

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

MARCELO AIOLFI BARONE

**DIAGRAMA ABRANGENTE E
DESAGREGAÇÃO DA EXERGIA: UMA
PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO
GENERALIZADA DA MODELAGEM
TERMOECONÔMICA**

Vitória

2021

MARCELO AIOLFI BARONE

**DIAGRAMA ABRANGENTE E DESAGREGAÇÃO DA
EXERGIA: UMA PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO
GENERALIZADA DA MODELAGEM TERMOECONÔMICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos

Vitória

2021

MARCELO AIOLFI BARONE

DIAGRAMA ABRANGENTE E DESAGREGAÇÃO DA EXERGIA: UMA PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO GENERALIZADA DA MODELAGEM TERMOECONÔMICA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Vitória, 22 de dezembro de 2021:

Prof. Dr. Felipe Raul Ponce Arrieta (Examinador Externo)
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas)

Prof. Dr. Daniel Alexander Florez-Orrego (Examinador Externo)
Universidade de São Paulo - Escola Politécnica (USP)

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera (Examinador Externo)
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. Rogério Ramos (Examinador Interno)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Vitória
2021

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador, Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos pela oportunidade.

Aos membros da banca examinadora do meu exame de qualificação e defesa, pelos questionamentos, sugestões e direcionamento do trabalho.

Aos professores e alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

Aos amigos e colegas da Termodinâmica e da Termoeconomia, João Donatelli, Atilio Lourenço, Leonardo Araújo, Alexandre Morawski, André Chun, Bruno Miotto, Pedro Faria e Rodrigo Guedes, pelas conversas, discussões científicas, pesquisas e trabalhos desenvolvidos.

À equipe NEMOG pelo acolhimento, e das conversas descontraídas e científicas durante o Café.

Ao Vitor Pancieri pelo diversos cafés amargos da cantina para discutir sobre investimentos e ciências.

À minha esposa Clara, pelo incentivo, compreensão e conselhos ao longo do doutorado.

Ao novo membro da família, meu filho João.

A todas as pessoas que me ajudaram a realizar esta tese e não estão aqui citadas.

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços - repetidos dia sim,
e no outro dia também.”
(Robert Collier)*

RESUMO

Termoeconomia combina conceitos da termodinâmica com a economia para fornecer ao analista do sistema informações não disponíveis através de análises convencionais. Independentemente da análise termoeconômica, o processo de formação de custo é necessário além da definição de insumo e produto para cada subsistema. Alguns fatores podem interferir, deixando-o mais arbitrário e menos sistematizado. Esses fatores são as unidades fictícias, os equipamentos dissipativos e o tratamento de resíduo. O objetivo desta tese é uma proposta de sistematização generalizada da modelagem termoeconômica. O diagrama abrangente foi elaborado para eliminar as arbitrariedades referentes as unidades fictícias presentes no diagrama produtivo, haja vista que utiliza dos fluxos físicos nas interconexões dos subsistemas. Além disso, o diagrama mostra os fluxos físicos e produtivos permitindo o cálculo do custo de ambos fluxos. Em relação aos equipamentos dissipativos e ao tratamento de resíduo, a desagregação da exergia é a solução sistemática. Por consequência, tanto o diagrama abrangente quanto a desagregação da exergia aumentam o número de fluxos a serem analisados, logo aumentam a quantidade de equações de balanço de custo, tornando o processo complexo. Para diminuir a complexidade, uma solução é aplicar a técnica chamada desagregação da exergia física localizada, que realiza a desagregação da exergia física somente no dispositivo desejado. Quatro estudos de casos foram realizados para discutir sobre os fatores que afetam a sistematização do processo de formação de custo. Como resultado, a desagregação da exergia localizada diminui a complexidade, porém, no Modelo E com resíduo não permitiu a alocação do custo do resíduo de forma sistemática, logo não resolveu a arbitrariedade e nem a sistematização. A melhor solução foi o diagrama abrangente com a desagregação da exergia física nos Modelos H&S, UFS e UFS+, os quais mostraram custos exergéticos coerentes, assim como processo de formação de custo sistemático, independentemente da existência de equipamentos dissipativos ou resíduos.

Palavras-chave: Diagrama abrangente. Sistematização. Termoeconomia. Desagregação de exergia. Arbitrariedades.

ABSTRACT

Thermoeconomics combines concepts of thermodynamics with economics to provide the system analyst information not available through conventional analysis. Regardless of the thermoeconomic analysis, the cost formation process is necessary, besides the definition of fuel and product for each subsystem. Some factors can interfere, making it more arbitrary and less systematized. These factors are fictitious units, dissipative equipment, and waste treatment. The thesis objective is a proposal for the generalized systematization of thermoeconomic modeling. The comprehensive diagram eliminated arbitrariness related to the fictitious units present in the productive diagram, given that it uses physical flows in the interconnections of subsystems. In addition, the diagram shows the physical and productive flows, allowing the cost calculation of both flows. Regarding dissipative equipment and waste treatment, exergy breakdown is the systematic solution. Consequently, both the comprehensive diagram and the exergy disaggregation increase the number of flows to be analyzed, then increase the number of cost-balance equations, making the process complex. To reduce the complexity, one solution is to apply the technique called localized physical exergy disaggregation, which performs the disaggregation of physical exergy only on the desired device. Four case studies were carried out to discuss the factors that affect the systematization of the cost formation process. As a result, the localized exergy disaggregation reduces the complexity, however, the Model E with residual did not allow the waste cost allocation systematically, so it did not resolve arbitrariness or systematization. The best solution was the comprehensive diagram with the disaggregation of physical exergy in Models H&S, UFS, and UFS+, which showed coherent exergy costs, as well as a systematic cost formation process, regardless of the existence of dissipative equipment or waste.

Keywords: Comprehensive diagram. Systematization. Thermoeconomics. Physical exergy disaggregation. Arbitrariness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo dos diagramas físico e produtivo em um sistema Rankine de cogeração.	21
Figura 2 – Exemplo do diagrama abrangente em um sistema Rankine de cogeração. . .	22
Figura 3 – Estrutura física representada pelo diagrama físico do problema CGAM. . . .	29
Figura 4 – Representação de uma unidade no diagrama funcional.	30
Figura 5 – Representação de junção e bifurcação.	30
Figura 6 – Diagrama funcional aplicado no problema CGAM utilizando a desagregação da exergia em térmica e mecânica.	31
Figura 7 – Diagrama funcional aplicado no problema CGAM utilizando a exergia total.	31
Figura 8 – Etapas para obtenção das equações de balanço de custo.	34
Figura 9 – Desagregação da exergia física para o fluido real.	37
Figura 10 – Desagregação da exergia física para fluido com comportamento de gás ideal.	38
Figura 11 – Definição do insumo e produto do condensador utilizando exergia total e a desagregação nas parcelas entálpica e entrópica.	39
Figura 12 – Diagrama termoeconômico intermediário do ciclo Rankine utilizando o Modelo E&S.	43
Figura 13 – (a) Estrutura física de uma planta de potência a vapor de cogeração; (b) Diagrama produtivo físico; (c) Diagrama produtivo.	44
Figura 14 – Conceito de componente e unidade produtiva.	44
Figura 15 – Representação dos fluxos materiais e de energia em um componente, unidade produtiva e unidade do abrangente para equipamento produtivo.	45
Figura 16 – Representação dos fluxos materiais e de energia em um componente, unidade produtiva e unidade do abrangente para equipamento dissipativo.	46
Figura 17 – Desagregação localizada no condensador com exergia total e a desagregação H&S.	47
Figura 18 – Representação das unidades genéricas de equipamento produtivo e dissipativo.	49
Figura 19 – Fluxograma de síntese das etapas de elaboração do diagrama abrangente. . .	51
Figura 20 – Fluxograma de escolha do modelo termoeconômico com menor complexidade, sem arbitrariedade de interconexão entre os subsistemas e tratamento de resíduo.	52
Figura 21 – Estrutura física da planta nuclear.	53
Figura 22 – Diagrama físico da planta utilizando o Modelo E.	56
Figura 23 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o Modelo E com dois pares de unidades fictícias.	57
Figura 24 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o Modelo E com um par de unidade fictícia.	59
Figura 25 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o Modelo H&S.	61

