \dot{E}_Q \quad (4.12)$$

Para produzi-lo utiliza a exergia térmica suprida pela junção (unidade 6)

$$y_{6.5} = \dot{E}_6^T - \dot{E}_7^T \quad (4.13)$$

e a exergia de pressão do compressor (unidade 1).

$$y_{1.5} = \dot{E}_6^M - \dot{E}_7^M \quad (4.14)$$

A junção, única unidade virtual do diagrama, recebe as exergias térmicas supridas pelo compressor (unidade 1),

$$y_{1.6} = \dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T \quad (4.15)$$

pela câmara de combustão (unidade 2),

$$y_{2.6} = y_2 = \dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T \quad (4.16)$$

e pelo regenerador (unidade 4).

$$y_{4.6} = \dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T \quad (4.17)$$

Toda a exergia consumida pelas demais unidades é suprida pela junção.

$$y_6 = \dot{E}_4^T - \dot{E}_7^T \quad (4.18)$$

O ambiente recebe os dois produtos do sistema, a potência líquida da turbina (unidade 3),

$$y_{3.0} = \dot{W}_L \quad (4.19)$$

e o calor da caldeira de recuperação.

$$y_{5.0} = y_5 \quad (4.20)$$

A equação 1.39, expressa o balanço de custos para cada unidade, incluindo a junção,

$$\dot{Z}_r + \sum_{r'=0}^R c_{r'} y_{r',r} = c_r y_r \quad (1.39)$$

e é utilizada para gerar o sistema de equações (4.22) a (4.27), utilizados na determinação dos custos dos produtos do sistema.

$$c_1 y_1 - c_3 y_{3.1} - \dot{Z}_2 = 0 \quad (4.22)$$

$$c_2 y_2 - c_1 y_{1.2} - c_{0y} y_{0.2} - \dot{Z}_1 = 0 \quad (4.23)$$

$$c_3 y_3 - c_1 y_{1.3} - c_6 y_{6.3} - \dot{Z}_3 = 0 \quad (4.24)$$

$$c_4 y_4 - c_1 y_{1.4} - c_6 y_{6.4} - \dot{Z}_4 = 0 \quad (4.25)$$

$$c_5 y_5 - c_1 y_{1.5} - c_6 y_{6.5} - \dot{Z}_5 = 0 \quad (4.26)$$

$$c_6 y_6 - c_1 y_{1.6} - c_2 y_{2.6} - c_4 y_{4.6} = 0 \quad (4.27)$$

Na formulação apresentada acima, a irreversibilidade externa, devida ao resfriamento dos gases que deixam a chaminé, é concentrada na junção, que recebe a exergia térmica originária do compressor, da câmara de combustão e do regenerador e fornece apenas a parcela realmente consumida pelas demais unidades:

$$y_{1.6} + y_{2.6} + y_{4.6} = \dot{E}_4^T - \dot{E}_1^T \geq y_6 = \dot{E}_4^T - \dot{E}_7^T. \quad (4.28)$$

Desta forma, o custo dessa irreversibilidade é distribuído entre as unidades consumidoras de exergia térmica, na proporção em que essas a consomem. Não fazer qualquer consideração especial seria outra opção, equivalendo a considerar que a caldeira de recuperação é responsável pela não utilização da exergia dos gases de escape. Neste caso, as equações 4.18 e 4.13 são substituídas pelas seguintes.

$$y_6 = \dot{E}_4^T - \dot{E}_1^T \quad (4.29)$$

$$y_{6.5} = \dot{E}_6^T - \dot{E}_1^T \quad (4.30)$$

Tabela 4.1: Estrutura produtiva do sistema na implementação básica da Teoria do Custo Exergético.

Unidade	P	F	L
Compressor	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	\dot{W}_C	
Câmara de Combustão	$\dot{E}_4 - \dot{E}_3$	\dot{F}	
Turbina	$\dot{W}_C + \dot{W}_L$	$\dot{E}_5 - \dot{E}_4$	
Regenerador	$\dot{E}_3 - \dot{E}_2$	$\dot{E}_6 - \dot{E}_5$	
Caldeira de Recuperação	E_Q	\dot{E}_6	\dot{E}_7

4.2 Aplicação da Teoria do Custo Exergético

A Teoria do Custo Exergético, pela simplicidade que caracteriza sua implementação, enseja a elaboração e aplicação de várias variantes. A seguir descreve-se a implementação da formulação básica da metodologia (Subseção 4.2.1), considerando a exergia total das correntes. A desagregação da exergia em suas parcelas térmica e mecânica é abordada na Subseção 4.2.2. Finalmente, a implementação de duas diferentes abordagens para a redistribuição da irreversibilidade externa é apresentada na Subseção 4.2.3.

4.2.1 Implementação Básica

Na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, apresentada na Seção 2.2, consideram-se apenas as cinco unidades reais, correspondendo aos cinco componentes do sistema. Tendo sido realizada a análise energética e exergética, é necessário o levantamento da estrutura produtiva do sistema, especificando para cada unidade produtos, insumos e perdas (ver Tabela 4.1). Nesta variante básica, considera-se a exergia total das correntes, isto é, não dividida em parcelas térmica e mecânica. Também não se dá nenhum tratamento especial à irreversibilidade gerada pelo resfriamento dos gases de escape.

No Capítulo 5 apresenta-se um diagrama funcional (ou estrutural), representando graficamente o intercâmbio de produtos e insumos no sistema, elaborado a partir da análise da estrutura produtiva estabelecida (ver figura 5.1, página 78).

Uma vez que se trabalha sobre os custos dos fluxos reais as equações de balanço para

cada um destes sistemas são escritas, conforme a proposição P1.

Para o compressor,

$$\dot{C}_1 - \dot{C}_2 + \dot{C}_{WC} + \dot{Z}_1 = 0. \quad (4.31)$$

Para a câmara de combustão,

$$\dot{C}_3 + \dot{C}_F - \dot{C}_4 + \dot{Z}_2 = 0. \quad (4.32)$$

Para a turbina,

$$\dot{C}_4 - \dot{C}_5 - \dot{C}_{WC} - \dot{C}_{WL} + \dot{Z}_3 = 0. \quad (4.33)$$

Para o regenerador,

$$\dot{C}_2 - \dot{C}_3 + \dot{C}_5 - \dot{C}_6 + \dot{Z}_4 = 0. \quad (4.34)$$

Para a caldeira de recuperação,

$$\dot{C}_6 - \dot{C}_7 - \dot{C}_Q + \dot{Z}_5 = 0. \quad (4.35)$$

Seguindo-se a proposição P2, escrevem-se ainda as equações de atribuição de custos para os insumos externos. Combustível,

$$\dot{C}_F = \dot{C}_f F. \quad (4.36)$$

E ar,

$$\dot{C}_1 = 0. \quad (4.37)$$

A exergia dos gases de escape (fluxo 7) é considerada perda e seu custo é igualado a zero, conforme a proposição P3.

$$\dot{C}_7 = 0 \quad (4.38)$$

A equação (4.38) implica em alocar todo o custo da irreversibilidade associada ao resfriamento dos gases de escape (irreversibilidade externa) ao vapor, único produto da caldeira de recuperação.

As oito equações acima não constituem um sistema determinado, uma vez que são onze os custos que se deseja calcular. Sendo o insumo consumido pela turbina a diferença de exergias da corrente ao atravessar a unidade, a proposição P4a permite escrever que o custo exergético unitário da corrente de gases que atravessa a unidade é constante,

$$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}_4} - \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5} = 0 \quad (4.39)$$

Da mesma forma para o regenerador, considerando a corrente de gases quentes,

$$\frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5} - \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}_6} = 0 \quad (4.40)$$

Finalmente, utilizando a proposição P4b, estabelece-se que são iguais os custos exergéticos unitários da potência líquida produzida na turbina e da produzida para consumo no compressor.

$$\frac{\dot{C}_{wL}}{\dot{W}_L} - \frac{\dot{C}_{wC}}{\dot{W}_C} = 0 \quad (4.41)$$

O sistema de equações (4.31) a (4.41) pode ser escrito na forma matricial, como preferem os autores da metodologia. Para tanto, é necessário elaborar inicialmente a matriz de incidência, representando os balanços de custos nas unidades. Montam-se em seguida as matrizes de entradas e de perdas, para atribuição de custos a esses fluxos, e a matriz de bifurcações, representando as equações complementares. Na tabela 4.2 apresenta-se a matriz de custos completa para a implementação básica. Sobre a matriz, foram listados os fluxos correspondentes às colunas, e à esquerda da mesma, as unidades, fluxos e relações auxiliares. À direita encontra-se o vetor de valoração externa \mathbf{Y} contendo os custos de investimento e os custo dos insumos externos.

Tabela 4.2: Matriz de Incidência e Vetor de Valoração Externa na implementação básica da Teoria do Custo Exergético.

	1	2	3	4	5	6	7	\dot{F}	\dot{W}_C	\dot{W}_L	\dot{E}_Q	Y
Compressor	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$-\dot{Z}_1$
Regenerador	0	1	-1	0	1	-1	0	0	0	0	0	$-\dot{Z}_2$
Câmara de Combustão	0	0	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	$-\dot{Z}_3$
Turbina	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	-1	0	$-\dot{Z}_4$
Caldeira de Recuperação	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	-1	$-\dot{Z}_5$
Entrada - Ar	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entrada - Combustível	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	$c_f \dot{F}$
Perda - Gases de Escape	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$k_4 = k_5$	0	0	0	$\frac{1}{E_4}$	$-\frac{1}{E_5}$	0	0	0	0	0	0	0
$k_5 = k_6$	0	0	0	0	$\frac{1}{E_5}$	$-\frac{1}{E_6}$	0	0	0	0	0	0
$k_{\dot{W}_C} = k_{\dot{W}_L}$	0	0	0	0	0	0	0	0	$\frac{1}{\dot{W}_C}$	$-\frac{1}{\dot{W}_L}$	0	0

4.2.2 Desagregando a Exergia

A Teoria do Custo Exergético possibilita que se divida a exergia em suas parcelas térmica e mecânica, requerendo para tanto que se redefina a estrutura produtiva do sistema (ver Tabela 4.3). Ainda nesta variante, nenhum tratamento especial é dado à irreversibilidade dos gases de escape, o que implica em alocar todo seu custo ao vapor produzido na caldeira de recuperação. Também para esta variante, foi elaborado um diagrama funcional, representando a estrutura produtiva com desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, que é apresentado na Figura 5.2 (pagina 79).

Tal como na implementação básica, as equações de balanço são escritas seguindo a proposição P1. Para o compressor.

$$\dot{C}_1^M + \dot{C}_1^T - \dot{C}_2^M - \dot{C}_2^T + \dot{C}_{W_C} + \dot{Z}_1 = 0 \quad (4.42)$$

Para a câmara de combustão.

$$\dot{C}_3^M + \dot{C}_3^T + \dot{C}_F - \dot{C}_4^M - \dot{C}_4^T + \dot{Z}_2 = 0 \quad (4.43)$$

Tabela 4.3: Estrutura Produtiva na Teoria do Custo Exergético considerando a divisão da exergia em parcelas térmica e mecânica.

Unidade	P	F	L
Compressor	$\dot{E}_2^M - \dot{E}_1^M + \dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T$	\dot{W}_C	
Câmara de Combustão	$\dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T$	$\dot{F} + \dot{E}_4^M - \dot{E}_3^M$	
Turbina	$\dot{W}_C + \dot{W}_L$	$\dot{E}_5^M - \dot{E}_4^M + \dot{E}_5^T - \dot{E}_4^T$	
Regenerador	$\dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T$	$\dot{E}_6^T - \dot{E}_5^T + \dot{E}_2^M - \dot{E}_1^M + \dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T$	
Caldeira de Recuperação	\dot{E}_Q	$\dot{E}_6^M + \dot{E}_6^T$	$\dot{E}_7^M + \dot{E}_7^T$

Para a turbina.

$$\dot{C}_4^M + \dot{C}_4^T - \dot{C}_5^M - \dot{C}_5^T - \dot{C}_{W_C} - \dot{C}_{W_L} + \dot{Z}_3 = 0 \quad (4.44)$$

Para o regenerador.

$$\dot{C}_2^M - \dot{C}_2^T - \dot{C}_3^M - \dot{C}_3^T + \dot{C}_5^M - \dot{C}_5^T - \dot{C}_6^M - \dot{C}_6^T + \dot{Z}_4 = 0 \quad (4.45)$$

Para a caldeira de recuperação.

$$\dot{C}_6^M + \dot{C}_6^T - \dot{C}_7^M - \dot{C}_7^T - \dot{C}_Q + \dot{Z}_5 = 0 \quad (4.46)$$

Os custos dos insumos externos são externamente valorados, seguindo a proposição P2. Para o combustível é utilizada a mesma equação da implementação básica:

$$\dot{C}_F = \dot{C}_f F. \quad (4.36)$$

Para o ar, ambas as parcelas da exergia são valoradas:

$$\dot{C}_1^M = 0 \quad (4.48)$$

e

$$\dot{C}_1^T = 0. \quad (4.49)$$

Segundo a proposição P3, o custo das parcelas térmica e mecânica da exergia dos gases de escape é igualado a zero:

$$\dot{C}_7^M = 0 \quad (4.50)$$

e

$$\dot{C}_7^T = 0. \quad (4.51)$$

Assim como na implementação básica, as equações (4.50) e (4.51) significam que todo o custo da irreversibilidade externa recai sobre o vapor, único produto da caldeira de recuperação.

As equações suplementares são escritas seguindo as proposições P4a e P4b. Para a turbina, são parcelas do insumo as diferenças das exergias mecânica e térmica da corrente de gases ao atravessar a unidade. Assim, é constante tanto o custo unitário da exergia mecânica,

$$\frac{\dot{C}_4^M}{\dot{E}_4^M} - \frac{\dot{C}_5^M}{\dot{E}_5^M} = 0, \quad (4.52)$$

quanto o custo unitário da exergia térmica da mesma corrente,

$$\frac{\dot{C}_4^T}{\dot{E}_4^T} - \frac{\dot{C}_5^T}{\dot{E}_5^T} = 0. \quad (4.53)$$

Uma vez que a exergia mecânica da corrente é quase totalmente consumida na unidade, os custos exergéticos e de investimento associados ao compressor recaem principalmente sobre a potência produzida pela turbina.

Para o regenerador, as diferenças de exergia térmica e mecânica da corrente de gases são parcelas do insumo e, por isso, mantém-se constantes os custos unitários da exergia mecânica,

$$\frac{\dot{C}_5^M}{\dot{E}_5^M} - \frac{\dot{C}_6^M}{\dot{E}_6^M} = 0, \quad (4.54)$$

e térmica,

$$\frac{\dot{C}_5^T}{\dot{E}_5^T} - \frac{\dot{C}_6^T}{\dot{E}_6^T} = 0. \quad (4.55)$$

Também a diferença da exergia mecânica da corrente de ar frio ao ser aquecido é parte do insumo. Por isso, mantém-se constante o custo unitário da exergia mecânica da corrente fria de ar:

$$\frac{\dot{C}_2^M}{\dot{E}_2^M} - \frac{\dot{C}_3^M}{\dot{E}_3^M} = 0. \quad (4.56)$$

Para a câmara de combustão, além do combustível, a variação da exergia mecânica da corrente de ar/gases é parte do insumo. Faz-se assim constante o custo unitário da exergia mecânica da corrente:

$$\frac{\dot{C}_3^M}{\dot{E}_3^M} - \frac{\dot{C}_4^M}{\dot{E}_4^M} = 0. \quad (4.57)$$

As equações originadas da aplicação das proposição P3 e P4a distribuem os custos do fornecimento da exergia mecânica proporcionalmente à sua utilização, uma vez que a exergia mecânica da corrente de gases de escape é nula. Também com relação à exergia térmica, os custos são imputados aos produtos do regenerador e da turbina proporcionalmente ao consumo nas unidades. Entretanto, como observado acima, o produto da caldeira de recuperação arca ainda com os custos da exergia (térmica) remanescente nos gases de escape.

A proposição P4b é aplicada somente à turbina, tal como na implementação básica:

$$\frac{\dot{C}_{W_L}}{\dot{W}_L} - \frac{\dot{C}_{W_C}}{\dot{W}_C} = 0 \quad (4.41)$$

Ou seja, como o produto da unidade é dividido em dois fluxos, potência líquida produzida na turbina e potência produzida para consumo no compressor, os custos exergéticos unitários destes fluxos são igualados. Não se diferenciam, portanto, os custos de produto externo e interno.

Função do Compressor

Uma consideração final, que não se enquadra explicitamente entre as quatro proposições originais, é necessária para que o número de equações no sistema se iguale ao de variáveis. Como o único produto do compressor (ver Tabela 4.3), estabelecido segundo as definições da Teoria do Custo Exergético, é o aumento da exergia total da corrente de ar, devem ser iguais os aumentos dos custos unitários das exergias mecânica e térmica, ou seja,

$$\frac{\dot{C}_2^M - \dot{C}_1^M}{\dot{E}_2^M - \dot{E}_1^M} = \frac{\dot{C}_2^T - \dot{C}_1^T}{\dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T} \quad (4.59)$$

Produzida a partir de um insumo derivado, a potência mecânica, a exergia térmica fornecida pelo compressor terá custo elevado, superior à exergia suprida na câmara de combustão.

Diferentemente da Teoria do Custo Exergético, na Metodologia Estrutural (ver Seções 2.4 e 4.3), introduz-se o conceito de múltiplos produtos para uma unidade, um dos quais se define como produto principal e aos demais denomina-se subprodutos. Os produtos de uma unidade serão, em geral, diferentes parcelas da exergia por ela suprida. Seus custos são determinados de formas diversas: enquanto o custo do produto principal continua a ser fixado pelos processos internos à unidade, o custo dos subprodutos é estabelecido externamente – é igual ao custo do produto da unidade, ou das unidades, em que (aquela parcela de exergia) é produto principal.

No sistema de cogeração aqui analisado, a única unidade na qual a definição de produto inclui um aumento nas duas parcelas da exergia é o compressor. Por isso é a única unidade para a qual é possível propor a definição de um produto, aumento da exergia mecânica, e de um subproduto, aumento da exergia térmica. São duas as unidades que tem como função a produção de exergia térmica: a câmara de combustão e o regenerador. O custo médio unitário da exergia térmica produzida pelo compressor é então igualado ao da exergia térmica por eles produzida

$$\frac{\dot{C}_2^T - \dot{C}_1^T}{\dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T} = \frac{(\dot{C}_3^T - \dot{C}_2^T) + (\dot{C}_4^T - \dot{C}_3^T)}{(\dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T) + (\dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T)} \quad (4.60)$$

As equações (4.59) e (4.60) são utilizadas alternativamente. Na primeira delas os custos associados ao compressor, exergéticos ou não, são rateados entre as duas parcelas do produto

da unidade, ou seja, o mesmo custo unitário é estabelecido para os acréscimos de exergia térmica e mecânica. Na segunda opção, apenas o produto principal da unidade – aumento da exergia mecânica – responde pelos custos associados ao compressor, descontados os custos fixados externamente para o acréscimo de exergia térmica.

4.2.3 Redividindo a Irreversibilidade Externa

Tanto na implementação básica quanto nas duas variantes em que a exergia é dividida nas parcelas térmica e mecânica, o custo da irreversibilidade externa, aquela associada ao resfriamento dos gases de escape, é imputado ao produto da última unidade a jusante – o vapor produzido pela caldeira de recuperação.

A seguir, discutem-se e implementam-se diversas opções para a distribuição dos custos da irreversibilidade externa.