Figura 26 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o modelo UFS.	63
Figura 27 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o modelo UFS+.	66
Figura 28 – Reta solução do custo exergético unitário das metodologias aplicadas a planta nuclear.	68
Figura 29 – Fluxograma da planta dual.	71
Figura 30 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo E.	74
Figura 31 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo E.	75
Figura 32 – Diagrama abrangente da planta dual utilizando o Modelo E.	75
Figura 33 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo E ^{TEM}	79
Figura 34 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo E ^{TEM}	80
Figura 35 – Diagrama abrangente da planta dual para o Modelo E ^{TEM}	80
Figura 36 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo H&S.	85
Figura 37 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo H&S.	86
Figura 38 – Diagrama abrangente da planta dual utilizando o Modelo H&S.	87
Figura 39 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo UFS.	91
Figura 40 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo UFS.	92
Figura 41 – Diagrama Abrangente da planta dual utilizando o Modelo UFS.	93
Figura 42 – Diagrama Físico da planta dual utilizando o Modelo UFS+.	99
Figura 43 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo UFS+.	99
Figura 44 – Diagrama Abrangente da planta dual utilizando o Modelo UFS+.	100
Figura 45 – Reta solução do custo exergético unitário das metodologias aplicadas a planta dual.	105
Figura 46 – Estrutura física do sistema de cogeração com queima suplementar.	107
Figura 47 – Diagrama produtivo para o sistema utilizando o Modelo E: (a) Arranjo 1 e (b) Arranjo 2.	110
Figura 48 – Diagrama produtivo para o sistema utilizando o Modelo E com desagregação localizada.	110
Figura 49 – Diagrama produtivo para o sistema utilizando o Modelo H&S: (a) Arranjo 1 e (b) Arranjo 2.	113
Figura 50 – Diagrama abrangente para o sistema usando o Modelo E - Alocação de custos de resíduos em: (a) abordagem baseada em SPECO e (b) <i>Loop</i> interno de fluxos físicos.	115
Figura 51 – Diagrama abrangente para o sistema usando o Modelo E com alocação de custos de resíduos no <i>loop</i> interno de fluxos físicos e desagregação localização no <i>intercooler</i>	116
Figura 52 – Diagrama abrangente para o sistema usando o Modelo H&S.	117
Figura 53 – Resultados obtidos pelos diferentes métodos de alocação de custos para o mesmo sistema na reta solução.	121

Figura 54 – Estrutura física simplificada do sistema combinado de cogeração com <i>chiller</i> por absorção, processo de captura de CO ₂ e torre de resfriamento.	124
Figura 55 – Estrutura física do sistema combinado de cogeração com <i>chiller</i> por absorção, processo de captura de CO ₂ e torre de resfriamento.	125
Figura 56 – Diagrama abrangente do sistema combinado de cogeração com <i>chiller</i> por absorção, processo de captura de CO ₂ e torre de resfriamento.	127
Figura 57 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente dos compressores e bombas.	129
Figura 58 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente dos trocadores de calor.	130
Figura 59 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente das turbinas.	131
Figura 60 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente das válvulas de expansão.	132
Figura 61 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente de equipamentos que envolvam misturas de fluxos.	134
Figura 62 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente de equipamentos diversos.	135
Figura 63 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente dos geradores e subestação.	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações dos fluxos presentes no problema CGAM da Fig. 6.	31
Tabela 2 – Estrutura produtiva do problema CGAM para o diagrama físico da Fig. 3. . .	33
Tabela 3 – Estrutura produtiva do problema CGAM para o diagrama produtivo da Fig. 7.	33
Tabela 4 – Principais parâmetros dos fluxos físicos da planta nuclear.	54
Tabela 5 – Estrutura Produtiva da planta com base na exergia total.	56
Tabela 6 – Equações de balanço de custo para o diagrama produtivo da Fig. 23	58
Tabela 7 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E da Planta Nuclear.	60
Tabela 8 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E da Planta Nuclear.	62
Tabela 9 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS da Planta Nuclear.	64
Tabela 10 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS+ da Planta Nuclear.	67
Tabela 11 – Resultados do custo exergético unitário dos produtos e da complexidade entre as metodologias termoeconômicas aplicadas a planta nuclear.	68
Tabela 12 – Parâmetros dos fluxos físicos que representam o fluido de trabalho.	72
Tabela 13 – Valores de exergia específica (e) dos fluxos materiais.	73
Tabela 14 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo E usando os fluxos físicos e produtivos.	74
Tabela 15 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E da Planta Dual. . .	77
Tabela 16 – Valores da exergia térmica específica (e^T) e exergia mecânica específica (e^M) dos fluxos materiais.	78
Tabela 17 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo $E^T E^M$ para os fluxos físicos e produtivos.	79
Tabela 18 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo $E^T E^M$ da Planta Dual.	83
Tabela 19 – Valores da entalpia específica (h) e entropia específica (s) dos fluxos materiais.	84
Tabela 20 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo H&S.	85
Tabela 21 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo H&S da Planta Dual.	89
Tabela 22 – Valores de energia interna específica (u), trabalho de fluxo específica (f) e entropia específica (s) dos fluxos materiais.	90
Tabela 23 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo UFS.	91
Tabela 24 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS da Planta Dual.	96
Tabela 25 – Valores da energia interna específica (u), trabalho de fluxo do volume específica (f_v), trabalho de fluxo da pressão específica (f_p) e entropia específica (s) dos fluxos materiais.	97
Tabela 26 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo UFS+.	98
Tabela 27 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS+ da Planta Dual.	103

Tabela 28 – Resultados do custo exergético unitário dos produtos e da complexidade entre os diagramas e as metodologias termoeconômicas aplicadas a planta dual. .	104
Tabela 29 – Parâmetros dos fluxos físicos do sistema de cogeração com queima suplementar.	108
Tabela 30 – Composição química elementar de fluxos de ar e gases.	108
Tabela 31 – Estrutura Produtiva do sistema com base no Modelo E.	109
Tabela 32 – Estrutura Produtiva do sistema com base no Modelo H&S.	112
Tabela 33 – Custo Exergético Unitário (k) para o Modelo E do sistema de queima suplementar.	118
Tabela 34 – Custo Exergético Unitário (k) para o Modelo H&S do sistema de queima suplementar.	119
Tabela 35 – Custo exergético unitário (k) do calor e potência - Modelo E e H&S.	121
Tabela 36 – Números de fluxos e equações auxiliares existentes no diagrama abrangente para cada modelo termoeconômico.	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviatura

AB	Absorvedor
ab	Água salgada
AC	Compressor de ar
ac	Ar de combustão
AFE	Análise Funcional de Engenharia
AFT	Análise Funcional Termoeconômica
AMB	Ambiente
APH	Pré-aquecedor de ar
B	Bomba
B1, B2 e B3	Bombas
BA	Bomba de alta pressão
BB	Bomba de baixa pressão
CA	Compressor de alta pressão
CB	Compressor de baixa pressão
CC	Câmara de combustão
CD	Condensador
CO ₂	Dioxido de Carbono
CO ₂ .PC	Processo de captura de CO ₂
CR	Caldeira de recuperação
DAB	Diagrama abrangente
DF	Diagrama físico
DP	Diagrama produtivo ou Disponibilidade para processo industrial
EV	Evaporador
GE	Gerador elétrico ou gerador do <i>chiller</i> por absorção
ge	Gases de exaustão
gn	Gás natural
GTG	Gerador elétrico acoplado a turbina a gás
GTV	Gerador elétrico acoplado a turbina a vapor
GV	Gerador de vapor
HRSG	Caldeira de recuperação

IC	<i>Intercooler</i>
M	Misturador
MB	Motor e Bomba
MEA	Monoetanolamina
PC	<i>Precooler</i>
PCI	Poder calorífico inferior
pg	Potência do gerador
pgv	Potência do gerador de vapor
pl	Potência líquida
pm	Potência do motor e bomba
pud	Potência da unidade de dessalinização
QS	Queima suplementar
R, R1 e R2	Regenerador
RN	Reator nuclear
s	Salmora
SUB	Subestação
TC	Trocador de calor
TCE	Teoria do Custo Exergético
TG	Turbina a gás
TR	Torre de resfriamento
TV	Turbina a vapor
TVA	Turbina a vapor de alta pressão
TVB	Turbina a vapor de baixa pressão
TVGE	Turbina a vapor e Gerador
UD	Unidade de Dessalinização
V1, V2 e V3	Válvula de expansão
VG	Válvula de expansão no ciclo a gás
VV	Válvula de expansão no ciclo a vapor

Letras Gregas

α Custo unitário

Letras Latinas

B Bifurcação

C Custo monetário

[\$/h]

c Custo monetário unitário

[\$/kWh]

<i>E</i>	Exergia Total	[kW]
<i>e</i>	Exergia específica	[kJ/kg]
<i>F</i>	Trabalho de fluxo	[kW]
<i>f</i>	Trabalho de fluxo específico	[kJ/kg]
<i>FP</i>	Trabalho de fluxo da pressão	[kW]
<i>fp</i>	Trabalho de fluxo da pressão específico	[kJ/kg]
<i>FV</i>	Trabalho de fluxo do volume	[kW]
<i>fv</i>	Trabalho de fluxo do volume específico	[kJ/kg]
<i>H</i>	Entalpia	[kW]
<i>h</i>	Entalpia específica	[kJ/kg]
<i>J</i>	Junção	
<i>k</i>	Custo exergético unitário	[kJ/kJ]
<i>m</i>	Vazão mássica	[kg/s]
<i>P</i>	Pressão	[kPa ou bar]
<i>P</i>	Quantidade de produto	
<i>Q</i>	Calor	[kW]
<i>R</i>	Quantidade de recurso	
<i>S</i>	Entropia	[kW]
<i>s</i>	Entropia específica	[kJ/kg ou kJ/kg.K]
<i>T</i>	Temperatura	[°C]
<i>W</i>	Potência	[kW]
<i>Y</i>	Magnitude termodinâmica	
<i>Z</i>	Custo externo por hora	[\$/h]

Sobrescrito

<i>ch</i>	Química
<i>E</i>	Exergia Total
<i>F</i>	Trabalho de fluxo
<i>FP</i>	Trabalho de fluxo da pressão
<i>FV</i>	Trabalho de fluxo do volume
<i>H</i>	Entalpia
<i>ki</i>	Cinética
<i>M</i>	Térmica
<i>p</i>	Potencial
<i>ph</i>	Física
<i>S</i>	Entropia

T Mecânica

Subscrito

0 Ambiente

ac Compressor de ar

ad Água doce

AG Água gelada

B Bomba

BA Bomba de alta pressão

BB Bomba de baixa pressão

CA Compressor de alta pressão

CB Compressor de baixa pressão

CC Câmara de combustão

CR Calderira de recuperação

E Exergia Total

EG Energia elétrica do gerador da turbina a gás

EL Energia elétrica líquida

EV Energia elétrica do gerador da turbina a vapor

f Combustível

gn Gás natural

GTG Gerador elétrico acoplado a turbina a gás

GTV Gerador elétrico acoplado a turbina a vapor

GV Gerador de vapor

i,j Índice de fluxo

in Saída

L ou net Líquido

out Entrada

p Pressão

pg Potência do gerador

pgv Potência do gerador de vapor

pl Potência líquida

pm Potência do motor e bomba

pud Potência da unidade de dessalinização

QS Queima suplementar

RE Refervedor

TG Turbina a gás

TV	Turbina a vapor
TVA	Turbina a vapor de alta pressão
TVB	Turbina a vapor de baixa pressão
U	Útil
v	Volume
W	Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	24
1.2	Estrutura do Texto	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	História	26
2.2	Custo	27
2.3	Estruturas e Diagramas	29
2.4	Exergia e a Desagregação	34
2.5	Equipamento Dissipativos	38
2.6	Resíduos	39
3	METODOLOGIA	42
3.1	Diagrama Abrangente	42
3.2	Representação do Subsistema	45
3.3	Definição de Insumo e Produto	47
3.4	Balço de Custo e Equações Auxiliares	48
3.5	Consolidação das Etapas	51
4	ESTUDO DE CASO I: AS ARBITRARIIDADES DOS DIAGRAMAS CONVENCIONAIS	53
4.1	Descrição da Planta	53
4.2	Modelo E	55
4.3	Modelo H&S	60
4.4	Modelo UFS	62
4.5	Modelo UFS+	65
4.6	Análise Comparativa	68
5	ESTUDO DE CASO II: ELABORAÇÃO DO DIAGRAMA ABRANGENTE	71
5.1	Descrição da Planta	71
5.2	Análise Termoeconômica	72
5.2.1	Modelo E	73
5.2.2	Modelo $E^T E^M$	77
5.2.3	Modelo H&S	83
5.2.4	Modelo UFS	89
5.2.5	Modelo UFS+	96

5.3	Análise Comparativa	104
6	ESTUDO DE CASO III: RESÍDUO E DESAGREGAÇÃO LOCALIZADA	107
6.1	Descrição do Sistema	107
6.2	Análise Termoeconômica	109
6.2.1	Diagrama Produtivo	109
6.2.2	Diagrama Abrangente	114
6.3	Análise Comparativa	120
7	ESTUDO DE CASO IV: SISTEMATIZAÇÃO GENERALIZADA	124
7.1	Descrição do Sistema	124
7.2	Análise Termoeconômica	126
7.2.1	Compressores e Bombas	128
7.2.2	Trocadores de Calor	128
7.2.3	Turbinas	128
7.2.4	Válvulas de Expansão	128
7.2.5	Equipamentos com Misturas	133
7.2.6	Equipamentos Diversos	133
7.2.7	Geradores e Subestação	136
7.3	Análise Comparativa	136
8	CONCLUSÕES	138
	REFERÊNCIAS	141

1 INTRODUÇÃO

A necessidade por maior eficiência e conhecimento dos custos em sistemas térmicos, originou a disciplina Termoeconomia, a qual combina a economia e a termodinâmica por meio da aplicação do conceito de custo para exergia. Essa fornece ao analista do sistema, informações não disponíveis por análises energéticas, mas cruciais para avaliação ou análise, no projeto e na operação de sistemas térmicos (VALERO; SERRA; UCHE, 2006). A termoeconomia possui três grandes áreas de aplicação (otimização, diagnóstico e alocação de custos), as quais se utilizam do processo de formação de custo a partir da definição da função de cada equipamento do sistema (VALERO et al., 1994a; TORRES et al., 1996).

Os sistemas são formados por um conjunto de subsistemas, que interagem entre si e com o ambiente por meio dos fluxos materiais e de energia (LOZANO; VALERO, 1993a). Assim, o processo de formação de custo visa contabilizar o custo do processo realizado em cada subsistema, de forma a entender a valorização do fluxo após cada etapa (TORRES; VALERO, 2000). Dessa forma, todas as metodologias termoeconômicas necessitam definir produto e insumo para cada subsistema da planta, bem como as interconexões existentes entre eles, permitindo assim descrever o processo de formação de custo.

Os subsistemas que formam um sistema térmico podem ser classificados em equipamentos produtivos e dissipativos. O primeiro fornece recursos para os outros equipamentos ou gera o produto final do sistema, ou seja, estes equipamentos apresentam um propósito produtivo (TORRES et al., 2008; LOURENÇO, 2016). Por outro lado, o segundo tem por objetivo eliminar os fluxos *indesejáveis*, ou seja, o equipamento dissipativo destrói a exergia sem ganho termodinâmico (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006; TORRES et al., 2008).

Para os equipamentos dissipativos, a termoeconomia apresenta dificuldade no seu tratamento, uma vez que não há possibilidade de definir produto e insumo utilizando a exergia total (ARENA; BORCHIellini, 1999). Uma forma de superar essa limitação é unir o equipamento dissipativo com um equipamento produtivo. Entretanto, essa união pode limitar a análise termoeconômica, haja vista que esses equipamentos não podem ser isolados na estrutura, podendo afetar os resultados na alocação de custos, na localização de suas ineficiências (diagnóstico) e na otimização local (FRANGOPOULOS, 1983; EL-SAYED, 2003).

Outra solução é a desagregação da exergia física, a qual permite determinar o custo do resíduo (AGUDELO; VALERO; TORRES, 2012) e o isolamento do equipamento dissipativo. Alguns sistemas precisam ser considerado por meio da desagregação da exergia com base nas parcelas térmica, mecânica e química ou ainda com fluxos fictícios (neguentropia) (TORRES et al., 1996), apesar de aumentar a complexidade para elaboração das equações de custo, devido ao aumento do número do fluxo a ser analisado (SANTOS; NASCIMENTO; LORA, 2006;

SANTOS et al., 2008).

A desagregação da exergia física nas parcelas térmica e mecânica (Modelo $E^T E^M$) melhora a precisão dos resultados na termoeconomia (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006). No entanto, esta desagregação não oferece nenhuma vantagem na alocação de custo do resíduo e isolamento de equipamento dissipativo, pois, não define o produto para estes equipamentos (condensador, *intercooler*). Além disso, de acordo com Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), este modelo pode conter arbitrariedade envolvendo o cálculo da separação das parcelas, especialmente utilizando fluido de trabalho que pode mudar de fase em um processo.

Para lidar com componentes dissipativos, Frangopoulos (1983) apresentou uma solução, que utiliza fluxos de exergia total com neguentropia (Modelo E&S). No entanto, a neguentropia é um fluxo fictício (AGUDELO; VALERO; TORRES, 2012; TORRES et al., 1996). Essa proposta permitiu definir o insumo e produto dos condensadores, a qual não era definida até aquele momento (AGAZZANI; MASSARDO, 1997; ARENA; BORCHIellini, 1999). Entretanto, foi demonstrado que a solução apresenta valores incomuns de custos exergéticos unitários, ou seja, inferiores à unidade (AGUDELO; VALERO; TORRES, 2012; SANTOS; NASCIMENTO; LORA, 2006; SANTOS et al., 2008; SANTOS et al., 2009a; SANTOS et al., 2009b).