A Neguentropia

A utilização da neguentropia para distribuição dos custos da irreversibilidade de unidades cuja função não é suprir exergia (ou parcela da exergia) foi introduzida por Frangopoulos (1983), ao analisar um sistema de geração de potência com turbina de condensação. Como a observação do diagrama T-s do ciclo condensante deixa claro (ver figura 4.2), o condensador (linha 4-1 no diagrama) tem a função de retirar a entropia do sistema ou suprir o sistema com neguentropia suficiente para cancelar o aumento da entropia no ciclo. Alekseev (1986), analisando o funcionamento dos sistemas animados (máquinas e seres vivos) considera possível a manutenção do equilíbrio instável nesses sistemas pela adição de neguentropia do ambiente.

Na aplicação da Metodologia Estrutural ao problema de centrais de cogeração com turbinas a gás, Lozano e Valero (1993b) utilizam a neguentropia para distribuir os custos da irreversibilidade devida aos gases de escape. Para isso, consideram uma unidade extra responsável por receber os gases de escape e reduzir sua entropia ao nível do ar de admissão (correspondendo ao ambiente, em uma situação de equilíbrio).

Para utilizar a neguentropia em conjunto com a Teoria do Custo Exergético, considera-

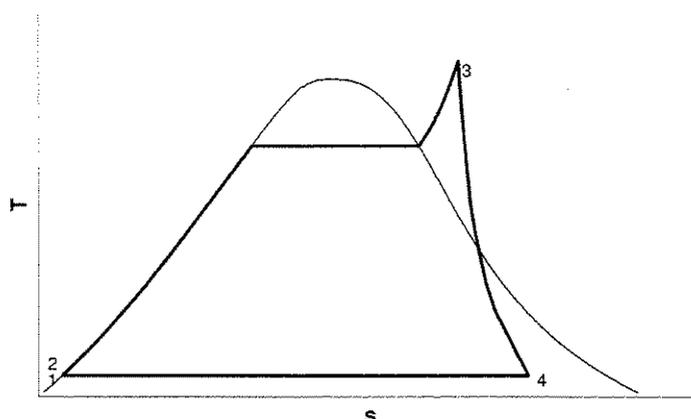


Figura 4.2: Diagrama T-s para um ciclo de Rankine operando em ciclo condensante.

se em primeiro lugar, assim como na Metodologia Estrutural, a existência de uma unidade final (a chaminé) que recebe a corrente de gases de escape e retorna ao sistema um fluxo neguentrópico, paralelo à corrente de ar/gases mas de sentido contrário. As proposições P4 continuam válidas para este fluxo.

Quando apenas a exergia total é considerada a estrutura produtiva do sistema passa a ser a apresentada na Tabela 4.4. Esta é semelhante à estrutura utilizada na implementação básica, apresentada na Tabela 4.1, diferenciando-se apenas pela inclusão dos termos referentes à neguentropia (\dot{S}). Esses últimos, tendo sido multiplicados pela temperatura T_o , tem as mesmas unidades da exergia (ver definição da neguentropia específica, equação 3.5).

Tal como a estrutura produtiva, o sistema de equações utilizado nesta variante é semelhante ao adotado na implementação básica, inserindo-se as variáveis relacionadas à neguentropia. A aplicação da proposição P1 leva à construção do conjunto de equações seguintes. Para o compressor.

$$\dot{C}_1 - \dot{C}_2 - \dot{C}_{S1} + \dot{C}_{S2} + \dot{C}_{WC} + \dot{Z}_1 = 0 \quad (4.61)$$

Para a câmara de combustão.

$$\dot{C}_3 - \dot{C}_4 - \dot{C}_{S3} + \dot{C}_{S4} + \dot{C}_F + \dot{Z}_2 = 0 \quad (4.62)$$

Tabela 4.4: Estrutura produtiva considerando o uso da neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa.

Unidade	P	F	L
Compressor	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	$\dot{W}_C + (\dot{S}_1 - \dot{S}_2)$	
Câmara de Combustão	$\dot{E}_4 - \dot{E}_3$	$\dot{F} + (\dot{S}_3 - \dot{S}_4)$	
Turbina	$\dot{W}_C + \dot{W}_L$	$(\dot{E}_5 - \dot{E}_4) + (\dot{S}_4 - \dot{S}_5)$	
Regenerador	$\dot{E}_3 - \dot{E}_2$	$(\dot{E}_6 - \dot{E}_5) + [(\dot{S}_2 - \dot{S}_3) + (\dot{S}_5 - \dot{S}_6)]$	
Caldeira de Recuperação	E_Q	$(\dot{E}_6 - \dot{E}_7) + (\dot{S}_6 - \dot{S}_7)$	
Chaminé	\dot{S}_7	\dot{E}_7	

Para a turbina.

$$\dot{C}_4 - \dot{C}_5 - \dot{C}_{S4} + \dot{C}_{S5} - \dot{C}_{W_C} - \dot{C}_{W_L} + \dot{Z}_3 = 0 \quad (4.63)$$

Para o regenerador.

$$\dot{C}_2 - \dot{C}_3 - \dot{C}_{S2} + \dot{C}_{S3} + \dot{C}_5 - \dot{C}_6 - \dot{C}_{S5} + \dot{C}_{S6} + \dot{Z}_4 = 0 \quad (4.64)$$

Para a caldeira de recuperação.

$$\dot{C}_6 - \dot{C}_7 - \dot{C}_{S6} + \dot{C}_{S7} - \dot{C}_Q + \dot{Z}_5 = 0 \quad (4.65)$$

Para a chaminé.

$$\dot{C}_7 - \dot{C}_{S7} - \dot{C}_Q + \dot{Z}_5 = 0 \quad (4.66)$$

São mantidas as equações construídas para a implementação básica utilizando a proposição P2,

$$\dot{C}_F = \dot{C}_f F \quad (4.36)$$

e ar.

$$\dot{C}_1 = 0 \quad (4.37)$$

Também na aplicação da proposição P3, mantém-se a atribuição de custo zero à exergia dos gases de escape (fluxo 7).

$$\dot{C}_7 = 0 \quad (4.38)$$

A neguentropia do ar de admissão (fluxo S1) é considerada uma perda ¹.

$$\dot{C}_{S1} = 0 \quad (4.70)$$

As equações auxiliares são elaboradas seguindo as proposições 4. Assim como na implementação básica, para a turbina, a proposição P4a permite escrever:

$$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}_4} - \frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5} = 0 \quad (4.39)$$

Da mesma forma para o regenerador,

$$\frac{\dot{C}_5}{\dot{E}_5} - \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}_6} = 0 \quad (4.40)$$

A diferença entre os valores da neguentropia é insumo para todas as unidades, exceto a caldeira de recuperação e o compressor. Ainda seguindo a proposição P4a, para a câmara de combustão, igualam-se os custos unitários da neguentropia na entrada e na saída da unidade:

$$\frac{\dot{C}_{S4}}{\dot{S}_{S4}} - \frac{\dot{C}_{S3}}{\dot{S}_{S3}} = 0 \quad (4.73)$$

Para a turbina.

$$\frac{\dot{C}_{S5}}{\dot{S}_{S5}} - \frac{\dot{C}_{S4}}{\dot{S}_{S4}} = 0 \quad (4.74)$$

¹Note-se que, como o estado do ar de entrada é considerado base para a determinação da neguentropia, seu valor é igual a zero. Assim, rigorosamente, qualquer valor pode ser atribuído a esse fluxo sem que se alterem os demais resultados.

Tabela 4.5: Estrutura Produtiva considerando a divisão da exergia em parcelas térmica e mecânica e o uso da neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa.

Unidade	P	F
Compressor	$\dot{E}_2^M - \dot{E}_1^M + \dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T$	$\dot{W}_C + \dot{S}_1 - \dot{S}_2$
Câmara de Combustão	$\dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T$	$\dot{F} + \dot{E}_4^M - \dot{E}_3^M + \dot{S}_3 - \dot{S}_4$
Turbina	$\dot{W}_C + \dot{W}_L$	$\dot{E}_5^M - \dot{E}_4^M + \dot{E}_5^T - \dot{E}_4^T + \dot{S}_4 - \dot{S}_5$
Regenerador	$\dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T$	$\dot{E}_6^M - \dot{E}_5^M + \dot{E}_6^T - \dot{E}_5^T +$ $+ \dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T + \dot{S}_2 - \dot{S}_3 + \dot{S}_5 - \dot{S}_6$
Caldeira de Recuperação	E_Q	$\dot{E}_7^M - \dot{E}_6^M + \dot{E}_7^T - \dot{E}_6^T + \dot{S}_6 - \dot{S}_7$
Chaminé	$\dot{S}_7 - \dot{S}_1$	$\dot{E}_7^M + \dot{E}_7^T$

Para o regenerador, parte fria (escoamento de ar),

$$\frac{\dot{C}_{S3}}{\dot{S}_{S3}} - \frac{\dot{C}_{S2}}{\dot{S}_{S2}} = 0, \quad (4.75)$$

e parte quente (escoamento de gases),

$$\frac{\dot{C}_{S6}}{\dot{S}_{S6}} - \frac{\dot{C}_{S5}}{\dot{S}_{S5}} = 0. \quad (4.76)$$

As equações (4.73) a (4.76) estabelecem a repartição dos custos da irreversibilidade externa proporcionalmente ao aumento da entropia nas unidades. Uma vez que a neguentropia do estado 3 é menor que a do estado 2, o lado do escoamento de ar do regenerador é na verdade um fornecedor de neguentropia para o sistema e a utilização da equação (4.75) implica em um crédito à unidade.

Finalmente, igualam-se os custos exergéticos unitários da potência líquida produzida na turbina e da produzida para consumo no compressor, conforme a proposição P4b.

$$\frac{\dot{C}_{W_L}}{\dot{W}_L} - \frac{\dot{C}_{W_C}}{\dot{W}_C} = 0 \quad (4.41)$$

Implementou-se também o uso da neguentropia em conjunto com a divisão da exergia em suas parcelas térmica e mecânica. Na Tabela 4.2.3 apresenta-se a estrutura produtiva

para este caso, semelhante à estrutura utilizada na Subseção 4.2.2, acrescidos os termos referentes à neguentropia.

Em conformidade com a estrutura produtiva, também as equações de balanço, estabelecidas segundo a proposição P1, são as mesmas da Subseção 4.2.2, modificadas com a introdução dos fluxos neguentrópicos. Para o compressor.

$$\dot{C}_1^M + \dot{C}_1^T - \dot{C}_{S1} - \dot{C}_2^M - \dot{C}_2^T + \dot{C}_{S2} + \dot{C}_{W_C} + \dot{Z}_1 = 0 \quad (4.78)$$

Para a câmara de combustão.

$$\dot{C}_3^M + \dot{C}_3^T - \dot{C}_{S3} + \dot{C}_F - \dot{C}_4^M - \dot{C}_4^T + \dot{C}_{S4} + \dot{Z}_2 = 0 \quad (4.79)$$

Para a turbina.

$$\dot{C}_4^M + \dot{C}_4^T - \dot{C}_{S4} - \dot{C}_5^M - \dot{C}_5^T + \dot{C}_{S5} - \dot{C}_{W_C} - \dot{C}_{W_L} + \dot{Z}_3 = 0 \quad (4.80)$$

Para o regenerador.

$$\dot{C}_2^M + \dot{C}_2^T - \dot{C}_{S2} - \dot{C}_3^M - \dot{C}_3^T + \dot{C}_{S3} + \dot{C}_5^M + \dot{C}_5^T - \dot{C}_{S5} - \dot{C}_6^M - \dot{C}_6^T + \dot{C}_{S6} + \dot{Z}_4 = 0 \quad (4.81)$$

Para a caldeira de recuperação.

$$\dot{C}_6^M + \dot{C}_6^T - \dot{C}_{S6} - \dot{C}_7^M - \dot{C}_7^T + \dot{C}_{S7} - \dot{C}_Q + \dot{Z}_5 = 0 \quad (4.82)$$

Na valoração dos insumos externos, segundo a proposição P2, utilizam-se as equações definidas nas Subseções 4.2.1 e 4.2.2.

Para o combustível:

$$\dot{C}_F = \dot{C}_f F. \quad (4.36)$$

Para o ar,

$$\dot{C}_1^M = 0 \quad (4.48)$$

e

$$\dot{C}_1^T = 0. \quad (4.49)$$

Também aqui, o custo das parcelas térmica e mecânica da exergia dos gases de escape é igualado a zero, seguindo o estabelecido pela proposição P3:

$$\dot{C}_7^M = 0 \quad (4.50)$$

e

$$\dot{C}_7^T = 0. \quad (4.51)$$

A neguentropia do fluxo S1, também considerada perda, é igualada a zero.

$$\dot{C}_{S1} = 0 \quad (4.70)$$

As equações suplementares referentes aos fluxos exergéticos também são as mesmas da Subseção 4.2.2. Seguindo a proposição P4a, são constantes o custo unitário da exergia mecânica da corrente de ar que atravessa a turbina,

$$\frac{\dot{C}_4^M}{\dot{E}_4^M} - \frac{\dot{C}_5^M}{\dot{E}_5^M} = 0, \quad (4.52)$$

e o custo unitário da exergia térmica da mesma corrente,

$$\frac{\dot{C}_4^T}{\dot{E}_4^T} - \frac{\dot{C}_5^T}{\dot{E}_5^T} = 0. \quad (4.53)$$

Para o regenerador, mantém-se constantes os custos unitários da exergia mecânica e térmica

da corrente quente de gases,

$$\frac{\dot{C}_5^M}{\dot{E}_5^M} - \frac{\dot{C}_6^M}{\dot{E}_6^M} = 0 \quad (4.54)$$

e

$$\frac{\dot{C}_5^T}{\dot{E}_5^T} - \frac{\dot{C}_6^T}{\dot{E}_6^T} = 0, \quad (4.55)$$

assim como o custo unitário da exergia mecânica da corrente fria de ar,

$$\frac{\dot{C}_2^M}{\dot{E}_2^M} - \frac{\dot{C}_3^M}{\dot{E}_3^M} = 0. \quad (4.56)$$

Para a câmara de combustão, é constante o custo unitário da exergia mecânica da corrente de ar/gases:

$$\frac{\dot{C}_3^M}{\dot{E}_3^M} - \frac{\dot{C}_4^M}{\dot{E}_4^M} = 0. \quad (4.57)$$

A essas equações são acrescentadas as referentes aos fluxos neguentrópicos através da câmara de combustão,

$$\frac{\dot{C}_{S4}}{\dot{S}_{S4}} - \frac{\dot{C}_{S3}}{\dot{S}_{S3}} = 0 \quad (4.73)$$

Para a turbina.

$$\frac{\dot{C}_{S5}}{\dot{S}_{S5}} - \frac{\dot{C}_{S4}}{\dot{S}_{S4}} = 0 \quad (4.74)$$

Para o regenerador, do lado do escoamento de ar,

$$\frac{\dot{C}_{S3}}{\dot{S}_{S3}} - \frac{\dot{C}_{S2}}{\dot{S}_{S2}} = 0 \quad (4.75)$$

e ao lado do escoamento de gases

$$\frac{\dot{C}_{S6}}{\dot{S}_{S6}} - \frac{\dot{C}_{S5}}{\dot{S}_{S5}} = 0 \quad (4.76)$$

Seguindo a proposição P4b, como nas demais variantes, igualam-se os custos exergeticos unitários da potência líquida produzida na turbina e da produzida para consumo no compressor.

$$\frac{\dot{C}_{W_L}}{\dot{W}_L} - \frac{\dot{C}_{W_C}}{\dot{W}_C} = 0 \quad (4.41)$$

O sistema de equações é completado uma vez que se estabeleça a função do compressor, se o aumento da exergia total, utilizando-se então a equação (4.59), ou o aumento da exergia mecânica somente, quando a equação (4.60) deve ser utilizada.

Internalizando a Irreversibilidade Externa

O custo da irreversibilidade externa pode ser dividido entre os consumidores de exergia proporcionalmente à sua demanda, de maneira similar à adotada na implementação da Análise Funcional Termoeconômica. A implementação pode ser feita valendo-se de uma característica do problema em estudo: a exergia é suprida em uma série contínua de unidades (compressor, regenerador - lado do ar, e câmara de combustão) e consumida em outra série contínua (turbina, regenerador - lado dos gases, caldeira de recuperação). O custo da irreversibilidade externa é então adicionado em uma unidade virtual à jusante da câmara de combustão e à montante da turbina ou, simplesmente, à câmara de combustão, última unidade a adicionar exergia à corrente.

Esta implementação é válida para sistemas em que a exergia é suprida por um conjunto de unidades para somente depois ser consumida por outro conjunto. Se um processo como o reaquecimento fosse utilizado, seria necessário ponderar o custo da irreversibilidade externa.

A implementação desta opção corresponde a modificar a estrutura funcional do sistema, deixando de considerar a corrente de gases de escape uma perda e considerando como insumo da caldeira de recuperação a diferença de exergias da corrente de gases ao atravessar

a unidade. O custo da corrente de gases de escape (fluxo 7) é então adicionado à câmara de combustão. A implementação básica da Teoria do Custo Exergético deve então ser modificada da seguinte maneira.

1. A equação (4.38), correspondente à aplicação da proposição P3 aos gases de escape, é suprimida.
2. A proposição P4a é aplicada à caldeira de recuperação, igualando os custos unitários das correntes de gases na entrada e na saída da unidade.

$$\frac{\dot{C}_7}{\dot{E}_7} - \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}_6} = 0 \quad (4.100)$$

3. A equação (4.32), balanço de custos na câmara de combustão, é modificada para adicionar o custo da irreversibilidade externa, igual ao custo da exergia da corrente de gases de escape.

$$\dot{C}_3 + \dot{C}_F - \dot{C}_4 + \dot{C}_7 + \dot{Z}_2 = 0 \quad (4.101)$$

4. As demais equações do sistema, constituído pelas equações (4.31) a (4.41), são mantidas.

Para a implementação da Teoria do Custo Exergético com a desagregação da exergia em suas parcelas térmica e mecânica os seguintes passos são utilizados.

1. A equação (4.51), correspondente à aplicação da proposição P3 à exergia térmica dos gases de escape, é suprimida. Assim como a exergia mecânica do fluxo 7 é igual a zero, o custo também o deve ser e por isso a equação (4.50) é mantida.
2. A proposição P4a é aplicada à variação da exergia térmica na caldeira de recuperação, igualando os custos unitários das correntes de exergia térmica dos gases na entrada e na saída da unidade.

$$\frac{\dot{C}_7^T}{\dot{E}_7^T} - \frac{\dot{C}_6^T}{\dot{E}_6^T} = 0 \quad (4.102)$$

3. A equação (4.32), balanço de custos na câmara de combustão, é modificada para adicionar o custo da irreversibilidade externa, igual ao custo da exergia da corrente de gases de escape.

$$\dot{C}_3^M + \dot{C}_3^T + \dot{C}_F - \dot{C}_4^M - \dot{C}_4^T + \dot{C}_7^T + \dot{Z}_2 = 0 \quad (4.103)$$

4. São mantidas as demais equações do sistema, constituído pela equações (4.36), (4.41), (4.42) a (4.57) e por uma das equações (4.59) ou (4.60).

Redistribuindo Externamente

Os custos da irreversibilidade externa podem ainda ser redistribuídos em uma segunda etapa, posterior à análise convencional. Nesse caso não se impõe o custo zero às portadoras de exergia que deixam o sistema, como estabelecido pela proposição P3, mas trata-se destas correntes como se efetivamente constituíssem produtos do sistema. Na segunda etapa, reparte-se seu custo entre os verdadeiros produtos, proporcionalmente aos conteúdos exergéticos desses.

A implementação deste tratamento é semelhante à da internalização da irreversibilidade externa. A estrutura produtiva do sistema é também modificada, passando a diferença de exergias da corrente de gases a ser considerada insumo da caldeira de recuperação.

Na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, suprime-se a equação (4.38), correspondente à aplicação da proposição P3 aos gases de escape. Seguindo a proposição P4a, igualam-se os custos unitários da corrente de gases à entrada e à saída da caldeira de recuperação.

$$\frac{\dot{C}_7}{\dot{E}_7} - \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}_6} = 0 \quad (4.104)$$

Mantém-se as demais equações do sistema, constituído pelas equações (4.31) a (4.41).

Na segunda etapa, redistribuem-se os custos associados à exergia da corrente de gases de escape entre os dois produtos do sistema, potência e calor, segundo os fluxos exergéticos

correspondentes.

$$\dot{C}_{W_L}^o = \dot{C}_{W_L} + \frac{\dot{W}_L}{\dot{W}_L + \dot{C}_Q} \dot{C}_7 \quad (4.105)$$

$$\dot{C}_Q^o = \dot{C}_Q + \frac{\dot{E}_Q}{\dot{W}_L + \dot{E}_Q} \dot{C}_7 \quad (4.106)$$

O subscrito *o* denota custo externo, para o ambiente. O custo externo da potência será maior que o custo interno, taxado ao compressor, consumidor interno.

Para a variante que considera a desagregação da exergia, a equação (4.51), correspondente à aplicação da proposição P3 à exergia térmica dos gases de escape, é suprimida. A equação similar, escrita para a exergia mecânica, é mantida porque a exergia mecânica do fluxo 7 é nula. A proposição P4a é aplicada à variação da exergia térmica na caldeira de recuperação, mantendo-se constante o custo unitário da corrente de exergia térmica dos gases ao atravessar a unidade.

$$\frac{\dot{C}_7^T}{\dot{E}_7^T} - \frac{\dot{C}_6^T}{\dot{E}_6^T} = 0 \quad (4.107)$$

São mantidas as demais equações do sistema, constituído pela equações (4.36), (4.41), (4.42) a (4.57) e por uma das equações (4.59) ou (4.60).

O custo da corrente de exergia térmica dos gases de escape é redistribuído na segunda etapa.

$$\dot{C}_{W_L}^o = \dot{C}_{W_L} + \frac{\dot{W}_L}{\dot{W}_L + \dot{C}_Q} \dot{C}_7^T \quad (4.108)$$

$$\dot{C}_Q^o = \dot{C}_Q + \frac{\dot{E}_Q}{\dot{W}_L + \dot{E}_Q} \dot{C}_7^T \quad (4.109)$$

4.3 Aplicação da Metodologia Estrutural

A definição da estrutura produtiva apresentada na Figura 4.3 constiu-se no primeiro passo para a implementação da Metodologia Estrutural. Nessa estrutura estão representadas as

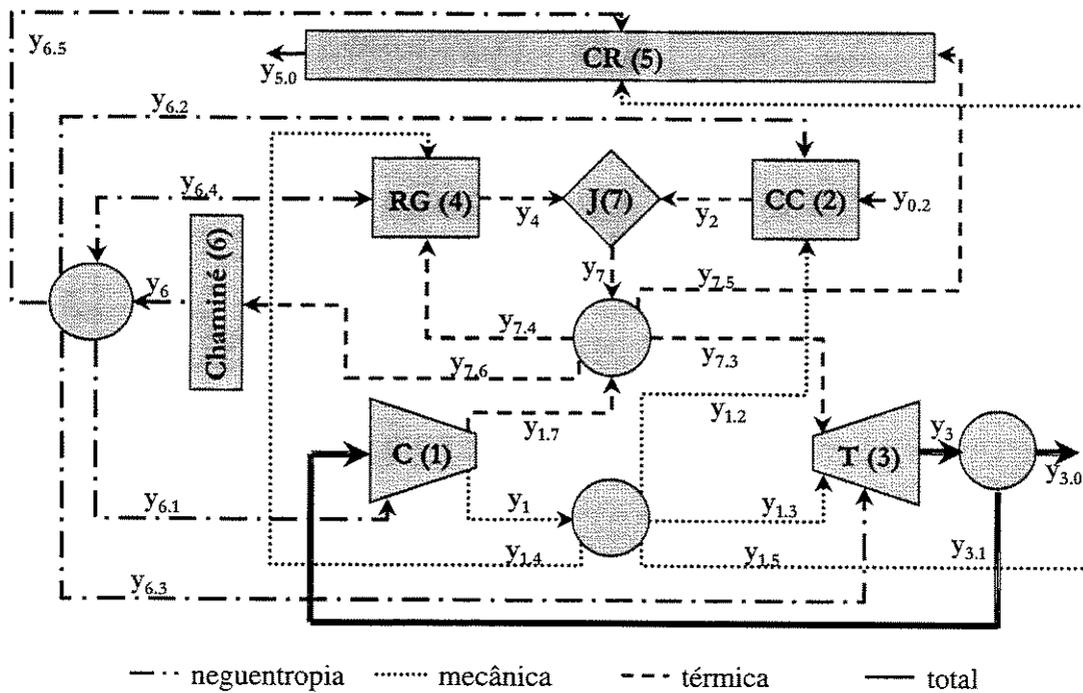


Figura 4.3: Estrutura produtiva na Metodologia Estrutural.

cinco unidades reais, correspondentes aos cinco componentes básicos do sistema e uma unidade extra, representando a *chaminé*. Estão também representadas uma junção e as quatro ramificações que possuem mais de um fluxo de saída. Na Metodologia Estrutural as ramificações estão sempre associadas a uma unidade ou junção, permitindo que se omitam aquelas que apresentam apenas um fluxo de saída. As ramificações apresentadas não são numeradas e serão referidas pelo número da unidade ou junção a que servem.

Uma característica desta metodologia, a *chaminé* (unidade 6), tem como função fornecer neguentropia ao sistema, reduzindo a entropia dos gases de escape ao nível da entropia do ar de admissão. A denominação *chaminé* segue a utilizada por Lozano e Valero (1993b) em sua análise do sistema, embora possa induzir a erro, uma vez que a função da unidade é a de um trocador de calor em um ciclo fechado.

Os produtos e os insumos para cada uma das unidades são apresentados a seguir, utilizando a nomenclatura adotada neste trabalho e a utilizada pelos autores.

O compressor tem como função o aumento da exergia mecânica da corrente de ar,

$$y_1 = \dot{E}_2^M - \dot{E}_1^M \quad (4.110)$$

produzindo também um subproduto, o aumento da exergia térmica da corrente,

$$y_{7.1} = \dot{E}_2^T - \dot{E}_1^T. \quad (4.111)$$

Para isso, consome potência mecânica produzida pela turbina,

$$y_{3.1} = \dot{W}_C \quad (4.112)$$

neguentropia, fornecida pela chaminé,

$$y_{6.1} = \dot{S}_1 - \dot{S}_2 \quad (4.113)$$

e investimento,

$$Z_1 = \dot{Z}_c \quad (4.114)$$

A função da câmara de combustão (unidade 2) é aumentar a exergia térmica da corrente,

$$y_2 = \dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T \quad (4.115)$$

Os insumos utilizados são a exergia do combustível (calor fornecido),

$$y_{0.2} = \dot{F} \quad (4.116)$$

a exergia mecânica da corrente, oriunda do compressor,

$$y_{3.2} = \dot{E}_4^M - \dot{E}_3^M \quad (4.117)$$

a neguentropia, fornecida pela chaminé,

$$y_{6.2} = \dot{S}_3 - \dot{S}_4 \quad (4.118)$$

e o investimento,

$$Z_2 = \dot{Z}_{cc}. \quad (4.119)$$

A turbina (unidade 3), fornece potência mecânica ao sistema:

$$y_3 = \dot{W} = \dot{H}_5 - \dot{H}_4. \quad (4.120)$$

Os insumos utilizados pela turbina são a exergia térmica fornecida pela junção,

$$y_{7.3} = \dot{E}_5^T - \dot{E}_4^T, \quad (4.121)$$

a exergia mecânica, fornecida pelo compressor,

$$y_{1.3} = \dot{E}_5^M - \dot{E}_4^M, \quad (4.122)$$

a neguentropia,

$$y_{6.3} = \dot{S}_4 - \dot{S}_5, \quad (4.123)$$

e o investimento,

$$Z_3 = \dot{Z}_t. \quad (4.124)$$

O regenerador aumenta a exergia térmica da corrente de ar frio,

$$y_4 = \dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T \quad (4.125)$$

utilizando a exergia térmica dos gases quentes,

$$y_{7.4} = \dot{E}_6^T - \dot{E}_5^T, \quad (4.126)$$

a exergia mecânica das duas correntes, gases

$$y_{1.4g} = \dot{E}_6^M - \dot{E}_5^M, \quad (4.127)$$

e ar,

$$y_{1.4a} = \dot{E}_3^M - \dot{E}_2^M, \quad (4.128)$$

a neguentropia,

$$y_{6.4} = \dot{S}_5 - \dot{S}_6 - \dot{S}_2 - \dot{S}_3, \quad (4.129)$$

e o investimento,

$$Z_4 = \dot{Z}_{rg} \quad (4.130)$$

A caldeira de recuperação (unidade 5) fornece exergia térmica para a produção de vapor:

$$y_5 = E_Q = (\dot{H}_7 - \dot{H}_6) \left(1 - \frac{T_o}{T_v}\right), \quad (4.131)$$

, onde T_v é a temperatura do vapor produzido pela caldeira de recuperação. Os insumos utilizados são a exergia térmica,

$$y_{7.5} = \dot{E}_7^T - \dot{E}_6^T, \quad (4.132)$$

a exergia mecânica,

$$y_{1.5} = \dot{E}_7^M - \dot{E}_6^M \quad (4.133)$$

a neguentropia,

$$y_{6.5} = \dot{S}_6 - \dot{S}_7, \quad (4.134)$$

e o investimento,

$$Z_5 = \dot{Z}_{cr}. \quad (4.135)$$

A chaminé supre neguentropia ao sistema,

$$y_6 = \dot{S}_7, \quad (4.136)$$

recebendo a exergia térmica dos gases de escape:

$$y_{7.6} = \dot{E}_6^T \quad (4.137)$$

Finalmente a junção reúne a exergia térmica fornecida pela câmara de combustão e pelo regenerador, para consumo pelas demais unidades.

$$y_7 = \dot{E}_3^T - \dot{E}_2^T + \dot{E}_4^T - \dot{E}_3^T \quad (4.138)$$

A matriz \mathbf{KR} , dos coeficientes técnicos de produção internos ($k_{i,j}$ e $r_{i,j}$) é apresentada na equação (4.139). O Apêndice A contém expressões para os coeficientes, definidos pelas equações (2.34b) a (2.35b) e determinados utilizando as definições de insumos e produtos feitas nas equações (4.110) a (4.138).

$$\mathbf{KR} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{3.1} & 0 & 0 & k_{6.1} & -k_{7.1} \\ k_{1.2} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{6.2} & 0 \\ k_{1.3} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{6.3} & k_{7.3} \\ k_{1.4} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{6.4} & k_{7.4} \\ k_{1.5} & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{6.5} & k_{7.5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{7.6} \\ 0 & 1 - r_{4.7} & 0 & r_{4.7} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.139)$$

O sinal negativo nos coeficientes $k_{7.1}$ e $k_{6.5}$ indica fluxo em direção contrária à convencional. Em geral, apenas um fluxo, o produto da unidade associada, se dirige à cada ramificação. A exergia térmica produzida pelo compressor ($k_{7.1}$) e a neguentropia suprida pela caldeira de recuperação ($k_{6.5}$) não são produtos principais das unidades, mas subprodutos que tem o custo fixado por outras unidades. Para Lozano e Valero (1993b), apenas a exergia térmica do compressor é explicitamente subproduto; a neguentropia suprida pela caldeira de recuperação recebe incidentalmente este tratamento.

A matriz \mathbf{KR}_o dos coeficientes de produção externos ($k_{o,j}$ e $r_{o,j}$), definidos pelas equações (2.34a) e (2.35a), é apresentada na equação (4.140). Somente o combustível é insumo externo com custo, conduzindo a uma matriz deteriorada em vetor em que todos

os elementos, exceto o correspondente ao combustível, são iguais a zero. O coeficiente de produção pode ser encontrado no Apêndice A.

$$\mathbf{KR}_o = \begin{bmatrix} 0 & k_{o.2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^t \quad (4.140)$$

De maneira similar, o vetor \mathbf{c}_o dos custos externos tem somente o termo do combustível diferente de zero:

$$\mathbf{c}_o = \begin{bmatrix} 0 & c_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^t \quad (4.141)$$

Finalmente, o vetor \mathbf{k}^z dos coeficientes de custos não-exergéticos apresenta valores iguais a zero apenas para a chaminé e a junção.

$$\mathbf{k}^z = \begin{bmatrix} k_{z1} \\ k_{z2} \\ k_{z3} \\ k_{z4} \\ k_{z5} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.142)$$

As matrizes e vetores definidos acima permitem que equações de balanço de custos sejam escritas para cada unidade real e para a junção, utilizando a equação (2.47). Nas equações seguintes os coeficientes de produção são indicados por simplicidade na apresentação.

Compressor.

$$c_1 = -k_{7.1}c_7 + k_{6.1}c_6 + k_{3.1}c_3 + k_{z1} \quad (4.143)$$

Câmara de Combustão.

$$c_2 = k_f c_F + k_{1.2}c_1 + k_{6.2}c_6 + k_{z2} \quad (4.144)$$

Turbina.

$$c_3 = k_{7.3}c_7 + k_{1.3}c_1 + k_{6.3}c_6 + k_{z3} \quad (4.145)$$

Regenerador.

$$c_4 = k_{7.4}c_7 + (k_{1.4a} + k_{1.4g})c_1 + k_{6.4}c_6 + k_{z4} \quad (4.146)$$

Caldeira de Recuperação.

$$c_5 = k_{7.5}c_7 + k_{1.5}c_1 - k_{6.5}c_6 + k_{z5} \quad (4.147)$$

Chaminé.

$$c_6 = k_{7.6}c_7 \quad (4.148)$$

Junção.

$$c_7 = (1 - r_{4.7})c_2 + r_{4.7}c_4 \quad (4.149)$$

O sistema constituído pelas equações (4.144) a (4.149) é determinado, contendo sete variáveis e igual número de equações. Assemelha-se ao utilizado na Análise Funcional Termoeconômica (equações 4.22 a 4.27), apresentando como diferenças notáveis a utilização dos coeficientes de produção, a presença da chaminé e a definição de subprodutos. Uma vez que os coeficientes são razões entre o consumo de determinado insumo em uma unidade e o produto dessa unidade, a manipulação matemática necessária para reescrever as equações na forma utilizada na Análise Funcional é pequena. A presença da chaminé representa a opção por uma forma alternativa de tratamento dos custos da irreversibilidade externa, aqui distribuídos pela neguentropia. Finalmente, o conceito de subprodutos com custos determinados externamente à unidade apresenta-se como a maior diferença entre as duas metodologias. A discussão desse tema será retomada no Capítulo 5.

4.4 Aplicação da Exergoeconomia

A implementação da Exergoeconomia descrita a seguir considera a exergia dividida em suas parcelas térmica e mecânica embora, como descrito na Seção 2.3, a metodologia permita

que se trabalhe com a exergia total. As unidades são cinco, correspondendo aos cinco componentes básicos do sistema. Como é característico da metodologia, de maneira diferente das demais, os custos dos fluxos são específicos em massa, como indica o superscrito m . Os custos dos produtos são específicos em exergia, como indica o superscrito e .

Seis equações são escritas para o compressor, sendo a primeira o balanço de custos.

$$\dot{m}(c_1^{mT} + c_1^{mM}) - \dot{m}(c_2^{mT} + c_2^{mM}) + \dot{C}_{w_c} = -\dot{Z}_c \quad (4.150)$$

Através das equações (4.151) e (4.152), atribui-se custo zero às exergias térmica e mecânica do ar de admissão.

$$c_1^{mT} = 0 \quad (4.151)$$

$$c_1^{mM} = 0 \quad (4.152)$$

Igualam-se os custos de adição das exergias térmica e mecânica na unidade, o que corresponde a considerar como função do compressor o aumento da exergia total da corrente de ar.

$$\frac{c_2^{mT} - c_1^{mT}}{e_2^T - e_1^T} - \frac{c_2^{mM} - c_1^{mM}}{e_2^M - e_1^M} = 0 \quad (4.153)$$

Finalmente, determina-se o custo específico do fornecimento de exergia térmica,

$$c_{Pc}^{eT} = \frac{c_2^{mT} - c_1^{mT}}{e_2^T - e_1^T}, \quad (4.154)$$

e mecânica,

$$c_{Pc}^{eM} = \frac{c_2^{mM} - c_1^{mM}}{e_2^M - e_1^M}. \quad (4.155)$$

A equação de balanço de custos (equação 4.156) para o regenerador considera as correntes de ar e gases através da unidade.

$$\dot{m}(c_2^{mT} + c_2^{mM}) - \dot{m}(c_3^{mT} + c_3^{mM}) + \dot{m}(c_5^{mT} + c_5^{mM}) - \dot{m}(c_6^{mT} + c_6^{mM}) = -\dot{Z}_{rg} \quad (4.156)$$

O custo específico do produto da unidade, a adição de exergia térmica à corrente de ar, é determinado,

$$c_{Prq}^{eT} = \frac{c_3^{mT} - c_2^{mT}}{e_3^T - e_2^T}. \quad (4.157)$$

Para a câmara de combustão, além da equação de balanço de custos,

$$\dot{m}(c_3^{mT} + c_3^{mM}) - \dot{m}(c_4^{mT} + c_4^{mM}) + \dot{C}_F = -\dot{Z}_{cc} \quad (4.158)$$

faz-se a atribuição de custos ao combustível suprido.

$$\dot{C}_F = c_f \dot{F} \quad (4.159)$$

A equação seguinte expressa o custo específico da adição de exergia térmica à corrente de gases na câmara de combustão.

$$c_{Pcc}^{eT} = \frac{c_4^{mT} - c_3^{mT}}{e_4^T - e_3^T} \quad (4.160)$$

A equação de balanço para a turbina,

$$\dot{m}(c_4^{mT} + c_4^{mM}) - \dot{m}(c_5^{mT} + c_5^{mM}) - \dot{C}_{W_L} - \dot{C}_{W_c} = -\dot{Z}_t \quad (4.161)$$

é acompanhada por uma equação auxiliar, determinando custos unitários iguais para a potência mecânica consumida no compressor e para a potência líquida do sistema.

$$\dot{W}_c \frac{\dot{C}_{W_L}}{\dot{W}_L} - \dot{C}_{W_c} = 0 \quad (4.162)$$

Para a caldeira de recuperação, escreve-se simplesmente o balanço de custos.

$$\dot{m}(c_6^{mT} + c_6^{mM}) - \dot{m}(c_7^{mT} + c_7^{mM}) - \dot{C}_Q = -\dot{Z}_{cr} \quad (4.163)$$

A exergia mecânica é fornecida somente pelo compressor e consumida pelas demais unidades e portanto o custo da exergia das correntes de 3 a 7 é determinado pelo custo da adição da exergia mecânica naquela unidade (equação 4.164). Já a exergia térmica é fornecida pelo

compressor, pelo regenerador e pela câmara de combustão, e o custo da exergia térmica das correntes 5 a 7 é determinado pela composição dos custos de adição da exergia térmica nas três unidades (equação 4.165).

$$c_i^{mM} = c_{Pc}^{eM} \langle e_1^M, e_2^M, e_i^M \rangle \quad (4.164)$$

$$c_i^{mT} = c_{Pc}^{eT} \langle e_1^T, e_2^T, e_i^T \rangle + c_{Pr}^{eT} \langle e_2^T, e_3^T, e_i^T \rangle + c_{Pcc}^{eT} \langle e_3^T, e_4^T, e_i^T \rangle \quad (4.165)$$

Note-se que a corrente 7, correspondente aos gases de escape, pode ter custos positivos, desde que sua exergia não seja nula. Estes custos devem ser redistribuídos entre os produtos do sistema em uma etapa posterior, na proporção do conteúdo exergético desses produtos, conforme as equações (4.166) e (4.167).

$$\dot{C}_{WL}^o = \dot{C}_{WL} + \frac{\dot{W}_L}{\dot{W}_L + \dot{C}_Q} (\dot{C}_7^M + \dot{C}_7^T) \quad (4.166)$$

$$\dot{C}_Q^o = \dot{C}_Q + \frac{\dot{E}_Q}{\dot{W}_L + \dot{E}_Q} (\dot{C}_7^M + \dot{C}_7^T) \quad (4.167)$$

O conjunto de equações geradas pelo desenvolvimento das equações (4.164) e (4.165) é apresentado na Subseção 5.1.8, onde se apresenta o diagrama produtivo determinado pelo sistema ao qual pertencem e complementam.