Santos, Nascimento e Lora (2006) seguiram a ideia da desagregação da exergia física, que já era usada para as parcelas térmica e mecânica (Modelo $E^T E^M$) por outros autores (FRANGOPOULOS, 1994; TSATSARONIS; PISA, 1994), bem como a combinação da desagregação de exergia com a neguentropia (SPAKOVSKY, 1994). Com a união dessas correntes, os autores propuseram desagregar a exergia total em duas parcelas, isto é, a parcela entálpica (H) a ser utilizada em conjunto com a parcela entrópica (S) para formular o Modelo H&S, sendo ambas consideradas como parcelas da exergia (LOURENÇO; NEBRA; SANTOS, 2014). Esta nova abordagem permitiu isolar o condensador e obter valores consistentes de custos exergéticos unitários, mas não conseguiram isolar a válvula.

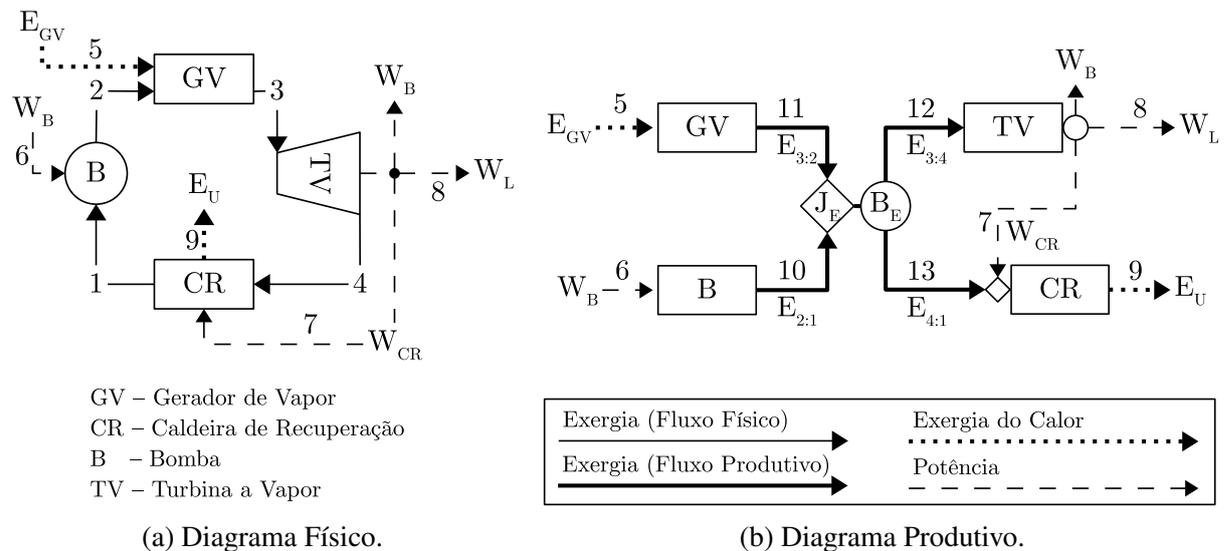
Posteriormente, Lourenço (2012) desenvolveu uma solução para equipamentos dissipativos, a qual desagrega a exergia física nas parcelas de energia interna (U), trabalho de fluxo (F) e entropia (S), conhecida como Modelo UFS. O autor também sugeriu outro nível de desagregação, cujo trabalho de fluxo é um produto da pressão pelo volume específico (LOURENÇO, 2016). Dessa forma, o Modelo UFS+ desagrega a exergia física em quatro parcelas: energia interna (U), trabalho de fluxo do volume (FV), trabalho de fluxo da pressão (FP) e entropia (S), definindo assim, o produto e insumo de qualquer equipamento.

Em resumo, a desagregação da exergia permite definir insumo e produto dos equipamentos dissipativos. No entanto, essa opção gera um aumento da complexidade para a modelagem termoeconômica, devido ao aumento do número de fluxos a serem analisados no processo de formação de custo (TSATSARONIS; WINHOLD, 1985; TORRES et al., 1996; ARENA; BORCHIellini, 1999).

Recentemente, foi apresentada uma proposta para isolar equipamentos dissipativos, que utiliza a desagregação localizada da exergia física (SANTOS et al., 2020a; SANTOS et al., 2020b; SANTOS et al., 2021). Esta técnica permite reduzir a complexidade envolvida quando comparada à desagregação da exergia física de todo o sistema, uma vez que é aplicada apenas no subsistema desejado, mas pode perder precisão. Os trabalhos que apresentaram a proposta aplicaram a desagregação localizada da exergia física somente em diagramas produtivos.

Como mencionando anteriormente, toda metodologia termoeconômica precisa definir produto e insumo para cada subsistema da planta, permitindo assim aplicar o processo de formação de custo, o qual pode ser representado por meio do diagrama físico (VALERO et al., 1994a; TSATSARONIS; PISA, 1994; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006) ou diagrama produtivo (FRANGOPOULOS, 1983; FRANGOPOULOS, 1994; SPAKOVSKY, 1986; SPAKOVSKY, 1994), conforme mostrado na Fig. 1.

Figura 1 – Exemplo dos diagramas físico e produtivo em um sistema Rankine de cogeração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora o diagrama produtivo apresente a vantagem de mostrar clara e graficamente como o produto de um determinado subsistema é distribuído ao longo da planta, esse também deve permitir avaliar todos os fluxos do diagrama produtivo em relação ao estado da planta, conforme definido pelo diagrama físico (SANTOS, 2009). Isto porque o custo dos fluxos físicos internos não são calculados e, além disso, os subsistemas são conectados utilizando componentes fictícios (junção e bifurcação) com fluxos produtivos, os quais podem não considerar a interconexão física apresentada no fluxograma. Esse procedimento pode ser arbitrário, dependendo da planta que está sendo analisada e da interpretação do analista (LOZANO; VALERO; SERRA, 1993; TORRES et al., 1996). Por sua vez, o diagrama físico evita a arbitrariedade relacionada à interconexão dos subsistemas, apesar de não permitir calcular os custos dos fluxos produtivos internos.

Frangopoulos (1983) na sua tese apresentou o desenvolvimento do diagrama produtivo. No decorrer da elaboração da tese, o autor demonstrou uma nova abordagem de diagrama, a qual

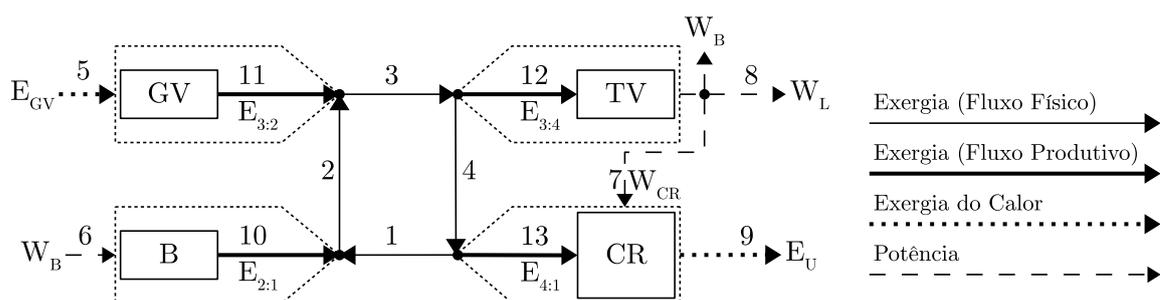
mostra as funções de cada unidade produtiva e suas distribuições ao longo do sistema. Além disso, esse não apresenta as junções e bifurcações presentes no diagrama produtivo, bem como utilizava de fluxos produtivos e *loops* de fluxos físicos. Este diagrama foi chamado de diagrama termoeconômico intermediário.

Em 1995, Lazzaretto e Macor tiveram como objetivo o cálculo dos custos unitários médios e marginais dos fluxos de exergia partindo de uma mesma estrutura produtiva. Para cumprir com o objetivo proposto utilizou do diagrama físico, produtivo e produtivo físico. Este último diagrama foi usado para demonstrar a relação entre os diagramas físico e produtivo, ou seja, mostra como se relacionam os fluxos físicos e produtivos dentro do componente. O novo diagrama, em relação ao diagrama proposto por Frangopoulos (1983), delimita as fronteiras dos componentes e das unidades produtivas com seus respectivos fluxos, físico e produtivo, respectivamente.