Capítulo 5

Análise de Resultados

A análise dos resultados deste trabalho não se resume apenas à observação dos valores encontrados para os custos dos produtos internos e externos, empregando as metodologias e variantes descritas no Capítulo 4. Também são resultados, e como tal objetos de análise, a explicitação de estruturas e diagramas funcionais de teorias exergoeconômicas baseadas em postulados e outras informações obtidas na aplicação das metodologias.

A apresentação dos resultados numéricos obtidos pela aplicação das metodologias e de suas variantes requer um grande número de tabelas. Para facilitar a leitura deste capítulo, optou-se por apresentá-las nos apêndices B, C, D e E.

5.1 Diagramas Produtivos

A representação gráfica da estrutura produtiva de um sistema permite visualizar de forma clara e simples a interpretação dada pelo autor ao funcionamento do sistema. Das metodologias aplicadas duas exigem a definição prévia de diagrama da estrutura produtiva (ou funcional). São elas a Análise Funcional Termoeconômica, cujo diagrama é apresentado na Figura 4.1 e a Metodologia Estrutural, Figura 4.3.

Na Teoria do Custo Exergético, exige-se a definição dos insumos, produtos e perdas de cada unidade, em consonância com a definição de suas eficiências exergéticas, designando-se a esse conjunto “estrutura produtiva”. As definições da estrutura produtiva são determi-

nantes nas equações complementares geradas pelas proposições P4. Já a Exergoeconomia não faz uso de estrutura produtiva, utilizando conceitos de contabilidade para gerar as equações complementares.

Nesta seção, apresentam-se diagramas produtivos para todas as variantes da Teoria do Custo Exergético e para a Exergoeconomia, construídos a partir da análise das implementações das metodologias.

Nestes diagramas as ramificações são via de regra combinadas com as unidades ou junções a que servem. Ramificações puras são representadas apenas nos casos em que a quantidade de fluxos originários da unidade é muito grande, como no compressor.

5.1.1 Teoria do Custo Exergético - Exergia Total

O diagrama produtivo na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, construído a partir da estrutura produtiva apresentada na Tabela 4.1, é apresentado na Figura 5.1. As cinco unidades reais definidas na “estrutura produtiva” são representadas, além de uma unidade virtual, a junção/ramificação. O compressor, a câmara de combustão e o regenerador fornecem exergia a uma junção/ramificação, representada por dois círculos concêntricos, que por sua vez supre a turbina, o regenerador e a caldeira de recuperação. Esta última recebe toda a exergia da corrente de gases quentes à saída do regenerador, rejeitando a exergia dos gases de escape para o ambiente. A potência mecânica produzida pela turbina é um fluxo à parte, sendo fornecida diretamente ao compressor e ao ambiente como um produto. Embora somente unidades reais sejam consideradas na aplicação da Teoria do Custo Exergético, implicitamente, a metodologia utiliza uma unidade virtual, a junção/ramificação.

5.1.2 Teoria do Custo Exergético - Exergia Desagregada

Nas variantes da Teoria do Custo Exergético em que a exergia é desagregada em suas parcelas térmica e mecânica, duas possibilidades foram consideradas para a função do compressor: o aumento da exergia total ou apenas da parcela mecânica (ver Subseção 4.2.2). Para o primeiro caso o diagrama produtivo é apresentado na Figura 5.2. Uma

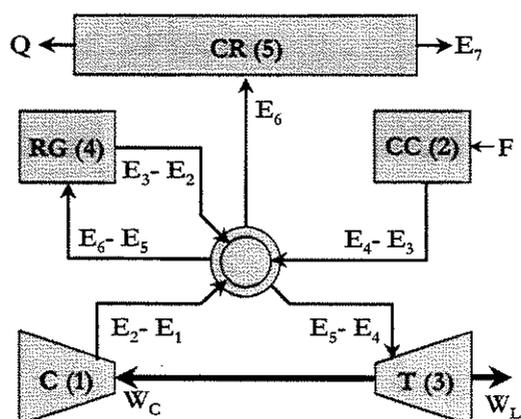


Figura 5.1: Diagrama funcional na implementação básica da Teoria do Custo Exergético.

ramificação é utilizada para o compressor, recebendo toda a exergia por ele adicionada à corrente e fornecendo exergia mecânica para todas as demais unidades e exergia térmica para uma junção/ramificação. O regenerador recebe duas correntes de exergia mecânica, referentes ao escoamento do ar e dos gases. A junção/ramificação reúne exergia térmica oriunda do compressor, da câmara de combustão e do regenerador, distribuindo-a entre as unidades consumidoras: a turbina, o regenerador e a caldeira de recuperação, ao custo médio de suprimento. Também nesta variante, a perda de exergia pelos gases de escape ocorre na caldeira de recuperação.

O diagrama produtivo que representa a implementação da Teoria do Custo Exergético, com desagregação da exergia, e considerando como produto do compressor apenas o aumento da exergia mecânica, é apresentado na Figura 5.3. Esse diagrama difere do anterior apenas pelo fluxo de exergia térmica do compressor, que se separa do fluxo de exergia mecânica logo ao deixar a unidade, em direção à junção/ramificação de exergia térmica. Note-se que sua entrada se dá não no anel interno, mas no externo, junto às saídas, com as quais compartilha o custo específico. O custo da exergia térmica é determinado apenas pelos dois fluxos principais de entrada, oriundos da câmara de combustão e do regenerador. Isso é representado graficamente pela entrada desses fluxos através do anel interno. Ainda

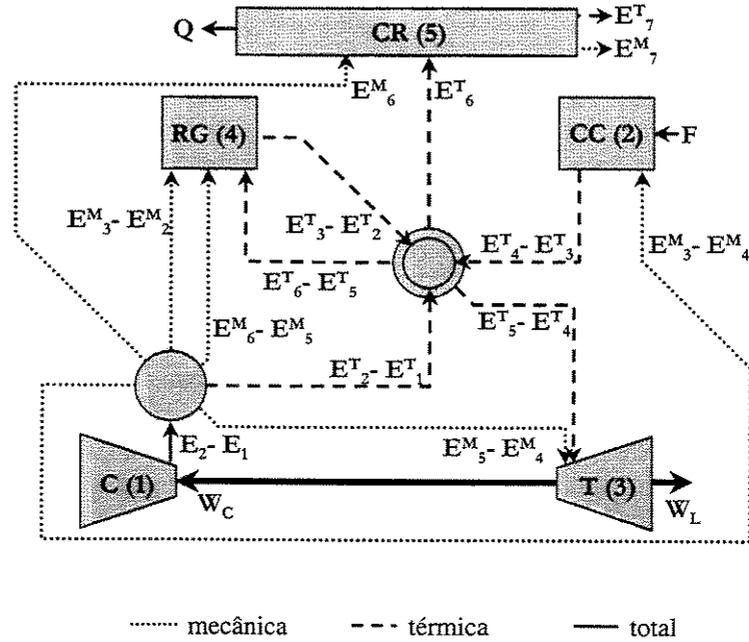


Figura 5.2: Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica (produto do compressor aumento da exergia total).

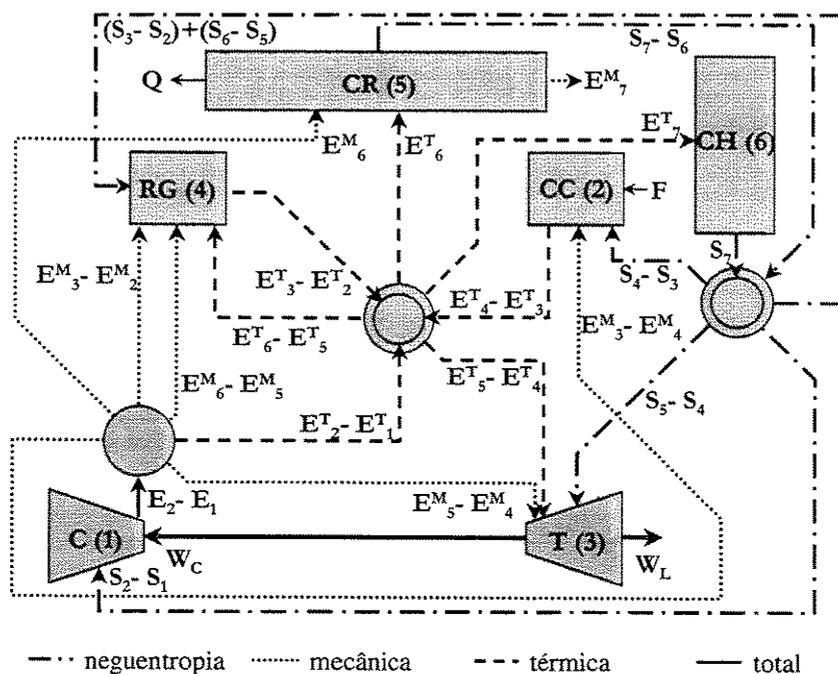


Figura 5.5: Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia total).

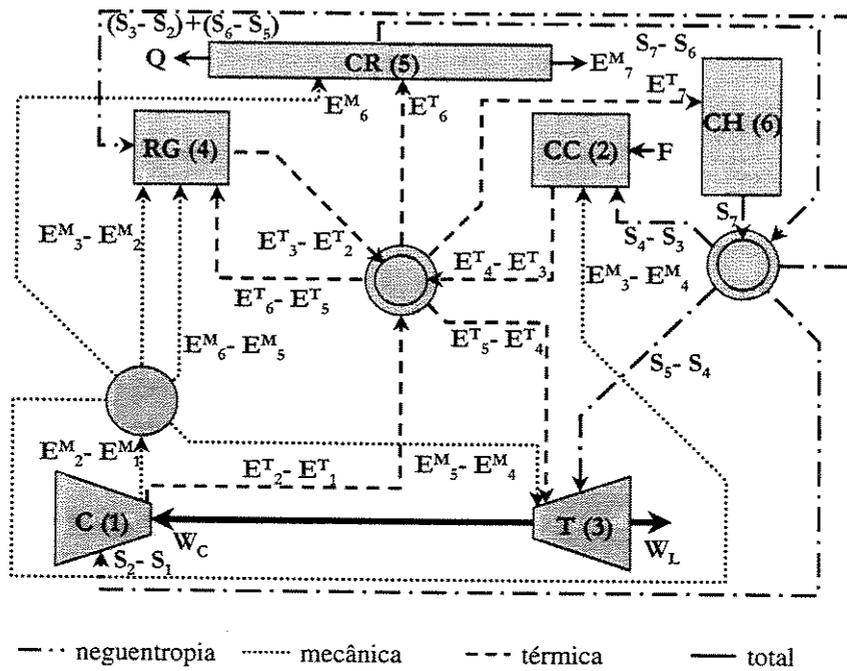


Figura 5.6: Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia mecânica).

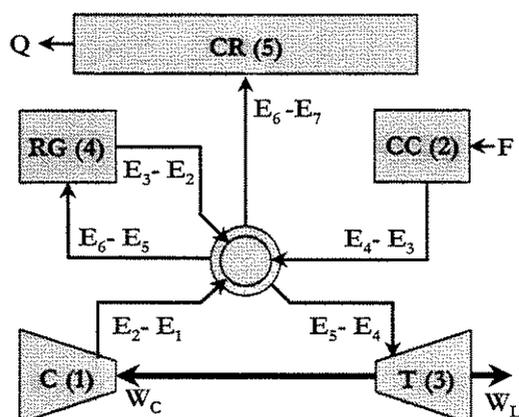


Figura 5.7: Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, internalizando a irreversibilidade externa.

5.1.5 Teoria do Custo Exergético - Exergia Total e Irreversibilidade Internalizada

A opção de internalizar a irreversibilidade decorrente do resfriamento dos gases de escape determina uma pequena alteração no diagrama produtivo (figura 5.7). Apenas o fluxo de exergia fornecido à caldeira de recuperação é feito igual à diferença de exergias entre os gases de saída da turbina e os gases de escape. Conseqüentemente, suprime-se a perda de exergia da caldeira, que passa a representar irreversibilidade na junção/ramificação de exergia térmica.

5.1.6 Teoria do Custo Exergético - Exergia Desagregada e Irreversibilidade Internalizada

Também para as variantes que consideram a desagregação da exergia, a internalização da irreversibilidade decorrente do resfriamento dos gases de escape representa apenas uma

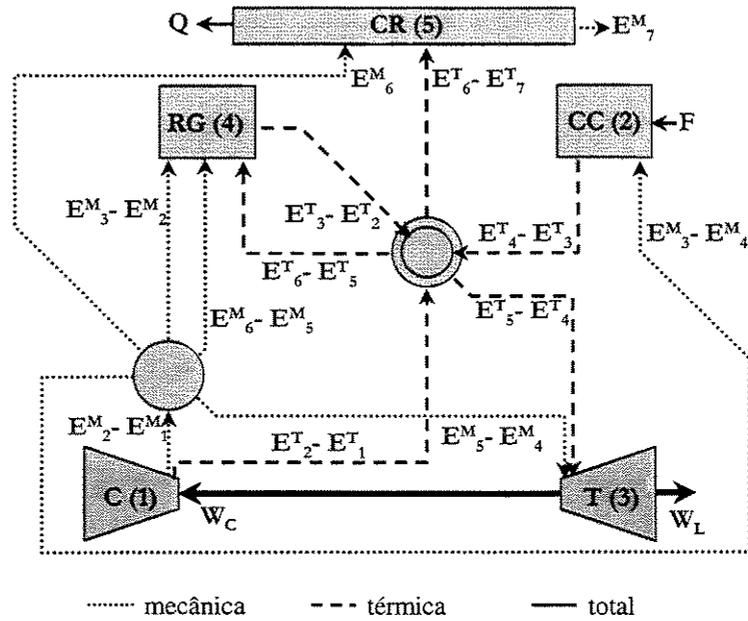


Figura 5.9: Diagrama produtivo na Teoria do Custo Exergético, considerando a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, internalizando a irreversibilidade externa (produto do compressor aumento da exergia mecânica).

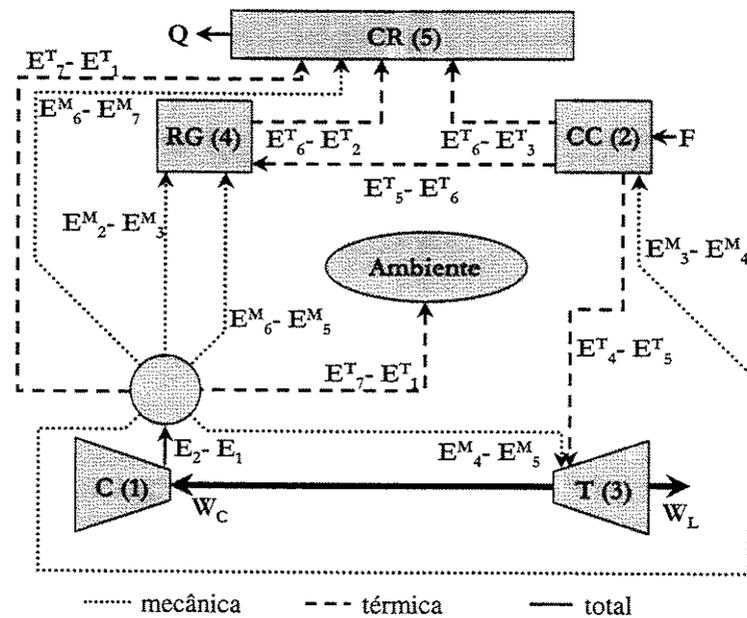


Figura 5.10: Diagrama produtivo na Exergoeconomia.

5.1.8 Exergoeconomia

A construção do diagrama produtivo na implementação da Exergoeconomia, apresentado na Figura 5.10, requer não apenas a interpretação das equações utilizadas como também dos valores das exergias térmica e mecânica dos fluxos. A razão desta segunda exigência está na natureza das equações suplementares utilizadas (equações 4.164 e 4.165), que utilizam o operacional definido pela equação 2.27. O operacional é reproduzido a seguir, por conveniência:

$$\langle e_a, e_b, e_c \rangle = \begin{cases} e_b - e_a & \text{se } e_b < e_c \\ e_c - e_a & \text{se } e_a \leq e_c \leq e_b \\ 0 & \text{se } e_c < e_a \end{cases} \quad (2.27)$$

A dinâmica da formação do diagrama estrutural na Exergoeconomia será demonstrada tomando como exemplo o custo da exergia térmica consumida pela turbina. Este será sempre a diferença entre os custos da corrente de exergia térmica na entrada e na saída da

unidade.

$$\dot{C}_{Ft}^T = \dot{m}(c_4^{mT} - c_5^{mT}) \quad (5.2)$$

O custo da exergia térmica da corrente 4, em base mássica, é determinado utilizando a equação (4.165)

$$c_4^{mT} = c_{Pc}^{eT} \langle e_1^T, e_2^T, e_4^T \rangle + c_{Prq}^{eT} \langle e_2^T, e_3^T, e_4^T \rangle + c_{Pcc}^{eT} \langle e_3^T, e_4^T, e_4^T \rangle \quad (5.3)$$

Considerando que a temperatura T_4 é a máxima do ciclo, implicando em máxima exergia térmica, verifica-se que seu custo é a soma dos custos de adição de exergia térmica em todos os componentes a montante: compressor, regenerador e câmara de combustão.

$$c_4^{mT} = c_{Pc}^{eT}(e_2^T - e_1^T) + c_{Prq}^{eT}(e_3^T - e_2^T) + c_{Pcc}^{eT}(e_4^T - e_3^T) \quad (5.4)$$

Já o custo específico em massa da exergia térmica da corrente na saída da turbina, ponto 5, determinado utilizando a equação (4.165), resulta em:

$$c_5^{mT} = c_{Pc}^{eT} \langle e_1^T, e_2^T, e_5^T \rangle + c_{Prq}^{eT} \langle e_2^T, e_3^T, e_5^T \rangle + c_{Pcc}^{eT} \langle e_3^T, e_4^T, e_5^T \rangle \quad (5.5)$$

Sobre a exergia térmica da corrente na saída da turbina (ponto 5), pode-se afirmar apenas que será menor que na entrada (ponto 4). A eficiência da turbina e a razão de compressão determinarão como ela se comparará com a exergia térmica da corrente entre o compressor e o regenerador (ponto 2) e entre este e a câmara de combustão (ponto 3). Na condição de ótimo estudada, a temperatura dos gases na saída da turbina é elevada, maior que a temperatura do ar admitido na câmara de combustão, viabilizando o uso econômico do regenerador e da caldeira de recuperação ¹. Neste caso,

$$c_5^{mT} = c_{Pc}^{eT}(e_2^T - e_1^T) + c_{Prq}^{eT}(e_3^T - e_2^T) + c_{Pcc}^{eT}(e_5^T - e_3^T). \quad (5.6)$$

Desta forma, nesta condição, a exergia térmica consumida pela turbina é originária apenas da câmara de combustão.

$$\dot{C}_{Ft}^T = \dot{m}c_{Pcc}^{eT}(e_4^T - e_5^T) \quad (5.7)$$

¹Os valores dos fluxos exergéticos estão relacionados na Tabela 3.4 e a vazão em massa de ar é constante e igual a 10,0 kg/s.

Analogamente, ainda na condição de ótimo, o custo específico em massa da exergia térmica das correntes 6 e 7 é determinado utilizando a equação 4.165. Como $e_1^T < e_7^T < e_2^T < e_6^T < e_3^T < e_4^T$,

$$c_6^{mT} = c_{Pc}^{eT}(e_2^T - e_1^T) + c_{Pr_g}^{eT}(e_6^T - e_2^T) \quad (5.8)$$

$$c_7^{mT} = c_{Pc}^{eT}(e_7^T - e_1^T). \quad (5.9)$$

Obtém-se então, seguindo o mesmo procedimento utilizado para a turbina, o custo da exergia térmica consumida no regenerador, equação (5.11).

$$\begin{aligned} \dot{C}_{Fr_g}^T &= \dot{m}(c_5^{mT} - c_6^{mT}) \\ &= \dot{m} \left[c_{Pcc}^{eT}(e_5^T - e_3^T) + c_{Pr_g}^{eT}(e_3^T - e_6^T) \right] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Ou seja, a exergia fornecida ao regenerador é proveniente da câmara de combustão e do próprio regenerador.

Finalmente, o custo da exergia térmica fornecida à caldeira de recuperação é a diferença de custos entre a corrente de ar que entra na unidade e a corrente de gases de escape, equação (5.12).

$$\begin{aligned} \dot{C}_{Fcr}^T &= \dot{m}(c_6^{mT} - c_7^{mT}) \\ &= \dot{m} \left[c_{Pr_g}^{eT}(e_6^T - e_2^T) + c_{Pr_g}^{eT}(e_2^T - e_7^T) \right] \end{aligned} \quad (5.11)$$

A caldeira de recuperação utiliza portanto o restante da exergia suprida pelo regenerador e parte da exergia fornecida pelo compressor. Como na Exergoeconomia o custo da exergia dos gases de escape é redistribuído em um passo separado, os gases de escape carregam consigo o custo da exergia suprida pelo compressor e não consumida em nenhuma outra unidade.

A exergia mecânica é fornecida por uma única unidade, o compressor, e os custos específicos em massa da exergia mecânica de todos os fluxos a jusante do regenerador

(correntes 3 a 7) são determinados pela equação 4.164.

$$c_i^{mM} = c_{Pc}^{eM} \langle e_1^M, e_2^M, e_i^M \rangle \quad (4.164)$$

Para cada unidade, exceto o compressor, o custo da exergia mecânica consumida é a diferença dos custos da exergia mecânica da corrente na entrada e na saída da unidade. O regenerador recebe duas parcelas de exergia, referentes às correntes de ar e gases.

O diagrama produtivo no que se refere aos fluxos de exergia mecânica não se modifica com alterações dos valores das variáveis independentes, diferentemente do que ocorre para os fluxos de exergia térmica. Isto se deve a, no sistema considerado, apenas uma unidade ser responsável pelo fornecimento desta parcela da exergia. Se um sistema mais complexo for considerado, como uma turbina a gás com resfriamento intermediário na compressão, isso se modificará.

5.1.9 Análise Comparativa

A comparação dos diagramas produtivos, tanto os construídos nesta seção quanto os apresentados no Capítulo 4, fornece indicações importantes a respeito das metodologias analisadas.

Em primeiro lugar, há uma identidade entre o diagrama funcional da Análise Funcional Termoeconômica (Figura 4.1) e o diagrama produtivo construído para a variante da Teoria do Custo Exergético, quando se considera a desagregação da exergia e se concentra a internaliza a irreversibilidade externa, tendo como produto do compressor o aumento da exergia total (Figura 5.8). Também se identificam o diagrama funcional, na versão em que a irreversibilidade é concentrada na caldeira de recuperação, e o diagrama produtivo da Teoria do Custo Exergético, quando a desagregação da exergia é considerada, mas nenhuma forma de redistribuição da irreversibilidade externa é utilizada (Figura 5.2). Ou seja, por duas vezes, duas estruturas produtivas idênticas foram construídas de forma diversa: uma através de postulados e outra através do traçado inicial de um diagrama. Para que isso acontecesse, foi necessária essencialmente a consistência na definição das unidades e das funções termodinâmicas dessas unidades.

Verifica-se também que são idênticos os diagramas produtivos utilizados pela Metodologia Estrutural (Figura 4.3) e o contruído para a variante da Teoria do Custo Exergético (Figura 5.6), que considera a desagregação da exergia e utiliza a neguentropia para redistribuir os custos da irreversibilidade externa, tendo o compressor a função de aumentar unicamente a exergia mecânica. Também aqui, isto decorre de uma definição consistente das unidades e de seus insumos, produtos e perdas.

O diagrama estrutural construído para a implementação da Exergoeconomia (Figura 5.10) indica uma inconsistência na metodologia. Neste diagrama, parte da exergia térmica consumida pela caldeira de recuperação origina-se no regenerador. A observação do funcionamento do sistema indica outra compreensão: o regenerador recupera a exergia dos gases de escape da turbina e a caldeira de recuperação emprega a exergia restante nesses gases para gerar vapor. Que uma parcela da exergia recuperada pelo regenerador, juntada à exergia fornecida pelo compressor e pela câmara combustão, seja utilizada na caldeira de recuperação, é compreensível. Não se encontra justificativa para que uma parcela da exergia da corrente de gases seja dela retirada a montante de uma unidade apenas para a ela retornar.

5.2 Tratamentos da Irreversibilidade Externa

Quatro diferentes tratamentos foram dados à irreversibilidade externa, gerada pela perda de uma corrente exergética. Esta perda pode ser uma imposição técnica, como no caso de correntes de gases de combustão cuja temperatura de chaminé deve exceder a temperatura de orvalho dos ácidos que carrega, ou econômica, devida às grandes áreas necessárias para troca de calor a pequenas diferenças de temperaturas.

No sistema de cogeração estudado, a irreversibilidade externa está associada à destruição da exergia térmica decorrente do resfriamento dos gases de escape; não há irreversibilidade associada à exergia de pressão porque a corrente de gases é liberada a pressão atmosférica. A temperatura dos gases de escape é superior à tecnicamente necessária mas, tendo sido determinada mediante um processo de otimização cuja função objetivo é econômica, sua redução implicaria em aumento do custo específico médio dos produtos.

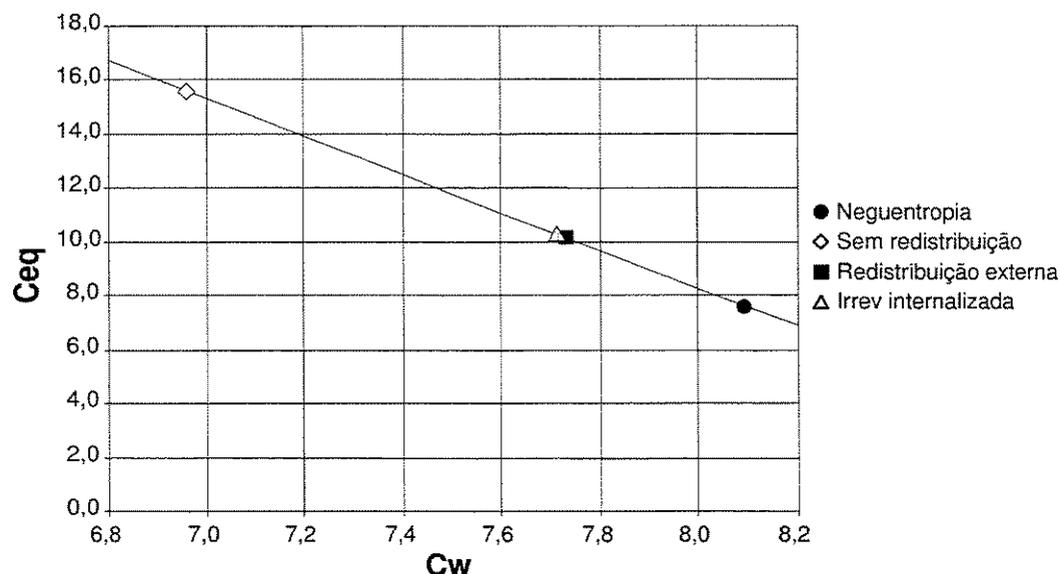


Figura 5.11: Custos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia total.

O tratamento elementar utilizado pela Teoria do Custo Exergético (Lozano e Valero, 1993a) corresponde a tratar a irreversibilidade externa como as demais perdas, das quais difere por estar associada a uma corrente cujo conteúdo exergético é utilizado por uma série de unidades antes de sua liberação para o ambiente. A consequência é a alocação dos custos dessa irreversibilidade ao último equipamento a extrair exergia da corrente. Entretanto, uma redução na temperatura máxima do ciclo diminuiria a temperatura de escape dos gases, mas implicaria em aumento do custo global do sistema. Seria questionável, portanto, taxar apenas a unidade que se encontra por último por uma decisão de projeto que afeta a todas as unidades consumidoras de exergia térmica.

A Metodologia Estrutural (Lozano e Valero, 1993b) utiliza a neguentropia para redistribuir os custos da irreversibilidade externa. Define para isso uma unidade virtual, a chaminé, onde ocorre o resfriamento dos gases até a temperatura ambiente, de certa forma internalizando a irreversibilidade externa. Os custos são distribuídos a cada unidade na

proporção do aumento da entropia da corrente. São incluídas nessa distribuição todas as unidades, consumidoras ou não de exergia térmica.

O tratamento proposto por Frangopoulos (1994) consiste em internalizar a irreversibilidade externa, concentrando-a em uma unidade virtual, a junção, que recebe toda a exergia térmica produzida pelas unidades do sistema e distribui às unidades consumidoras somente na quantidade consumida. Desta forma, as unidades consumidoras de exergia térmica são taxadas na proporção em que usam esta exergia.

Finalmente, Tsatsaronis e Pisa (1994) atribuem custo à corrente de gases de escape, redistribuindo este custo, em uma etapa posterior, entre os produtos externos do sistema, na proporção de suas exergias. No caso particular aqui estudado, os custos internos ao sistema não são afetados, em comparação com o tratamento elementar, já que o produto da caldeira de recuperação é externo.

Embora não tenha sido possível determinar a superioridade de um dos tratamentos anteriores, é possível comparar as conseqüências da adoção de cada um deles, na determinação dos custos dos produtos das unidades e dos produtos externos do sistema.

O gráficos das Figura 5.11 e 5.12 mostram os custos específicos da exergia do calor transferido na caldeira de recuperação e da potência mecânica produzida pela turbina, em variantes da implementação básica e da variante desagregada da Teoria do Custo Exergético, correspondentes aos quatro tratamentos descritos. Nas variantes em que a exergia é desagregada em suas parcelas térmica e mecânica, considerou-se apenas um produto para o compressor (aumento da exergia total da corrente). O conjunto de possíveis pares de custos para a condição de ótimo do sistema são representados pela reta traçada, uma vez que os produtos e o custo total são constantes.

Em ambas as figuras, as variações no custo da exergia do calor produzido são mais amplas em função da elevada relação trabalho/calor do sistema. As variantes correspondentes ao tratamento elementar apresentam, como esperado, os maiores custos do calor produzido. O uso da neguentropia determina o menor valor para o custo do calor e as demais variantes apresentam valores intermediários e próximos entre si.

Uma melhor compreensão dos efeitos do tratamento da irreversibilidade pode ser conseguido através da análise dos custos dos produtos das unidades. Esses são plotados no

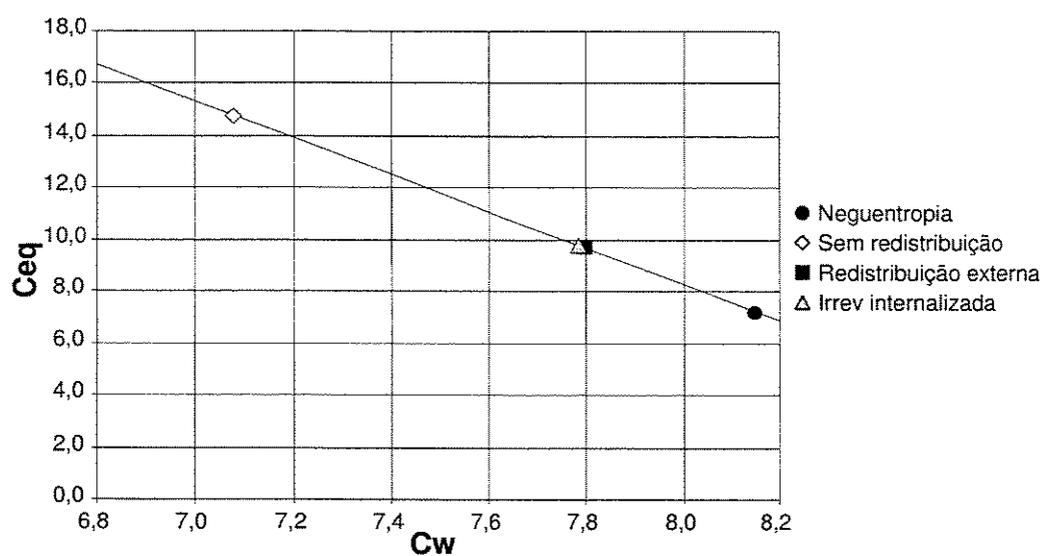


Figura 5.12: Custos específicos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia desagregada (produto do compressor aumento da exergia total).

gráfico da Figura 5.13, para as variantes da Teoria do Custo Exergético que consideram a desagregação da exergia e o aumento da exergia total como função do compressor. Para as unidades cujos produtos são também produtos do sistema, no caso da variante em que os custos da irreversibilidade são redistribuídos externamente, plotam-se os dois custos, interno e externo. Os custos internos determinados por esse tratamento e pelo tratamento elementar são idênticos, exceto para o calor transferido pela caldeira de recuperação, que é menor no primeiro, já que o custo da exergia térmica dos gases de escape é redistribuído. Os custos dos produtos determinados por essas variantes são, com exceção do calor transferido, os mais baixos.

Os maiores custos são determinados pelo uso da neguentropia; em especial, o custo da exergia mecânica fornecida pelo compressor é mais elevado. Há aí um processo de realimentação, já que o compressor utiliza a potência mecânica suprida pela turbina que, por sua vez, é a maior consumidora de exergia mecânica. Além disso, o tratamento premia produtos de sistemas em que a variação da entropia é negativa, como a caldeira de recuperação e o regenerador, lado dos gases.

A internalização da irreversibilidade eleva o custo da exergia térmica e dos produtos das unidades consumidoras de exergia térmica. Assim, os custos internos dos produtos determinados pela internalização da irreversibilidade são intermediários, em geral menores que os da variante neguentrópica e maiores que os das demais. Apenas para o calor transferido na caldeira isso se altera, os custos determinados pelo tratamento elementar sendo os mais altos e os determinados pela neguentropia os mais reduzidos. Tanto o custo interno quanto o externo calculados pela redistribuição externa são menores, o segundo por margem reduzida.

5.3 Efeitos da Desagregação da Exergia

A utilização da exergia como único parâmetro de medida do valor das correntes encobre inevitavelmente informações sobre as correntes energéticas. A utilização das parcelas devidas a aumentos da temperatura e da pressão na exergia de uma corrente possibilita a manutenção de maior parcela da informação. Embora todas as metodologias utilizadas permitam que se trabalhe com a exergia total ou dividida em parcelas, apenas para a

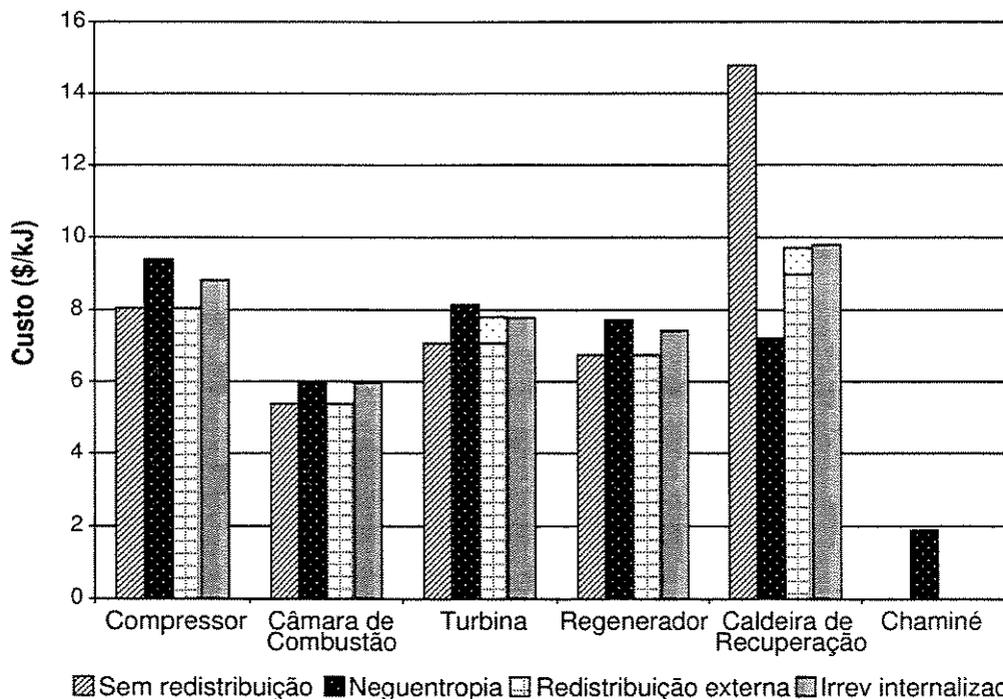


Figura 5.13: Custos específicos dos produtos das unidades em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia desagregada (produto do compressor aumento da exergia total).

Teoria do Custo Exergético a primeira opção é a condição padrão.

Para analisar os efeitos da separação da exergia sobre os custos dos produtos do sistema, tomaram-se como exemplos dois conjuntos de variantes da Teoria do Custo Exergético, um de variantes que consideram a exergia total e outro de variantes que consideram a exergia desagregada. Para minorar outros efeitos, consideraram-se no segundo conjunto apenas as variantes que consideram função do compressor o aumento da exergia total. Assim, entre variantes com um mesmo tratamento para a irreversibilidade externa, apenas a câmara de combustão e o regenerador apresentam diferenças nas definições de insumos e produtos. Para a câmara de combustão, a variação da exergia mecânica da corrente faz parte dos produtos, no conjunto de variantes de exergia total, e dos insumos, nas variantes de exergia desagregada. Similarmente, para o regenerador, a variação da exergia mecânica da corrente de ar é insumo nas variantes de exergia total e produto nas de exergia desagregada. Para as demais unidades, as definições são idênticas.