Posteriormente, Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) discutiram os conceitos de unidade produtiva e componente, bem como demonstraram com mais ênfase as relações e comportamentos dos fluxos físicos e produtivos no componente. Segundo os autores, a unidade produtiva mostra explicitamente as interações, insumo e produto, entre o próprio componente e os fluxos de exergia, agindo como um coletor e distribuidor de insumo e produto. Segundo os autores, uma vez que as junções e bifurcações permanecem dentro dos limites do componente, as interligações entre os componentes se conservam na estrutura produtiva conforme é representado na estrutura física do sistema. Além disso, foi estabelecido pelos autores uma metodologia para elaboração das equações de balanço de custo e equações auxiliares.

Em seguida, nos trabalhos de Avellar et al. (2018b) e Avellar et al. (2018a) foram realizadas algumas modificações nos diagramas desenvolvidos por Frangopoulos (1983), Lazzaretto e Macor (1995) e Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), com a finalidade de mostrar de forma clara e graficamente o produto e insumo dos subsistemas, bem como a inter-relação física entre o subsistema. Desta forma, os equipamentos fictícios foram removidos e inseridos os nós na fronteira do componente, os quais apenas simbolizam a interface entre os fluxos físicos e produtivos. Um exemplo do novo diagrama é apresentando na Fig. 2, o qual foi denominado pelos autores de diagrama abrangente. O subsistema deste diagrama é composto por componente (linha tracejada) e unidade produtiva (linha contínua).

Figura 2 – Exemplo do diagrama abrangente em um sistema Rankine de cogeração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diagrama abrangente é uma alternativa às arbitrariedades presentes no diagrama produtivo, uma vez que os fluxos físicos são utilizados nas interconexões entre os subsistemas, dando um significado físico aos fluxos produtivos, além de avaliar os custos unitários internos dos fluxos físicos e produtivos no mesmo diagrama (LAZZARETTO; MACOR, 1995; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006; AVELLAR et al., 2018b; AVELLAR et al., 2018a).

O diagrama que combina os fluxos físicos e produtivos foi utilizado por Pacheco Ibarra et al. (2010), Hernandez, Bufon e Seabra (2014) e Orozco et al. (2017) na aplicação de diagnóstico e Lazzaretto e Macor (1995), Torres e Valero (2018), Avellar et al. (2018b), Avellar et al. (2018a) e Torres e Valero (2021) na alocação de custos por meio da exergia total. No entanto, nenhum desses trabalhos aplicou o Modelo H&S, UFS e UFS+ no diagrama abrangente, bem como a desagregação localizada da exergia física.

Diferente dos diagramas produtivos, os diagramas físicos e abrangentes usam os fluxos físicos para interconectar os subsistemas. No entanto, os fluxos físicos não são suficientes para identificar o processo de formação de resíduos. Os trabalhos (FRANGOPOULOS, 1994; TORRES et al., 2008; SEYYEDI; AJAM; FARAHAT, 2010; DENISE et al., 2020) concordam que o custo da exergia dos resíduos e os recursos empregados em seus respectivos métodos de tratamento devem ser distribuídos entre as unidades produtivas, portanto, aos produtos finais, proporcionalmente à sua responsabilidade por tal magnitude (LOZANO; VALERO, 1993b). Esta proporcionalidade também é conhecida como razão de distribuição de custo de resíduo e pode ser definida por diferentes métodos, ou seja, não há um critério geral para defini-la.

Na década de 1990, diferentes metodologias termoeconômicas (FRANGOPOULOS, 1994; LOZANO; VALERO, 1993b; TSATSARONIS; PISA, 1994; SPAKOVSKY, 1994), não consideravam explicitamente a destinação dos resíduos em seu processo de formação de custos. Entre as metodologias que trabalham com o diagrama físico, estão: a Teoria do Custo Exergético (TCE) (VALERO et al., 1994a) e a Exergoeconômica / AVCO (TSATSARONIS; PISA, 1994). O primeiro estabelecia que o custo do resíduo deveria ser alocado na caldeira de recuperação de sistemas de cogeração com turbina a gás, que ocasionou um aumento no custo do calor. Já no segundo, calcularam os custos dos gases de exaustão e propuseram dividir proporcionalmente ao valor da potência líquida e do calor útil. Para as metodologias que utilizam os diagramas produtivos, Análise Funcional Termoeconômica - AFT (FRANGOPOULOS, 1994) e Análise Funcional de Engenharia - AFE (SPAKOVSKY, 1994), a alocação do custo dos resíduos é realizada implícita e proporcionalmente à exergia térmica consumida na unidade produtiva que produziu o produto final.

Segundo Torres et al. (2008), as metodologias termoeconômicas não consideram a análise aprofundada da alocação de custos dos resíduos, sendo necessário desenvolver novas técnicas ou aprimorar as existentes para incluir tanto a alocação de custos dos resíduos quanto a análise do seu processo de formação. Desde 2000, diversas metodologias para tratamento de resíduos e isolamento dissipativo de equipamentos foram apresentadas. Entre as principais propostas estão

Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), Torres et al. (2008), Santos, Nascimento e Lora (2006) e Santos et al. (2009a), Seyyedi, Ajam e Farahat (2010), Agudelo, Valero e Torres (2012) e Denise et al. (2020).

Diante do exposto, verifica-se que nenhum dos trabalhos avaliam a aplicação da desagregação da exergia física (H&S, UFS e UFS+) no diagrama abrangente. Somado a isso, a desagregação da exergia física gera complexidade na modelagem e na construção do processo de formação de custo, uma vez que há aumento no número de fluxos a serem analisados. No entanto, evita os arbitrários critérios de distribuição de custos dos resíduos. Por fim, aplica-se a nova técnica de desagregação localizada da exergia física no diagrama abrangente para reduzir a complexidade da modelagem. Em resumo, este trabalho propõe uma sistematização generalizada para descrever o processo de formação de custos com menos arbitrariedade e complexidade.

A complexidade é um problema quando se utiliza a desagregação da exergia física e o diagrama abrangente. A solução é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, em que o primeiro passo para a construção da ferramenta é a existência de um procedimento sistematizado e generalizado.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um procedimento sistematizado e generalizado para a modelagem termoeconômica, de forma a descrever o processo de formação de custo menos arbitrário utilizando o diagrama abrangente e a desagregação da exergia, que possa servir de base para o desenvolvimento oportuno de uma ferramenta computacional.

Como objetivos específicos podem ser destacados:

- Formalizar o subsistema do diagrama abrangente, identificando os fluxos físicos e produtivos, bem como sua separação e decomposição para interconexão nos subsistemas.
- Aplicar o Modelo H&S, UFS e UFS+ no diagrama abrangente para diminuir as arbitrariedades da alocação do custo do resíduo e das unidades fictícias (junção e bifurcação).
- Aplicar os Modelos H&S, UFS e UFS+ no diagrama físico para verificar a aplicabilidade dos modelos e posterior comparação dos resultados com o diagrama abrangente.
- Formalizar o subsistema do diagrama abrangente para a aplicação da desagregação localizada da exergia física.
- Aplicar a desagregação localizada da exergia física para redução da complexidade na modelagem e por consequência no processo de formação de custo.

1.2 Estrutura do Texto

Além deste capítulo de introdução, onde foram apresentadas motivações, justificativas e objetivos, o presente trabalho contém sete outros capítulos, detalhados a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre a termoeconomia, contendo sua história, o significado de custo, as estruturas e diagramas utilizados, o uso da exergia e das soluções da desagregação, equipamentos dissipativos e o tratamento de resíduos.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação da metodologia do diagrama abrangente, demonstrando sua origem, representação dos subsistemas, procedimentos para representar o diagrama, além da obtenção dos balanços de custos e equações auxiliares.

Os estudos de casos foram divididos em quatro capítulos. O primeiro estudo de caso, presente no Capítulo 4, tem por objetivo mostrar as arbitrariedades e complexidades da elaboração dos diagramas produtivos por meio de uma planta nuclear de cogeração em ciclo combinado com turbina a gás hélio, *intercooler* e válvula de *by-pass*. Para o segundo estudo de caso, Capítulo 5, visa-se aplicar a metodologia para elaboração do diagrama abrangente em uma planta dual para produção de energia elétrica e água dessalinizada. Essa planta foi selecionada devido à ausência de equipamentos dissipativos e resíduos. Na sequência, o terceiro estudo de caso (Capítulo 6) aborda a questão da arbitrariedade da interconexão dos subsistemas, resíduo e desagregação localizada. No último estudo de caso (Capítulo 7), um sistema combinado de cogeração com produção de água gelada por meio de um *chiller* por absorção com torre de resfriamento de passagem única e dispositivo para captura de CO₂ é analisado de forma apenas literal e sistemática para mostrar a aplicabilidade do procedimento em muitos outros sistemas da engenharia térmica.

E por fim, as considerações finais são apresentadas no Capítulo 8.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma breve história da disciplina termoeconomia além das fundamentações teóricas para o melhor entendimento do processo de formação de custos, abordando conceitos como custo, estrutura e diagramas, a exergia total e as desagregações, equipamentos dissipativos e tratamento de resíduos.

2.1 História

Joseph Henry Keenan é considerado o precursor dos estudos da termoeconomia (GAGGIOLI, 1980; FRANGOPOULOS, 1983; EL-SAYED; GAGGIOLI, 1989; VALERO; SERRA; UCHE, 2006). Em seu trabalho de 1932, de acordo com Szargut (1980), Keenan enfatizou que a contabilidade dos custos deveria se basear na exergia, e não na energia. O estudo utilizou uma planta de cogeração para distribuir os custos para o calor e trabalho por meio dos conceitos de irreversibilidade e eficiência da segunda lei da termodinâmica (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

Segundo El-Sayed (2003), no início da década de 60, a partir do doutorado de Gaggioli (1961) e do relatório de Tribus e Evans (1963), foi iniciado o desenvolvimento da termoeconomia, por meio da utilização da segunda lei da termodinâmica como ferramenta para calcular os custos dos processos industriais. Tribus e Evans também foram os primeiros a utilizar o termo termoeconomia (EL-SAYED; EVANS, 1970; CERQUEIRA, 1999; VALERO; SERRA; UCHE, 2006). No final da década de 70, El-Sayed e Evans apresentaram a primeira formulação matemática para a termoeconomia (CERQUEIRA, 1999).

Embora nesse período houvesse várias abordagens teóricas, ainda havia uma lacuna para as aplicações de metodologias na análise, projeto e otimização de sistemas térmicos. Tais abordagens ocorreram somente na década de 80, com o aumento do interesse e dos estudos relacionados às técnicas e aplicações de análise termoeconômica. Apesar disso, somente na década de 90 foram apresentadas as maiores padronizações e formalismos entre as metodologias termoeconômicas desenvolvidas (ABUSOGLU; KANOGLU, 2009; LOURENÇO, 2016).

Devido ao surgimento de novas metodologias termoeconômicas, em 1994 os pesquisadores Christos Athanasios Frangopoulos, George Tsatsaronis, Antonio Valero e Michael R. von Spakovsky publicaram em um número especial da revista Energy cinco artigos visando realizar a comparação de suas metodologias aplicadas em um mesmo problema. Dos cinco artigos, um artigo descrevia o problema a ser resolvido (VALERO et al., 1994b) e os outros quatro artigos apresentavam a aplicação das metodologias com os conceitos utilizados e seus respectivos valores obtidos (VALERO et al., 1994a; FRANGOPOULOS, 1994; SPAKOVSKY,

1994; TSATSARONIS; PISA, 1994).

O problema foi denominado CGAM, o qual era composto de um sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa com caldeira de recuperação. Entretanto, o objetivo de comparação das metodologias desenvolvidas não foi alcançado. Cerqueira (1999) desenvolveu sua tese, de modo a realizar a comparação das metodologias. Os resultados obtidos mostram que as metodologias apresentaram diferenças, mas os resultados podem ser iguais quando assumidas as mesmas considerações para o tratamento das irreversibilidades externas, também chamado tratamento de resíduos (CERQUEIRA, 1999; SANTOS, 2009; LOURENÇO, 2016).

Os vários métodos termoeconômicos podem ser divididos em duas categorias: método de contabilidade de custo e método de otimização. Para os métodos de contabilidade de custos ou métodos de contabilidade exergoeconômica, ou métodos algébricos utilizam equações de balanço de custo derivadas de análises econômicas convencionais e equações de custo auxiliares para cada componente do sistema com base nos custos médios. Já os métodos de otimização ou abordagens lagrangianas, ou métodos de cálculos são construídos por equações diferenciais, onde o custo dos fluxos de um sistema são obtidos pelos procedimentos de otimização, baseados nos multiplicadores de Lagrange usados para determinar os custos marginais (EL-SAYED; GAGGIOLI, 1989; CERQUEIRA, 1999; UCHE, 2000; VALERO; SERRA; UCHE, 2006; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006; ABUSOGLU; KANOGLU, 2009).

Os principais pesquisadores do método de contabilidade de custo (método algébrico) foram Orbet e Gaggioli, que utilizam dos conceitos da exergia e termoeconomia para obter os custos médios. Seus principais sucessores foram Lazzaretto, Tsatsaronis, Pisa, Winhold, dentre outros. Já, Tribus, Evans e El-Sayed desenvolveram o método de otimização (método de cálculos) utilizando conceitos como a neguentropia, multiplicadores de Lagrange, exergia e termoeconomia para obter os custos marginais. Seus sucessores são Frangopoulos, von Spakovsky, Sciubba, dentre outros. Por fim, os pesquisadores Valero, Lozano, Erlach e Verda utilizaram os métodos algébricos e posteriormente do método de cálculos.

Até o ano 2000, o assunto resíduo e equipamento dissipativo permanecia em aberto e a maioria dos desenvolvimentos focados nesses temas foram realizados nos últimos 20 anos.

2.2 Custo

Cada componente necessita de recurso ou insumo para executar sua função, a qual definirá seu produto. Por sua vez, um conjunto de componentes que se inter-relacionam formam um sistema, que se destina a gerar produtos formando um processo produtivo (VALERO; SERRA; UCHE, 2006; TORRES; VALERO; PEREZ, 2007). Esses processos não são totalmente eficientes, dado que apresentam perdas e resíduos, os quais são indesejáveis ao processo. Neste sentido é preciso realizar a contabilidade dessas perdas e resíduos com a finalidade de calcular o custo do processo produtivo. Portanto, o custo é a quantidade de recurso utilizado para produzir um

produto. O procedimento de contabilizar o custo do processo produtivo é baseado no processo de formação de custo (TORRES; VALERO, 2000).

O processo de formação de custo busca entender a valorização do fluxo após cada etapa do processo produtivo, sendo o fluxo quantificado pela exergia e o processo produtivo representando pelos sistemas térmicos. Para uma melhor compreensão da forma como estão distribuídos os custos e a exergia é utilizada a estrutura física ou a estrutura produtiva do sistema (TORRES et al., 1996; ARENA; BORCHIPELLINI, 1999).

Independentemente da estrutura utilizada, o conceito de custo, valorado em unidades monetárias, energéticas, exergéticas, etc., expressa a quantidade de recursos necessários para obter um produto, ou seja, é uma relação entre o produto obtido e os recursos necessários para obtê-lo. Dependendo das condições e do método de cálculo, pode-se diferenciar em custo médio e custo marginal.

O custo médio de um produto é a razão entre a quantidade de recursos (R) consumido pelo processo produtivo e a quantidade de produto (P), enquanto o custo marginal indica os recursos adicionais (∂R) necessários para gerar mais uma unidade do produto sob condições especificadas (SERRA, 1994; VALERO; SERRA; UCHE, 2006; TORRES et al., 2008). É importante destacar que os custos médios e marginais irão coincidir quando as equações do modelo termoeconômico forem funções homogêneas de primeiro grau (SERRA, 1994; ARENA; BORCHIPELLINI, 1999; VALERO; SERRA; UCHE, 2006). Assim, o custo médio unitário (k) é definido pela Eq. (1) e o custo marginal unitário (k') pela Eq. (2) (VALERO; TORRES; SERRA, 1992).

$$k = \frac{R}{P} \quad (1)$$

$$k' = \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_{\text{condições}} \quad (2)$$

Segundo Serra (1994), o custo é uma propriedade conservativa que permite estabelecer um balanço de custo em cada um dos subsistemas da planta. Assim sendo, um modelo termoeconômico é um conjunto de balanços de custo formulados para cada componente que descrevem o processo de formação de custo do sistema (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006). A Eq. (3) mostra o balanço de custo aplicado ao componente, onde a diferença dos custos (α) associados aos fluxos de exergia (Y) que saem e entram são iguais aos encargos devido ao investimento de capital, às despesas operacionais e de manutenção (VALERO; TORRES; SERRA, 1992).

$$\sum (\alpha_{out} Y_{out}) - \sum (\alpha_{in} Y_{in}) = Z \quad (3)$$

Onde os subscritos *out* e *in* significam respectivamente, saída e entrada, α é o custo unitário, que pode assumir custo monetário unitário (c) ou custo exergético unitário (k), a depender do estudo. Z é o custo externo por hora do subsistema devido ao custo de capital, operação e manutenção dos equipamentos, porém é nulo ao se avaliar o custo exergético unitário,

conforme a Eq. (4). Por fim, Y representa o fluxo interno, que pode assumir qualquer magnitude termodinâmica, tais como, potência (W), exergia total (E), parcelas da exergia, etc.