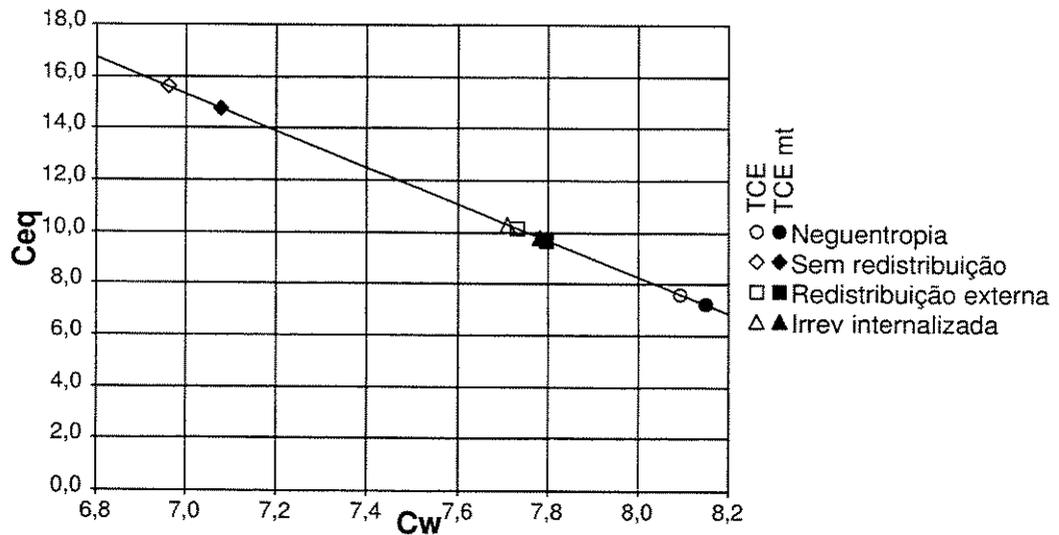


Figura 5.14: Custos específicos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético, exergia total (símbolos vazados) e desagregada (símbolos cheios), considerando como produto do compressor o aumento da exergia total.

O gráfico da Figura 5.14 ilustra o efeito da desagregação da exergia sobre os custos dos produtos do sistema. Observa-se que os custos calculados para a potência aumentam quando a desagregação é feita, para qualquer tratamento dado à irreversibilidade externa. As causas deste aumento consistente estão no custo da adição de exergia mecânica no compressor e da produção de potência na turbina. Também aqui verifica-se uma realimentação: o compressor utiliza um insumo de custo elevado, a potência da turbina, e conseqüentemente seu produto, a elevação da exergia da corrente de ar, tem também custo elevado. Entretanto, apenas uma pequena parcela desse aumento corresponde à exergia térmica (cerca de um quarto do aumento da exergia total). Desta forma, quando a exergia é desagregada, a turbina, unidade consumidora de exergia mecânica, é penalizada, elevando ainda mais o custo da potência de eixo e da exergia mecânica. As unidades que consomem preponderantemente exergia térmica, por outro lado, tem o custo de seu principal insumo

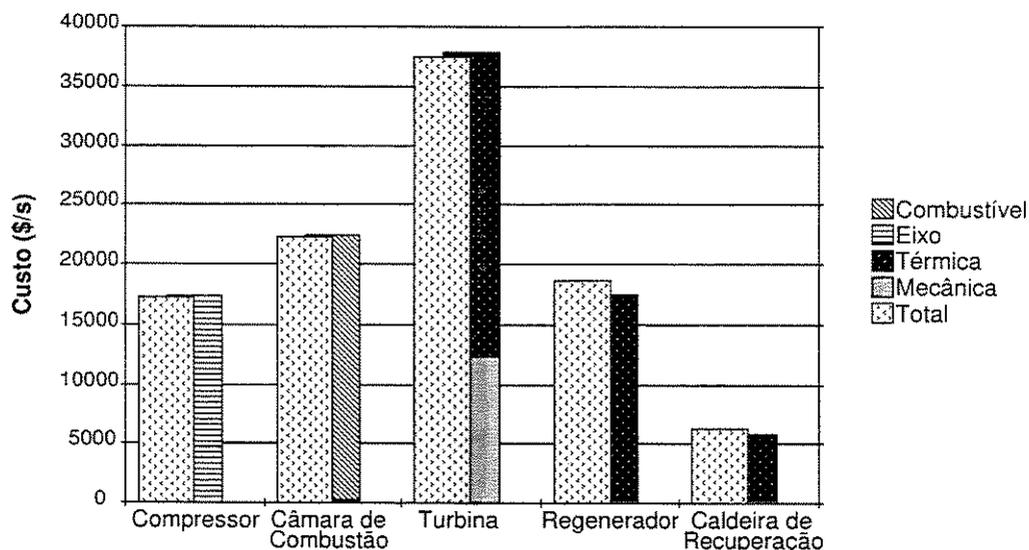


Figura 5.15: Custos totais dos insumos em variantes da Teoria do Custo Exergético, irreversibilidade internalizada, exergia total, colunas à esquerda, e desagregada (função do compressor aumento da exergia total), colunas à direita.

reduzido.

O gráfico da Figura 5.15 mostra a variação nos custos totais dos insumos das unidades, para variantes que internalizam a irreversibilidade, considerando a exergia total e desagregada. Observa-se que, embora a variação seja pequena, o custo dos insumos aumenta para a turbina e para o compressor. Embora um aumento apareça também para a câmara de combustão, deve-se, como observado, a diferentes definições de insumo da unidade. Diminuem os custos dos insumos do regenerador e da caldeira de recuperação.

Como mostra a observação do mesmo gráfico, é pequena a diferença entre os custos totais dos produtos determinada por duas variantes quaisquer que utilizem o mesmo tratamento para a irreversibilidade externa, se comparada à variação encontrada quando se comparam os resultados de duas variantes com diferentes tratamentos. Pode-se assim dizer que a importância da desagregação da exergia para um sistema desse tipo está principalmente na qualidade da informação fornecida sobre o funcionamento do sistema e não em diferenças quanto aos custos determinados para os produtos.

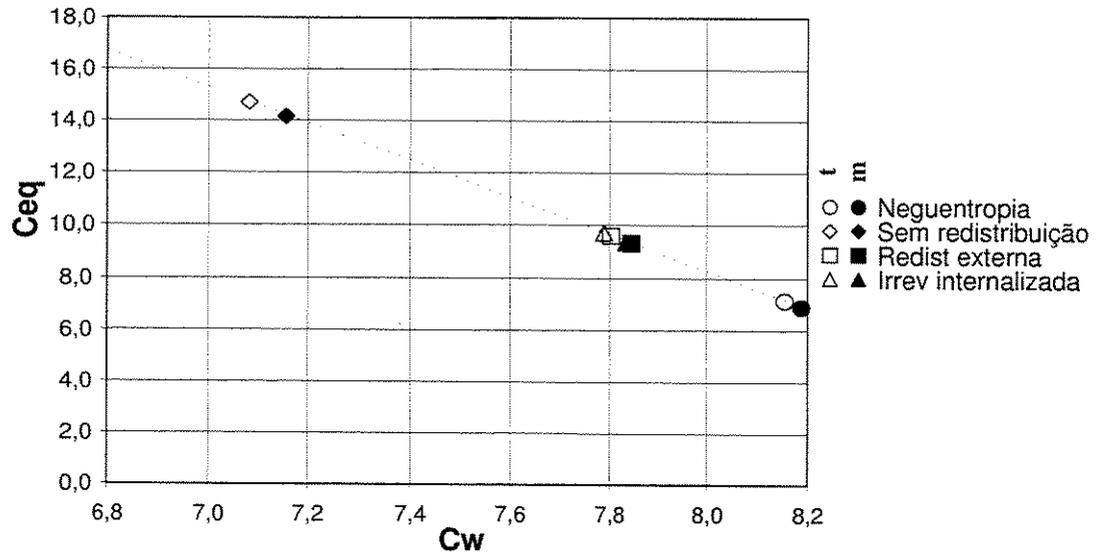


Figura 5.16: Custos específicos dos produtos externos em variantes da Teoria do Custo Exergético exergia desagregada (função do compressor aumento da exergia total, pontos vazados e aumento da exergia mecânica, pontos negros).

5.4 Efeitos da Definição de Subprodutos

O produto do compressor no sistema estudado, assim como outras unidades em outros sistemas, é a soma de duas parcelas, o aumento da exergia térmica e mecânica. Na implementação da Análise Funcional Termoeconômica, da Teoria do Custo Exergético e da Exergoeconomia, os custos específicos dos incrementos das duas parcelas são igualados. A justificativa é que, sendo único o processo produtivo, é impossível separar os custos relativos a cada parcela do produto. Introduzida pela Metodologia Estrutural, a definição de subproduto utiliza a valoração externa da parcela secundária do produto (no caso do compressor, o aumento da exergia térmica).

No gráfico da Figura 5.16 são mostrados os custos específicos dos produtos externos de variantes da Teoria do Custo Exergético. Todas as variantes consideram a exergia

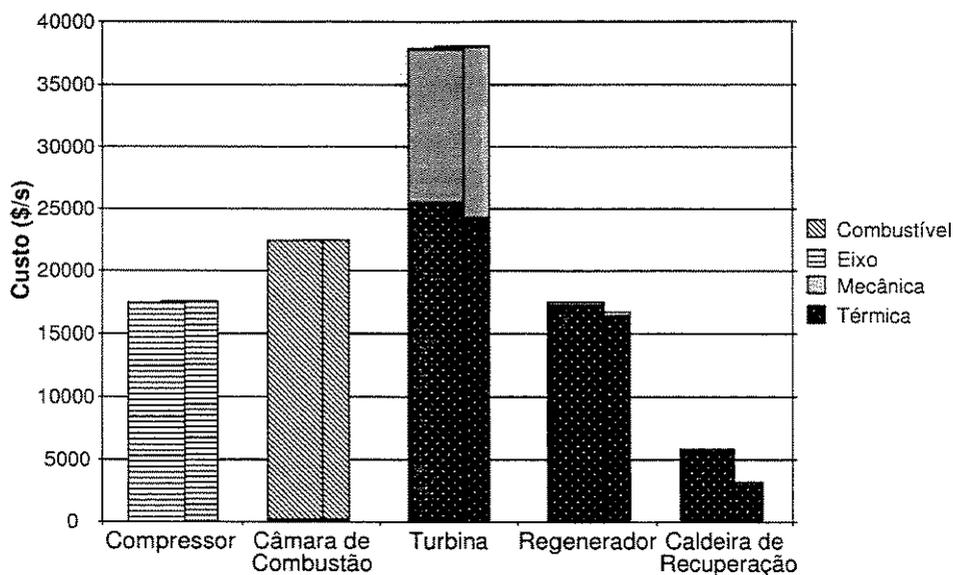


Figura 5.17: Custos dos insumos das unidades em variantes da Teoria do Custo Exergético exergia desagregada, considerando como produto do compressor o aumento da exergia mecânica, colunas à esquerda, e o aumento da exergia total, à direita.

desagregada em parcelas térmica e mecânica, mas dois grupos são definidos, o primeiro considerando como função do compressor o aumento da exergia total e o segundo da exergia mecânica. Em cada grupo consideram-se os quatro tratamentos da irreversibilidade externa.

Observa-se que os custos da potência são sistematicamente maiores quando o conceito de subproduto é adotado. Novamente, a elevação dos custos da exergia mecânica é responsável por este efeito, como pode ser observado na Figura 5.17, onde se apresentam os custos dos insumos para cada unidade, nas variantes que consideram a irreversibilidade internalizada. Embora a turbina seja também grande consumidora de exergia térmica, cujo custo se reduz, é a maior consumidora de exergia mecânica, cujo custo se eleva (ver também a figura 5.18).

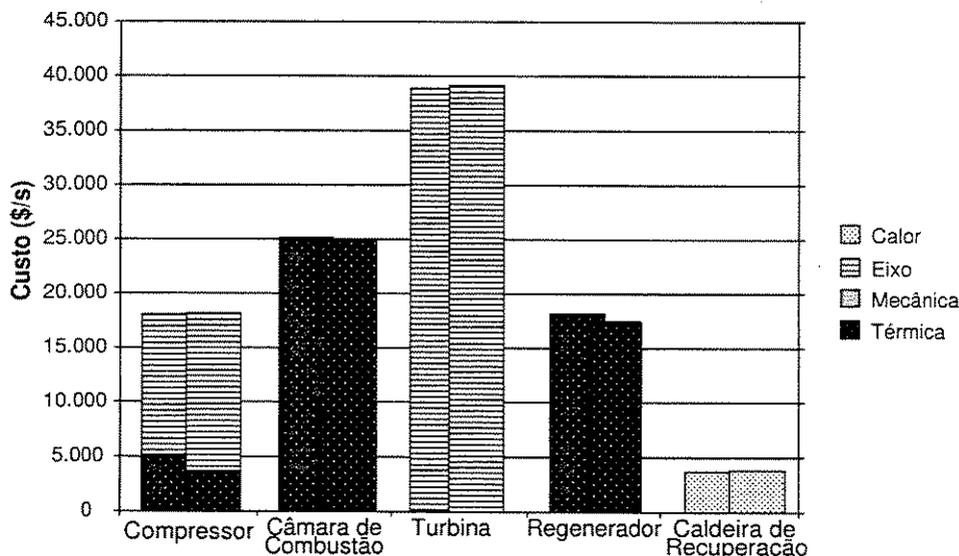


Figura 5.18: Custos dos produtos das unidades em variantes da Teoria do Custo Exergético exergia desagregada, considerando como produto do compressor o aumento da exergia mecânica, colunas à esquerda, e o aumento da exergia total, à direita.

5.5 Custos dos produtos externos

Os custos específicos externos da potência e do calor transferido para todas as metodologias e variantes são plotados no gráfico da Figura 5.19. Observa-se que são próximos os custos determinados por diferentes metodologias mas com igual tratamento para a irreversibilidade externa. Os que utilizam um tratamento elementar estão agrupados à esquerda, com elevados custos para o calor transferido, enquanto o que utilizam a neguentropia estão à direita, apresentando custos mais elevados para a potência. Ao centro agrupam-se as metodologias que internalizam a irreversibilidade e as que a redistribuem externamente, em proporção aos fluxos exergéticos dos produtos.

A exceção a este padrão é a Exergoeconomia, que apresenta elevados custos para o calor, embora empregue uma redistribuição externa. A análise do diagrama produtivo aponta que, para essa metodologia, a caldeira de recuperação opera com exergia fornecida tanto pela câmara de combustão como pelo regenerador e mesmo pelo compressor, enquanto toda a exergia térmica consumida pela turbina é suprida pela câmara de combustão. Essa é a

responsável pelo suprimento original de exergia térmica ao sistema, sendo todos os demais suprimentos derivados, de custo mais alto.

Comprova-se também, através da observação do gráfico, que metodologias que apresentam o mesmo diagrama funcional, indicando mesmas definições de unidades e mesmo tratamento dado à irreversibilidade externa, determinam custos iguais para os produtos do sistema. Isso ocorre para a Análise Funcional Termoeconômica, na implementação que internaliza a irreversibilidade externa, e para a Teoria do Custo Exergético, na variante que considera, além do mesmo tratamento à irreversibilidade externa, a desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica, tendo o compressor a função de elevar a exergia total da corrente. Também são idênticos os resultados das mesmas metodologias quando se permite que todo o custo da irreversibilidade externa recaia sobre a caldeira de recuperação. Finalmente, quando a neguentropia é utilizada e a exergia desagregada, definindo-se ainda o subproduto do compressor, a Teoria do Custo Exergético e a Metodologia Estrutural determinam os mesmos valores para os custos da potência e do calor transferido.

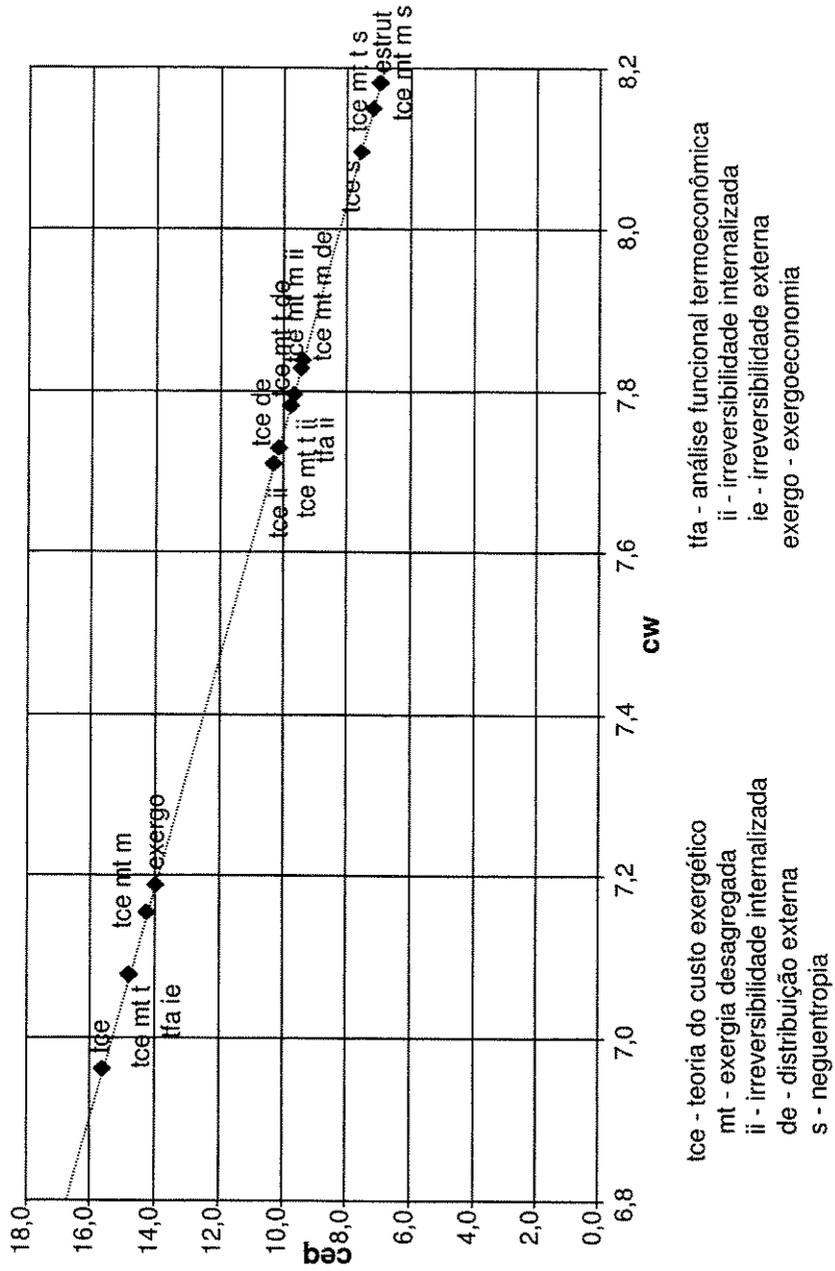


Figura 5.19: Custos para potência e calor obtidos pelas diferentes metodologias.

Capítulo 6

Conclusões

As técnicas de análise termoeconômica de sistemas, criadas para satisfazer à demanda por ferramentas de análise e aperfeiçoamento de sistemas térmicos, têm permanecido até o momento no domínio quase exclusivo das instituições acadêmicas. Além da barreira representada pela utilização de conceitos derivados da segunda lei da termodinâmica, a pluralidade de metodologias, implicando em diversidade dos resultados encontrados, representa importante obstáculo à generalização do uso das técnicas.