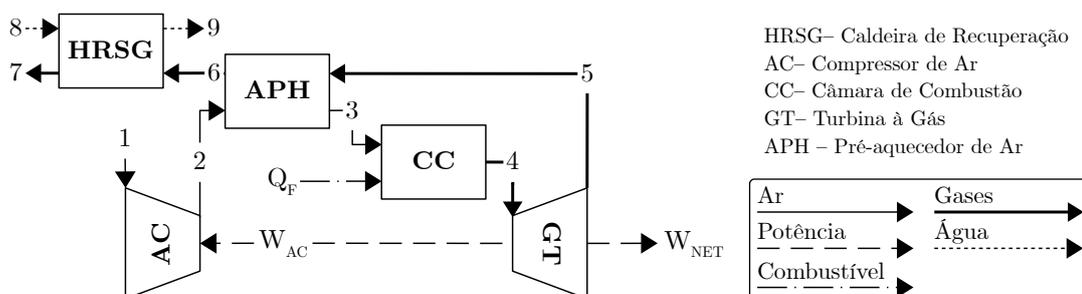
$$\sum (k_{out} Y_{out}) - \sum (k_{in} Y_{in}) = 0 \quad (4)$$

2.3 Estruturas e Diagramas

Um sistema é formado por equipamentos conectados uns aos outros por meio dos fluxos materiais e energia. Cada sistema é considerado único, visto que os equipamentos, os fluxos e as relações entre eles também são. Portanto, ao descrever fisicamente um sistema é necessário a relação dos equipamentos e seus principais fluxos, no intuito de simplificar o fluxograma da planta.

Dependendo da análise termoeconômica a ser realizada, há necessidade de separar ou agrupar equipamentos para formar um componente, ou subsistemas (conjunto de componentes). Dessa forma, cada análise requer uma descrição física da instalação com nível de detalhe requerido e cada descrição apresenta um diagrama associado definindo a estrutura física do sistema (SERRA, 1994; VALERO; SERRA; UCHE, 2006). Segundo Lourenço (2016), a estrutura física da planta é definida como os componentes ou subsistemas relevantes para a alocação de custos, os quais são interconectados uns aos outros e ao entorno por fluxos materiais e energia. A Fig. 3 mostra o diagrama físico da estrutura física do problema CGAM (VALERO et al., 1994b).

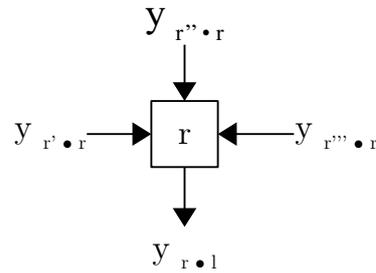
Figura 3 – Estrutura física representada pelo diagrama físico do problema CGAM.



Fonte: Adaptada de Frangopoulos (2003).

Outra forma de representação de uma planta é por meio do diagrama funcional ou produtivo. Neste caso, para o melhor entendimento do diagrama é definido sistema como um conjunto de unidades que se relacionam, onde a unidade é um componente ou conjunto de componentes que apresentam um propósito de produção, isto é, exercem uma função produtiva (FRANGOPOULOS, 1983; FRANGOPOULOS, 2003). As unidades são representadas por figuras geométricas e as linhas representam as relações entre unidades, sistema e ambiente. Uma vez que as relações são estabelecidas pela função de cada unidade, o sentido da função é indicada pela seta nas linhas (Fig. 4) (FRANGOPOULOS, 1983; FRANGOPOULOS, 1987; AGAZZANI; MASSARDO, 1997).

Figura 4 – Representação de uma unidade no diagrama funcional.



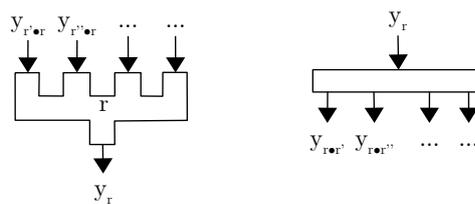
Fonte: Adaptada de Frangopoulos (1983) e Frangopoulos (2003).

Onde:

- r é a r -ésima unidade do sistema ($r = 1, 2, 3, \dots, \sigma$);
- y_r é o produto, isto é, a descrição quantitativa apropriada da função da unidade r ;
- $y_{r' \bullet r}$, $y_{r'' \bullet r}$, $y_{r''' \bullet r}$ são funções utilizadas pela unidade r , as quais partem de outras unidades do sistema ou do entorno (representado por $r = 0$).

É denominada como "junção" a situação em que o produto de duas ou mais unidades se unem, e "bifurcação" quando o produto é distribuído para mais de uma unidade. Essas unidades são consideradas fictícias, a menos que correspondam a componentes reais da planta (FRANGOPOULOS, 1983; LOZANO; VALERO; SERRA, 1993; FRANGOPOULOS, 2003). A representação da junção e bifurcação, segundo Frangopoulos (2003), é apresentada na Fig. 5. Atualmente a junção e bifurcação são representadas por losangos e círculos, respectivamente (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

Figura 5 – Representação de junção e bifurcação.

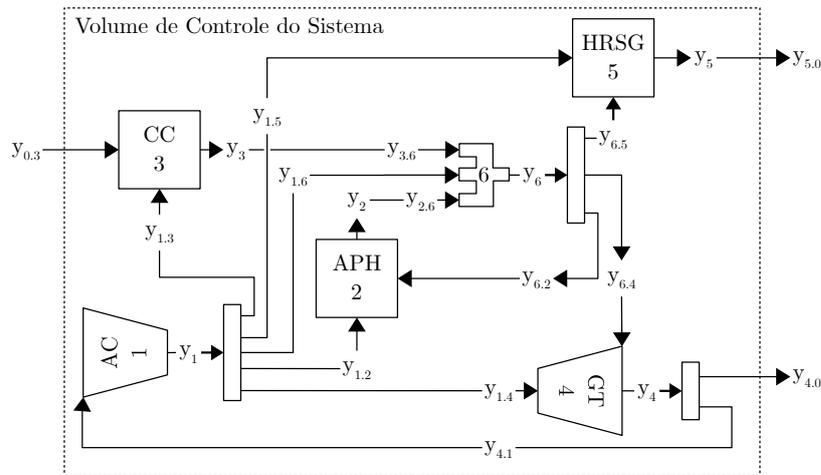


Fonte: Adaptada de Frangopoulos (2003).

A Fig. 6 mostra o diagrama funcional aplicado no problema CGAM utilizando a desagregação da exergia física nas parcelas de exergia térmica (E^T) e exergia mecânica (E^M), onde os fluxos presentes no diagrama são uma combinação de fluxos físicos, cujos valores são obtidos através de variáveis físicas. A Tab. 1 mostra as equações presentes na Fig. 6. Outra representação é dada pela Fig. 7 utilizando a exergia total, baseada em Erlach, Serra e Valero (1999).

No diagrama funcional ou produtivo da Fig. 7, a seta que entra na unidade produtiva é denominada insumo e aquela que deixa a unidade produtiva é o produto.

Figura 6 – Diagrama funcional aplicado no problema CGAM utilizando a desagregação da exergia em térmica e mecânica.



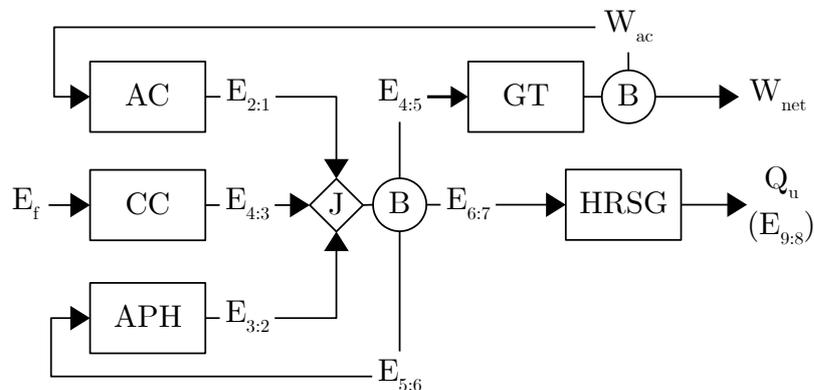
Fonte: Adaptada de Frangopoulos (2003).

Tabela 1 – Equações dos fluxos presentes no problema CGAM da Fig. 6.