As metodologias termoeconômicas consideradas neste trabalho, selecionadas entre as mais destacadas da literatura, podem ser divididas em duas vertentes, uma primordialmente voltada à otimização e outra mais afeita à análise e ao aperfeiçoamento de sistemas. As metodologias pertencentes à primeira vertente requerem para sua aplicação a definição de modelos termodinâmico e econômico do sistema, cuja confiabilidade determina a qualidade do resultado ótimo obtido. Na segunda vertente agrupam-se metodologias que requerem apenas um *retrato* do sistema estudado, em retorno oferecendo informações elaboradas sobre o funcionamento do mesmo.

As metodologias da primeira vertente requerem uma definição prévia da estrutura produtiva (ou funcional), definidora da rede de trocas de insumos e produtos entre as unidades em que se divide o sistema. A representação gráfica, denominada diagrama produtivo (ou funcional), facilita a interpretação da estrutura. As metodologias agrupadas na segunda vertente são díspares no que diz respeito à definição da estrutura produtiva do sistema.

Entre as três metodologias estudadas, a Teoria do Custo Exergético requer a definição de uma estrutura produtiva, indicando insumos, produtos e perdas para cada unidade, sem entretanto explicitar relações entre unidades; a Exergoeconomia não requer qualquer definição prévia, deixando que a estrutura se defina na aplicação; e a Metodologia Estrutural requer, como as metodologias da primeira vertente, a definição de estrutura e diagrama produtivos.

Apesar dessas diferenças, todas as metodologias se encontram na atribuição de custos aos produtos externos ao sistema. Distintas definições de produtos internos dificultam, se não impedem, a comparação dos custos a eles atribuídos.

Neste trabalho, quatro proeminentes metodologias, pertencentes a ambas as vertentes, foram aplicadas a um sistema de cogeração. O sistema, constituído por uma turbina a gás regenerativa e uma caldeira de recuperação, apresenta a complexidade necessária para destacar as diferenças entre as metodologias sem um excesso que sirva de empecilho à compreensão.

Tendo como base os sistemas de equações resultantes da aplicação das metodologias, construíram-se diagramas produtivos para as metodologias nas quais não são condição prévia. Comparados entre si e com os diagramas previamente estabelecidos, levaram a importantes conclusões, indicando uma convergência entre os diferentes métodos. Definições consistentes de unidades e produtos de unidades levam a idênticos diagramas produtivos, que por sua vez levam a idênticos resultados, independentemente da vertente à qual se filia a metodologia empregada. A observação do diagrama produtivo estabelecido pela aplicação da Exergoeconomia indica uma compreensão equivocada da operação do sistema, razão pela qual o uso desta metodologia é desaconselhado.

Com relação à irreversibilidade externa, originada pela liberação de uma corrente portadora de exergia para o ambiente, corrente essa que, ao cruzar diversas unidades, forneceu insumos ao sistema, quatro tratamentos foram distinguidos. O tratamento elementar, que corresponde a alocar todo o custo associado à irreversibilidade externa ao produto do último sistema a jusante da corrente, não é uma opção recomendável, porque atribui a um único equipamento a responsabilidade pelo uso inadequado dos recursos exergéticos. Entre a redistribuição pela neguentropia, a internalização da irreversibilidade e a redistribuição externa, não foi possível determinar qual o mais adequado. Entretanto, as conseqüências

de cada opção foram delineadas, e determinou-se ser a escolha do tratamento da irreversibilidade externa, dentre as opções estudadas, a que maiores variações provoca entre os custos dos produtos do sistema.

A desagregação da exergia em parcelas térmica e mecânica foi considerada. Para o sistema estudado, cujo modelo considera gás ideal como fluido de trabalho, esta decomposição não apresenta maiores dificuldades. Os resultados obtidos para os produtos externos do sistema apresentaram variações reduzidas, na comparação entre a análise agregada e desagregada, se comparadas com as encontradas com diferentes tratamentos dados à irreversibilidade externa. Concluiu-se, assim, que a desagregação da exergia encontra justificativa na obtenção de informação mais completa sobre o funcionamento do sistema.

Analizou-se ainda a definição de múltiplos produtos para uma unidade, sendo um principal e os demais subprodutos, seguindo a definição da Metodologia Estrutural. A utilização dessa definição deve ser feita com precaução, visto que não há justificativa teórica para a atribuição externa de custos para subprodutos e que, além disso, no sistema estudado, as diferenças entre os custos dos produtos internos e externos estabelecida pela introdução desse conceito são pequenas.

Informações adicionais são necessárias para que as questões parcialmente respondidas neste trabalho recebam solução conclusiva. Para isso é recomendado o desenvolvimento posterior deste trabalho, especialmente a aplicação das metodologias a um sistema de cogeração com turbina de contra-pressão e a um sistema de potência com ciclo combinado. Para esses problemas, a definição das parcelas térmica e mecânica da exergia do vapor será, certamente, problemática. Também importante é a extensão das metodologias de forma a permitir sua aplicação a sistemas da indústria química e alimentícia. Finalmente, somente a aplicação prática das metodologias permitirá a validação real e a determinação de seus limites.

Apêndice A

Coeficientes de Produção na Aplicação da Metodologia Estrutural

Neste Apêndice são reproduzidas as relações para os coeficientes técnicos de produção utilizados na implementação da Metodologia Estrutural, na forma como são apresentadas originalmente (Lozano e Valero, 1993b). Apenas a nomenclatura, no que se refere aos coeficientes, é adaptada para o padrão adotado no presente trabalho. Nestas equações r_{ti} e r_{pi} representam, respectivamente, a temperatura e a pressão no estado i relativas à condição ambiente.

$$r_{ti} = \frac{T_i}{T_o} \quad (\text{A.1})$$

$$r_{pi} = \frac{p_i}{p_o} \quad (\text{A.2})$$

Compressor (Unidade 1)

$$k_{7.1} = \frac{c_p (r_{t2} - 1 - \log r_{t2})}{(R \log r_{p2})} \quad (\text{A.3})$$

$$k_{3.1} = \frac{c_p (r_{t2} - 1)}{R \log r_{p2}} \quad (\text{A.4})$$

$$k_{6.1} = k_{3.1} - k_{7.1} - 1 \quad (\text{A.5})$$

Câmara de Combustão (Unidade 2)

$$k_{1.2} = \frac{R \log \left(\frac{r_{p3}}{r_{p4}} \right)}{c_p \left[r_{t4} - r_{t3} - \log \left(\frac{r_{t4}}{r_{t3}} \right) \right]} \quad (\text{A.6})$$

$$k_{6.2} = k_{o.2} + k_{1.2} - 1 \quad (\text{A.7})$$

Turbina (Unidade 3)

$$k_{7.3} = 1 - \frac{\log \left(\frac{r_{t4}}{r_{t5}} \right)}{(r_{t4} - r_{t5})} \quad (\text{A.8})$$

$$k_{1.3} = \frac{R \log \left(\frac{r_{p4}}{r_{p5}} \right)}{c_p (r_{t4} - r_{t5})} \quad (\text{A.9})$$

$$k_{6.3} = k_{7.3} + k_{1.3} - 1 \quad (\text{A.10})$$

Regenerador (Unidade 4)

$$k_{7.4} = \frac{r_{t5} - r_{t6} - \log \left(\frac{r_{t5}}{r_{t6}} \right)}{r_{t3} - r_{t2} - \log \left(\frac{r_{t3}}{r_{t2}} \right)} \quad (\text{A.11})$$

$$k_{1.4a} = \frac{R \log \left(\frac{r_{p2}}{r_{p3}} \right)}{c_p \left[r_{t3} - r_{t2} - \log \left(\frac{r_{t3}}{r_{t2}} \right) \right]} \quad (\text{A.12})$$

$$k_{1.4g} = \frac{R \log \left(\frac{r_{p5}}{r_{p6}} \right)}{c_p \left[r_{t3} - r_{t2} - \log \left(\frac{r_{t3}}{r_{t2}} \right) \right]} \quad (\text{A.13})$$

$$k_{6.4} = k_{7.4} + k_{1.4a} + k_{1.4g} - 1 \quad (\text{A.14})$$

Caldeira de recuperação (Unidade 5)

$$k_{7.5} = \frac{r_{t6} - r_{t7} - \log \left(\frac{r_{t6}}{r_{t7}} \right)}{(r_{t6} - r_{t7}) (1 - T_o/T_v)} \quad (\text{A.15})$$

$$k_{1.5} = \frac{R \log r_{p6}}{c_p (r_{t6} - r_{t7}) (1 - T_o/T_v)} \quad (\text{A.16})$$

$$k_{6.5} = \frac{1}{1 - T_o/T_v} - k_{7.5} - k_{1.5} \quad (\text{A.17})$$

Chaminé (Unidade 6)

$$k_{7.6} = \frac{r_{t7} - 1}{\log r_{t7}} - 1 \quad (\text{A.18})$$

Junção (Unidade 7)

$$r_{2.7} = 1 - r_{4.7} \quad (\text{A.19})$$

$$r_{4.7} = \frac{r_{t3} - r_{t2} - \log \left(\frac{r_{t3}}{r_{t2}} \right)}{r_{t4} - r_{t2} - \log \left(\frac{r_{t4}}{r_{t2}} \right)} \quad (\text{A.20})$$

Coefficientes de produção externos

$$k_{o.2} = \frac{(r_{t4} - r_{t3})}{r_{t4} - r_{t3} - \log \left(\frac{r_{t4}}{r_{t3}} \right)} \quad (\text{A.21})$$

Coefficientes de custos não-exergéticos

$$k_{z1} = \frac{\dot{Z}_c}{(mRT_o) \log r_{p2}} \quad (\text{A.22})$$

$$k_{z2} = \frac{\dot{Z}_{cc}}{(mc_p T_o) \left[r_{t4} - r_{t3} - \log \left(\frac{r_{t4}}{r_{t3}} \right) \right]} \quad (\text{A.23})$$

$$k_{z3} = \frac{\dot{Z}_t}{(mc_p T_o) (r_{t4} - r_{t5})} \quad (\text{A.24})$$

$$k_{z4} = \frac{\dot{Z}_{rg}}{(mc_p T_o) \left[r_{t3} - r_{t2} - \log \left(\frac{r_{t3}}{r_{t2}} \right) \right]} \quad (\text{A.25})$$

$$k_{z5} = \frac{\dot{Z}_{cr}}{(mc_p T_o) (r_{t6} - r_{t7}) (1 - T_o/T_v)} \quad (\text{A.26})$$

Apêndice B

Resultados obtidos pela aplicação da Análise Funcional Termoeconômica

Tabela B.1: Custos dos produtos na Análise Funcional Termoeconômica

Unidade	Produto	Irreversibilidade externa	
		Internalizada	Caldeira
Compressor	y_1	8,815	8,044
Câmara de Combustão	y_2	5,379	5,375
Turbina	y_3	7,783	7,077
Regenerador	y_4	7,428	6,743
Caldeira de Recuperação	y_5	9,799	14,784
Junção	y_6	6,695	6,052

Apêndice C

Resultados obtidos pela aplicação da Teoria do Custo Exergético

C.1 Variantes que consideram a exergia total

Os custos obtidos pela aplicação da Teoria do Custo Exergético, considerando a exergia total, são apresentados nesta seção. Para a variante que utiliza o tratamento elementar da irreversibilidade externa, os custos são apresentados nas Tabelas C.1 e C.2. As Tabelas C.3 e C.4 apresentam os custos dos fluxos e dos insumos e produtos das unidades, respectivamente, para a variante que utiliza a neguentropia para redistribuição da irreversibilidade externa. Os custos determinados pela internalização da irreversibilidade são apresentados nas Tabelas C.5 e C.6. Finalmente, os custos referentes à variante em que os custos da irreversibilidade externa são redistribuídos em uma segunda etapa são apresentados nas Tabelas C.7 e C.8.

Tabela C.1: Custos da exergia dos fluxos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1	0,0	—
\dot{E}_2	16219,9	7,917
\dot{E}_3	33625,5	7,516
\dot{E}_4	56070,7	6,475
\dot{E}_5	22334,4	6,475
\dot{E}_6	5611,5	6,475
\dot{E}_7	0,0	0,000
\dot{W}_L	19205,1	6,961
\dot{W}_c	15584,1	6,961
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	6093,6	15,606

Tabela C.2: Custos dos produtos e dos insumos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos	Insumos
Compressor	7,917	6,961
Câmara de Combustão	5,362	4,000
Turbina	6,961	6,475
Regenerador	7,176	6,475
Caldeira de Recuperação	15,606	6,475

Tabela C.3: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1	0,0	—
\dot{E}_2	19151,9	9,349
\dot{E}_3	39474,4	8,823
\dot{E}_4	64759,6	7,478
\dot{E}_5	25795,4	7,478
\dot{E}_6	6481,0	7,478
\dot{E}_7	2799,3	7,478
\dot{S}_1	0,0	—
\dot{S}_2	393,0	2,068
\dot{S}_3	3979,2	2,068
\dot{S}_4	6819,2	2,068
\dot{S}_5	7259,4	2,068
\dot{S}_6	3998,6	2,068
\dot{S}_7	2799,3	2,068
\dot{W}_L	22334,1	8,095
\dot{W}_c	18123,2	8,095
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	2964,6	7,592

Tabela C.4: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos		Insumos
	\dot{E}	\dot{S}	
Compressor	9,349	8,095	2,068
Câmara de Combustão	6,040	4,000	2,068
Turbina	8,095	7,478	2,068
Regenerador	8,379	7,478	2,068
Caldeira de Recuperação	7,592	7,478	2,068
Chaminé	2,068	7,478	—

Tabela C.5: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, internalizando a irreversibilidade externa

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1	0,0	-
\dot{E}_2	17.899,2	8,737
\dot{E}_3	37.163,1	8,306
\dot{E}_4	62.301,3	7,194
\dot{E}_5	24.816,2	7,194
\dot{E}_6	6.235,0	7,194
\dot{E}_7	2.693,0	7,194
\dot{W}_L	21.274,6	7,711
\dot{W}_c	17.263,4	7,711
\dot{F}	22.238,2	4,000
\dot{E}_Q	4.024,1	10,306

Tabela C.6: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, internalizando a irreversibilidade externa (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos	Insumos
Compressor	8,737	7,711
Câmara de Combustão	6,005	4,000
Turbina	7,711	7,194
Regenerador	7,942	7,194
Caldeira de Recuperação	10,306	7,194

Tabela C.7: Custos da exergia dos fluxos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1	0,0	—
\dot{E}_2	16.219,9	7,917
\dot{E}_3	33.625,5	7,516
\dot{E}_4	56.070,7	6,475
\dot{E}_5	22.334,4	6,475
\dot{E}_6	5.611,5	6,475
\dot{E}_7	2.423,7	6,475
\dot{W}_L	19.205,1	6,961
\dot{W}_c	15.584,1	6,961
\dot{F}	22.238,2	4
\dot{E}_Q	3.669,9	9,399
\dot{W}_L°	21328,3	7,731
\dot{E}_Q°	3970,4	10,168

Tabela C.8: Custos dos produtos internos e dos insumos na implementação básica da Teoria do Custo Exergético, redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos	Insumos
Compressor	7,917	6,961
Câmara de Combustão	5,362	4,000
Turbina	6,961	6,475
Regenerador	7,176	6,475
Caldeira de Recuperação	9,399	6,475

C.2 Variantes que consideram a exergia desagregada, função do compressor aumento da exergia total

Os resultados obtidos pelas variantes da Teoria do Custo Exergético que consideram a desagregação da exergia e um único produto para o compressor, o aumento da exergia total, são apresentados nesta seção. Nas tabelas C.9 e C.10 apresentam-se os custos para o tratamento elementar da irreversibilidade externa e nas tabelas C.11 e C.12 os custos para a variante que utiliza a neguentropia. Os resultados da variante em que se internaliza a irreversibilidade são apresentados nas tabelas C.13 e C.14. Finalmente, a variante em que os custos da irreversibilidade externa são redistribuídos externamente, em uma segunda etapa, são apresentados nas tabelas C.15 e C.16.

Tabela C.9: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia total)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	—
\dot{E}_2^T	4683,4	8,044
\dot{E}_3^T	21178,4	6,993
\dot{E}_4^T	43792,1	6,052
\dot{E}_5^T	20705,8	6,052
\dot{E}_6^T	5108,6	6,052
\dot{E}_7^T	0,0	0,000
\dot{E}_1^M	0,0	—
\dot{E}_2^M	11796,8	8,044
\dot{E}_3^M	11628,4	8,044
\dot{E}_4^M	11459,9	8,044
\dot{E}_5^M	228,8	8,044
\dot{E}_6^M	182,1	8,044
\dot{E}_7^M	0,0	—
\dot{W}_L	19525,9	7,077
\dot{W}_c	15844,5	7,077
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	5772,8	14,784

Tabela C.10: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia total) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	8,044	8,044	—	—	—	7,077
Câmara de Combustão	5,375	—	—	—	8,044	4,000
Turbina	—	—	7,077	6,052	8,044	—
Regenerador	6,743	—	—	6,052	8,044	—
Caldeira de Recuperação	—	—	14,784	6,052	8,044	—

Tabela C.11: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	—
\dot{E}_2^T	5467,6	9,391
\dot{E}_3^T	24372,5	8,048
\dot{E}_4^T	49618,7	6,858
\dot{E}_5^T	23460,8	6,858
\dot{E}_6^T	5788,3	6,858
\dot{E}_7^T	2567,1	6,858
\dot{E}_1^M	0,0	—
\dot{E}_2^M	13772,2	9,391
\dot{E}_3^M	13575,6	9,391
\dot{E}_4^M	13379,0	9,391
\dot{E}_5^M	267,1	9,391
\dot{E}_6^M	212,6	9,391
\dot{E}_7^M	0,0	—
\dot{S}_1	0,0	—
\dot{S}_2	360,4	1,896
\dot{S}_3	3649,2	1,896
\dot{S}_4	6253,6	1,896
\dot{S}_5	6657,2	1,896
\dot{S}_6	3666,9	1,896
\dot{S}_7	2567,1	1,896
\dot{W}_L	22482,7	8,149
\dot{W}_c	18243,7	8,149
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	2816,1	7,212

Tabela C.12: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos				Insumos			
	$\Delta \dot{E}^T$	$\Delta \dot{E}^M$	\dot{W}, \dot{F}	$\Delta \dot{S}$	$\Delta \dot{E}^T$	$\Delta \dot{E}^M$	\dot{W}, \dot{F}	$\Delta \dot{S}$
Compressor	9,391	9,391	—	—	—	—	8,149	1,896
Câmara de Combustão	6,001	—	—	—	—	9,391	4,000	1,896
Turbina	—	—	8,149	—	6,858	9,391	—	1,896
Regenerador	7,728	—	—	—	6,858	9,391	—	1,896
Caldeira de Recuperação	—	—	7,212	—	6,858	9,391	—	1,896
Chaminé	—	—	—	1,896	6,858	—	—	—

Tabela C.13: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	—
\dot{E}_2^T	5132,2	8,815
\dot{E}_3^T	23303,1	7,694
\dot{E}_4^T	48438,9	6,695
\dot{E}_5^T	22902,9	6,695
\dot{E}_6^T	5650,6	6,695
\dot{E}_7^T	2506,1	6,695
\dot{E}_1^M	0,0	—
\dot{E}_2^M	12927,5	8,815
\dot{E}_3^M	12742,9	8,815
\dot{E}_4^M	12558,3	8,815
\dot{E}_5^M	250,8	8,815
\dot{E}_6^M	199,5	8,815
\dot{E}_7^M	0,0	—
\dot{W}_L	21472,5	7,783
\dot{W}_c	17424,0	7,783
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	3826,2	9,799

Tabela C.14: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	8,815	8,815	—	—	—	7,783
Câmara de Combustão	5,975	—	—	—	8,815	4,000
Turbina	—	—	7,783	6,695	8,815	—
Regenerador	7,428	—	—	6,695	8,815	—
Caldeira de Recuperação	—	—	9,799	6,695	8,815	—

Tabela C.15: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	-
\dot{E}_2^T	4.683,4	8,044
\dot{E}_3^T	21.178,6	6,993
\dot{E}_4^T	43.792,1	6,052
\dot{E}_5^T	20.705,8	6,052
\dot{E}_6^T	5.108,6	6,052
\dot{E}_7^T	2.265,7	6,052
\dot{E}_1^M	-	-
\dot{E}_2^M	11.796,8	8,044
\dot{E}_3^M	11.628,4	8,044
\dot{E}_4^M	11.460,0	8,044
\dot{E}_5^M	228,8	8,044
\dot{E}_6^M	182,1	8,044
\dot{E}_7^M	-	-
\dot{W}_L	19.525,9	7,077
\dot{W}_c	15.844,5	7,077
\dot{F}	22.238,2	4,000
\dot{E}_Q	3.507,1	8,982
\dot{W}_L^o	21510,7	7,797
\dot{E}_Q^o	3788,1	9,701

Tabela C.16: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia total) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	8,044	8,044	-	-	-	7,077
Câmara de Combustão	5,375	-	-	-	8,044	4,000
Turbina	-	-	7,077	6,052	8,044	-
Regenerador	6,743	-	-	6,052	8,044	0
Caldeira de Recuperação	-	-	8,982	6,052	8,044	-

C.3 Variantes que consideram a exergia desagregada, função do compressor aumento da exergia mecânica

As variantes da Teoria do Custo Exergético que consideram a desagregação da exergia e dois produtos para o compressor, sendo o aumento da exergia térmica considerada sub-produto, têm seus resultados apresentados nesta seção. Os custos para a variante que utiliza o tratamento elementar para a irreversibilidade externa são apresentados nas tabelas C.17 e C.18 e, nas tabelas C.19 e C.20, apresentam-se os custos para a variante que utiliza a neguentropia. Os resultados da variante em que se internaliza a irreversibilidade são apresentados nas tabelas C.21 e C.22. Finalmente, a variante em que os custos da irreversibilidade externa são redistribuídos externamente, em uma segunda etapa, são apresentados nas tabelas C.23 e C.24.

Tabela C.17: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia mecânica)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	—
\dot{E}_2^T	3364,9	5,780
\dot{E}_3^T	19184,6	6,335
\dot{E}_4^T	41819,4	5,780
\dot{E}_5^T	19773,1	5,780
\dot{E}_6^T	4878,4	5,780
\dot{E}_7^T	0,0	0,000
\dot{E}_1^M	0,0	—
\dot{E}_2^M	13283,4	9,058
\dot{E}_3^M	13093,7	9,058
\dot{E}_4^M	12904,1	9,058
\dot{E}_5^M	257,7	9,058
\dot{E}_6^M	205,0	9,058
\dot{E}_7^M	0,0	—
\dot{W}_L	19733,1	7,153
\dot{W}_c	16012,6	7,153
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	5565,6	14,2534

Tabela C.18: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	5,780	9,058	—	—	—	7,153
Câmara de Combustão	5,380	—	—	—	9,058	4,000
Turbina	—	—	7,153	5,780	9,058	—
Regenerador	6,467	—	—	5,780	9,058	—
Caldeira de Recuperação	—	—	14,2534	5,780	9,058	—

Tabela C.19: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	—
\dot{E}_2^T	3766,5	6,470
\dot{E}_3^T	21686,2	7,161
\dot{E}_4^T	46810,0	6,470
\dot{E}_5^T	22132,8	6,470
\dot{E}_6^T	5460,6	6,470
\dot{E}_7^T	2421,8	6,470
\dot{E}_1^M	0,0	—
\dot{E}_2^M	15528,4	10,589
\dot{E}_3^M	15306,7	10,589
\dot{E}_4^M	15085,0	10,589
\dot{E}_5^M	301,2	10,589
\dot{E}_6^M	239,7	10,589
\dot{E}_7^M	0,0	—
\dot{S}_1	0,0	—
\dot{S}_2	340,0	1,789
\dot{S}_3	3442,6	1,789
\dot{S}_4	5899,6	1,789
\dot{S}_5	6280,4	1,789
\dot{S}_6	3459,4	1,789
\dot{S}_7	2421,8	1,789
\dot{W}_L	22575,6	8,183
\dot{W}_c	18319,1	8,183
\dot{F}	22238,2	4,000
\dot{E}_Q	2723,1	6,974

Tabela C.20: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e utilizando a neguentropia para redistribuição dos custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos				Insumos			
	$\Delta\dot{E}^T$	$\Delta\dot{E}^M$	\dot{W}, \dot{F}	$\Delta\dot{S}$	$\Delta\dot{E}^T$	$\Delta\dot{E}^M$	\dot{W}, \dot{F}	$\Delta\dot{S}$
Compressor	6,470	10,589	—	—	—	—	8,183	1,789
Câmara de Combustão	5,972	—	—	—	—	10,589	4,000	1,789
Turbina	—	—	8,183	—	6,470	10,589	—	1,789
Regenerador	7,325	—	—	—	6,470	10,589	—	1,789
Caldeira de Recuperação	—	—	6,974	—	6,470	10,589	—	1,789
Chaminé	—	—	—	1,789	6,470	—	—	—

Tabela C.21: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	-	-
\dot{E}_2^T	3.711,2	6,375
\dot{E}_3^T	21.084,8	6,962
\dot{E}_4^T	46.122,5	6,375
\dot{E}_5^T	21.807,7	6,375
\dot{E}_6^T	5.380,4	6,375
\dot{E}_7^T	2.386,0	-
\dot{E}_1^M	-	-
\dot{E}_2^M	14.451,5	9,855
\dot{E}_3^M	14.245,2	9,855
\dot{E}_4^M	14.038,8	9,855
\dot{E}_5^M	280,3	9,855
\dot{E}_6^M	223,1	9,855
\dot{E}_7^M	-	-
\dot{W}_L	21.599,3	7,829
\dot{W}_c	17.526,9	7,829
\dot{F}	22.238,2	4,000
\dot{E}_Q	3.699,4	9,474

Tabela C.22: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e internalizando a irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	16,375	9,855	—	—	—	7,829
Câmara de Combustão	5,952	—	—	—	9,855	4,000
Turbina	—	—	7,829	6,375	9,855	—
Regenerador	7,102	—	—	6,375	9,855	—
Caldeira de Recuperação	—	—	9,474	6,375	9,855	—

Tabela C.23: Custos da exergia dos fluxos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica)

Fluxo	Custos	
	(\$/s)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	—
\dot{E}_2^T	3.364,9	5,780
\dot{E}_3^T	19.184,6	6,335
\dot{E}_4^T	41.819,4	5,780
\dot{E}_5^T	19.773,1	5,780
\dot{E}_6^T	4.878,4	5,780
\dot{E}_7^T	2.163,6	5,780
\dot{E}_1^M	—	—
\dot{E}_2^M	13.283,4	9,058
\dot{E}_3^M	13.093,7	9,058
\dot{E}_4^M	12.904,1	9,058
\dot{E}_5^M	257,7	9,058
\dot{E}_6^M	205,0	9,058
\dot{E}_7^M	—	—
\dot{W}_L	19.733,1	7,153
\dot{W}_c	16.012,6	7,153
\dot{F}	22.238,2	4,000
\dot{E}_Q	3.402,0	8,712
\dot{W}_L°	21.628,5	7,840
\dot{E}_Q°	3670,3	9,399

Tabela C.24: Custos dos produtos e dos insumos na Teoria do Custo Exergético, considerando a divisão da exergia em parcelas e redistribuindo em uma segunda etapa os custos da irreversibilidade externa (função do compressor: aumento da exergia mecânica) (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	5,780	9,058	—	—	—	7,153
Câmara de Combustão	5,380	—	—	—	9,058	4,000
Turbina	—	—	7,153	5,780	9,058	—
Regenerador	6,467	—	—	5,780	9,058	—
Caldeira de Recuperação	—	—	8,712	5,780	9,058	—

Apêndice D

Resultados obtidos pela aplicação da Metodologia Estrutural

Tabela D.1: Custos dos produtos na Metodologia Estrutural

Unidade	Produto	Custo
Compressor	y_1	10,589
Câmara de Combustão	y_2	5,972
Turbina	y_3	8,183
Regenerador	y_4	7,325
Caldeira de Recuperação	y_5	6,974
Chaminé	y_6	1,789
Junção	y_7	6,469

Apêndice E

Resultados obtidos pela aplicação da Exergoeconomia

Tabela E.1: Custos da exergia dos produtos internos e insumos na Exergoeconomia (\$/kJ^e)

Unidade	Produtos			Insumos		
	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}	\dot{E}^T	\dot{E}^M	\dot{E}^{Outros}
Compressor	7,227	7,227	—	—	—	6,329
Câmara de Combustão	5,371	—	—	—	7,227	4,000
Turbina	—	—	6,329	5,371	7,227	—
Regenerador	11,397	—	—	10,479	7,227	—
Caldeira de Recuperação	—	—	13,143	9,551	7,227	—

Tabela E.2: Custos da exergia dos fluxos na Exergoeconomia

Fluxo	Custos		
	(\$/s)	(\$/kg)	(\$/kJ ^e)
\dot{E}_1^T	0,0	0,000	—
\dot{E}_2^T	4207,3	420,73	72,267
\dot{E}_3^T	32087,8	3208,78	105,951
\dot{E}_4^T	54684,3	5468,43	75,578
\dot{E}_5^T	34196,1	3419,61	99,957
\dot{E}_6^T	7191,6	719,16	85,204
\dot{E}_7^T	2705,2	270,52	72,267
\dot{E}_1^M	0,0	0,000	—
\dot{E}_2^M	10597,6	1059,76	72,267
\dot{E}_3^M	10446,3	1044,63	72,267
\dot{E}_4^M	10295,0	1029,50	72,267
\dot{E}_5^M	205,6	20,56	72,267
\dot{E}_6^M	163,6	16,36	72,267
\dot{E}_7^M	0,0	0,000	—
\dot{F}	22238,2	—	4,000
\dot{E}_Q	5132,1	—	13,143
\dot{W}_L	17461,4	—	6,329
\dot{W}_c	14169,2	—	6,329
\dot{W}_L^o	19831,2	—	7,188
\dot{E}_Q^o	5467,5	—	14,002

Bibliografia

- Alekseev, G. N. (1986). *Energy and Entropy*. Mir Publishers, Moscow, Russia.
- Barreda del Campo, E. R., Cerqueira, S. A. A. G. e Nebra, S. A. (1998). “Thermoeconomic analysis of the cogeneration system of a cuban sugar mill.” *Energy Conversion & Management*, volume 39, nº 16-18, págs. 1773–1780.
- Bejan, A. (1982). *Entropy generation through heat and fluid flow*. John Wiley & Sons, New York.
- Bejan, A. (1988). *Advanced Engineering Thermodynamics*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G. e Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Carvalho, F. R. e Horta Nogueira, L. (1996). “Thermoeconomic studies applied to maintenance of power plants.” In “Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems (ECOS’96),” págs. 91–97. Stockholm, Sweden.
- Cerqueira, S. A. A. G. e Nebra, S. A. (1998). “Cost attribution methodologies in cogeneration systems.” In “Efficiency, Costs, Optimisation, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems and Processes, ECOS’98,” págs. 255–262. Nancy, France.
- DeGarmo, E. P., Sullivan, W. G. e Bontadelli, J. A. (1989). *Engineering Economy*. Macmillan Pub. Co., New York, NY, 8ª ed.
- El-Sayed, Y. M. e Evans, R. B. (1970). “Thermoeconomics and the design of thermal systems.” *Journal of Engineering for Power*, págs. 27–35.

- Frangopoulos, C. A. (1983). *Thermoeconomic Functional Analysis: A Method for Optimal Design or Improvement of Complex Thermal Systems*. Tese de Doutorado, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.
- Frangopoulos, C. A. (1987). "Thermo-economic functional analysis and optimization." *Energy*, volume 12, nº 7, págs. 563–571.
- Frangopoulos, C. A. (1994). "Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem." *Energy*, volume 19, nº 3, págs. 323–342.
- Frangopoulos, C. A., Lygeros, A. I., Markou, C. T. e Kaloritis, P. (1996). "Thermoeconomic operation optimization of the Hellenic Aspropyrgos refinery combined-cycle cogeneration system." *Applied Thermal Engineering*, volume 16, nº 12, págs. 949–958.
- Gaggioli, R. e Fehring, T. (1978). "Economics of boiler feed pump drive alternatives." *Combustion*, volume 49, nº 9.
- Gaggioli, R. e Wepfer, W. (1978). "Economic sizing of piping and insulation." In "ASME Winter Annual Meeting," ASME.
- Gallo, W. L. R. (1997). "A comparison between the HAT cycle and other gas-turbine based cycles: Efficiency, specific power and water consumption." *Energy Conversion & Management*, volume 38, nº 15-17, págs. 1595–1604.
- Gallo, W. L. R., Llagostera, J. e Walter, A. C. S. (1997). "HAT cycle exergetic analysis and thermoeconomic evaluation of fuel costs." In "ME'97: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAN'97)," págs. 231–238.
- Guarinello, F., Cerqueira, S. A. . d. G. e Nebra, S. A. (1998). "Thermoeconomic evaluation of a gas turbine cogeneration system." In "ME'98: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAN'98)," págs. 151–156. Anaheim, CA, USA.
- Keenan, J. (1932). "A steam chart for second law analysis." *Transactions of the ASME*, volume 54, págs. 195.
- Kotas, T. J. (1985). *The Exergy Method of Therma Plant Analysis*. Butterworths, London, UK.

- Krause, A. e Tsatsaronis, G. (1997). "Thermoeconomic and exergoeconomic evaluation of the humid-air turbine cycle." In "TAIES'97 - Thermodynamic analysis and improvement of energy systems," Beijing, China.
- Lazzaretto, A. e Tsatsaronis, G. (1996). "A general process-based methodology for exergy costing." In "AES-Vol.36 Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems," págs. 413–428. ASME, New York, NY.
- Lazzaretto, A. e Tsatsaronis, G. (1997). "On the quest for objective equations in exergy costing." In "AES-Vol.37 Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems," págs. 197–210. ASME, ASME, New York, NY.
- Lozano, M. A. (1987). *Metodología para el análisis exergético de calderas de vapor en centrales térmicas*. Tese de Doutoramento, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain.
- Lozano, M. A. e Valero, A. (1993a). "Theory of the exergetic cost." *Energy*, volume 18, nº 9, págs. 939–960.
- Lozano, M. A. e Valero, A. (1993b). "Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems." In H. J. Richter, ed., "Thermodynamics and the Design, Analysis and Improvement of Energy Systems," págs. 311–319. ASME.
- Lozano, M. A., Valero, A. e Serra, L. (1993). "Theory of exergetic cost and thermoeconomic optimization." In "ENSEC - Energy Systems and Ecology," págs. 339–350. Cracow, Poland.
- Lozano, M. A., Valero, A. e Serra, L. (1996). "Local optimization of energy systems." In "ME'96 International Mechanical Engineering Congress (ASME WAN'97)," págs. 241–249. ASME.
- Luenberger, D. G. (1984). *Linear and nonlinear programming*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 2^a ed.
- Luz Silveira, J. e Horta Nogueira, L. (1992). "Thermoeconomic functional analysis applied in cogeneration systems associated to cellulose plants." In "International Symposium on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of Energy Systems (ECOS'92)," págs. 381–390. Zaragoza, Spain.

- Reistad, G. M. e Gaggioli, R. A. (1980). "Available energy costing." *ACS Symposium Series*, volume 122, págs. 143-160.
- Robles Vertiola, S. e Oliveira Júnior, S. (1995). "Exergetic and thermoeconomic analysis of the steam cycle of a medium sized sugar and alcohol mill." In "Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS'95)," págs. 231-236. Istanbul, Turkey.
- Schwarz, P., Lozano, M. A., von Spakovsky, M. R. e Valero, A. (1997). "Diagnostic analysis of a PFBC power plant using a thermoeconomic methodology." In "TAIES'97 - Thermodynamic analysis and improvement of energy systems," págs. 240-249. Beijing, China.
- Silva, R. J. e Nebra, S. A. (1996). "Thermoeconomic comparative analysis of different process of cement production." In "Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems (ECOS'96)," págs. 119-125. Stockholm, Sweden.
- Torres, C., Serra, L., Valero, A. e Lozano, M. A. (1996). "The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization." In "ME'96: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAN'96)," ASME.
- Torres, E. A. e Nebra, S. (1997). "Avaliação termoeconómica de um sistema de cogeração de indústria petroquímica." In "XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 97)," pág. 24. Bauru, SP, Brazil.
- Tsatsaronis, G. (1993). "Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems." *Progress in Energy and Combustion Science*, volume 19, nº 3, págs. 227-257.
- Tsatsaronis, G., Lin, L. e Pisa, J. (1993). "Exergy costing in exergoeconomics." *Journal of Energy Resources Technology*, volume 115, nº 1, págs. 9-16.
- Tsatsaronis, G., Lin, L., Tawfik, T. e Gallaspy, D. T. (1994a). "Exergoeconomic evaluation of KRW-based IGCC power-plant." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, volume 116, nº 2, págs. 300-306.
- Tsatsaronis, G. e Pisa, J. (1994). "Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems - application to the CGAM problem." *Energy*, volume 19, nº 3, págs. 287-321.

- Tsatsaronis, G., Tawfik, T., Lin, L. e Gallaspy, D. T. (1994b). "Exergetic comparison of 2 KRW-based IGCC power-plants." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, volume 116, nº 2, págs. 291-299.
- Tsatsaronis, G. e Winhold, M. (1985a). "Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants - 1. a new general methodology." *Energy*, volume 10, nº 1, págs. 69-80.
- Tsatsaronis, G. e Winhold, M. (1985b). "Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants - 2. analysis of a coal-fired steam power-plant." *Energy*, volume 10, nº 1, págs. 81-94.
- Valero, A., Lozano, M. A. e Bartolome, J. L. (1996). "On-line monitoring of power-plant performance, using exergetic cost techniques." *Applied Thermal Engineering*, volume 16, nº 12, págs. 933-948.
- Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C. e von Spakovsky, M. R. (1994). "CGAM problem: definition and conventional solution." *Energy*, volume 19, nº 3, págs. 279-286.
- Valero, A., Serra, L. e Lozano, M. A. (1993). "Structural theory of thermoeconomics." In "AES-Vol30/HTD-Vol266, Thermodynamics and the design, analysis and improvement of energy systems," ASME.
- von Spakovsky, M. R. e Evans, R. E. (1990a). "The foundations of engineering functional analysis (part I)." In "FLOWERS'90," .
- von Spakovsky, M. R. e Evans, R. E. (1990b). "The foundations of engineering functional analysis (part II)." In "FLOWERS'90," .
- Walter, A. e Llagostera, J. (1995). "Exergetic and thermoeconomic analysis of biomass integrated gasifier/gas turbine power cycles." In "ASME Cogen Turbo Power Conference," Vienna, Austria. ASME Paper, 95-CTP-14.
- Wepfer, W. J. (1980). "Applications of available-energy accounting." *ACS Symposium Series*, volume 122, págs. 161-186.