$y_1 = m_a (e_2 - e_1)$	$y_{1.2} = m_a (e_3^M - e_2^M + e_5^M - e_6^M)$
$y_2 = m_a (e_3^T - e_2^T)$	$y_{1.3} = m_a (e_4^M - e_3^M)$
$y_3 = m_g e_4^T - m_a e_3^T$	$y_{1.4} = m_a (e_4^M - e_5^M)$
$y_4 = W_T$	$y_{1.5} = m_a (e_6^M - e_7^M)$
$y_5 = m_s (e_9 - e_8)$	$y_{1.6} = m_a (e_2^T - e_1^T)$
$y_6 = m_g (e_4^T - e_7^T)$	$y_{2.6} = m_g (e_3^T - e_2^T)$
$y_{0.3} = m_f H_u$	$y_{3.6} = m_g e_4^T - m_a e_3^T$
$y_{4.0} = W$	$y_{4.1} = W_C$
$y_{5.0} = y_5 \equiv E_S^Q$	$y_{6.2} = m_g (e_5^T - e_6^T)$
	$y_{6.4} = m_g (e_4^T - e_5^T)$
	$y_{6.5} = m_g (e_6^T - e_7^T)$

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 7 – Diagrama funcional aplicado no problema CGAM utilizando a exergia total.



Fonte: Adaptada de Erlach, Serra e Valero (1999).

Os fluxos produtivos são obtidos e definidos em função dos fluxos físicos. Os fluxos produtivos de potência seja elétrica ou mecânica são os próprios fluxos físicos de potência, enquanto os fluxos produtivos externos, por exemplo, o combustível, são os mesmos da estrutura física (SANTOS, 2009).

A partir da variação entre dois fluxos físicos (E_i e E_j), os outros fluxos produtivos presentes no diagrama são formados, conforme a Eq. (5), sendo representados como $E_{i:j}$. Essa análise também é aplicável as parcelas da exergia física: entalpia (H), entropia (S), energia interna (U), trabalho de fluxo (F), trabalho de fluxo da pressão (FP) e trabalho de fluxo do volume (FV).

$$E_{i:j} = E_i - E_j \quad (5)$$

Segundo Santos (2009), existem equipamentos onde há mistura de fluxos físicos, como, por exemplo, os desaeradores, ou seja, funcionam como junções reais. Diferentes fluxos se misturam nestes equipamentos trocando massa e exergia. Quando dois fluxos de potenciais exergéticos diferentes se misturam, um terceiro fluxo é formado com potencial exergético intermediário. Considerando o maior potencial exergético o fluxo com subscrito "i" e o menor "j", o insumo é definido como a redução do potencial exergético do fluxo mássico (m_i) que entrou com maior potencial exergético, conforme a Eq. (6). Similar ao insumo, o produto é definido como o aumento do potencial exergético do fluxo mássico (m_j) que entrou com menor potencial exergético, conforme a Eq. (7)

$$E_{i:j} = m_i \cdot (e_i - e_j) \quad (6)$$

$$E_{i:j} = m_j \cdot (e_i - e_j) \quad (7)$$

O diagrama físico (Fig. 3) mostra as conexões físicas entre os diferentes componentes da planta, enquanto o diagrama funcional (Fig. 7) fornece a distribuição de recursos entre as diferentes unidades até transformá-los em produtos finais, ou seja, mostra o processo produtivo da planta. Dessa forma, fornece uma nova perspectiva ao analista. Porém, o diagrama funcional pode apresentar arbitrariedades, as quais se apresentam mais evidentes nas distribuições das junções e bifurcações, pois, dependem da preferência e interpretação do analista (MODESTO; NEBRA, 2006; COLOMBO et al., 2017). Portanto, como é definida a estrutura produtiva do diagrama funcional é o ponto-chave na análise termoeconômica (LOZANO; VALERO, 1993b; CERQUEIRA; NEBRA, 1999).

O diagrama funcional é uma representação gráfica da estrutura produtiva, em que é demonstrado claramente a distribuição do insumo e produto. A depender da definição de insumo e produto das unidades é possível construir diversas estruturas, as quais permitem diferentes distribuições dos recursos da planta entre as unidades resultando em diferentes valores de custo. Assim, um significado físico deve ser requerido para a estrutura produtiva, de modo a ser sensível ao comportamento da planta e obter custos com significado físico (ERLACH; SERRA; VALERO, 1999; VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

Apesar do nome estrutura produtiva, essa não está diretamente relacionada ao fluxo produtivo, mas sim à definição de insumo e produto. Desse modo, pode ser aplicada a ambos os fluxos, físico e produtivo. Nesse sentido, define-se estrutura produtiva como uma descrição, por texto, tabela ou diagrama, da relação e da conexão do propósito produtivo entre os componentes e unidades, de modo a permitir e facilitar a elaboração do balanço de custo para cada componente e unidade. Portanto, o produto e o insumo são definidos a partir da definição da função de cada equipamento, conforme as Tabs. 2 e 3 (FRANGOPOULOS, 1983; VALERO et al., 1994a; TORRES et al., 1996; FRANGOPOULOS, 2003). Essas demonstram a estrutura produtiva na forma de tabela para o diagrama físico da Fig. 3 e o diagrama produtivo da Fig. 7, referente ao problema CGAM, respectivamente.

Tabela 2 – Estrutura produtiva do problema CGAM para o diagrama físico da Fig. 3.

Componente	Insumo	Produto	Resíduo
Compressor de ar	W_{ac}	$E_2 - E_1$	-
Pré-aquecedor de ar	$E_5 - E_6$	$E_3 - E_2$	-
Câmara de combustão	E_f	$E_4 - E_3$	-
Turbina a gás	$E_4 - E_5$	$W_{ac} + W_{net}$	-
Caldeira recuperativa	$E_6 - E_7$	$E_9 - E_8 = E_{Qu}$	E_7

Fonte: Produzido pelo autor.

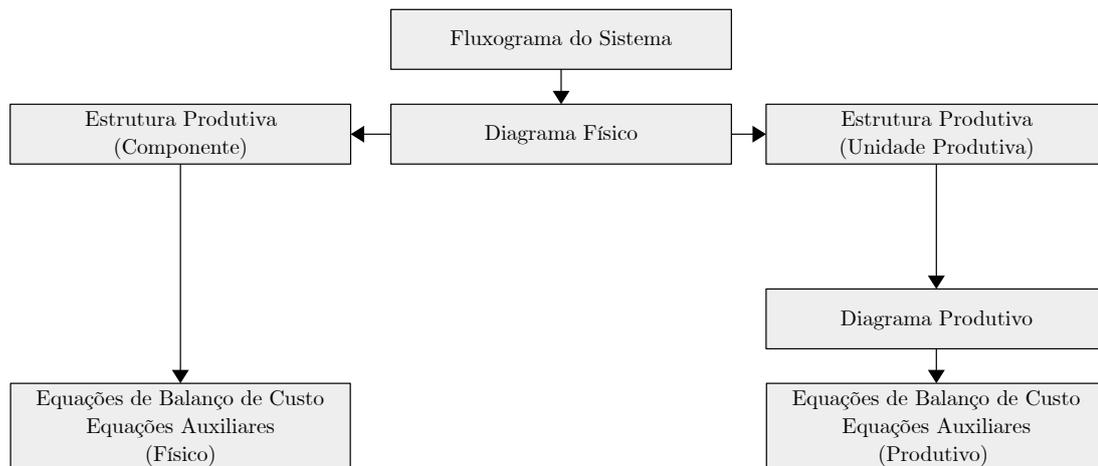
Tabela 3 – Estrutura produtiva do problema CGAM para o diagrama produtivo da Fig. 7.

Unidade Produtiva	Insumo	Produto
Compressor de ar	W_{ac}	$E_{2:1}$
Pré-aquecedor de ar	$E_{5:6}$	$E_{3:2}$
Câmara de combustão	E_f	$E_{4:3}$
Turbina a gás	$E_{4:5}$	$W_{ac} + W_{net}$
Caldeira recuperativa	$E_{6:7}$	$E_{9:8} = E_{Qu}$

Fonte: Produzido pelo autor.

A Fig. 8 mostra as etapas de construção dos diagramas físico e produtivo. Primeiramente, o fluxograma do sistema é simplificado com o intuito de remover os fluxos não necessários para análise termoeconômica, criando assim, o diagrama físico. Ao desenvolver esse diagrama, obtêm-se os custos unitários dos fluxos físicos. Para isso é necessário a construção da estrutura produtiva dos componentes e posteriormente a aplicação do balanço de custo e equações auxiliares dos fluxos físicos. Por outro lado, a partir do diagrama físico, desenvolve-se o diagrama produtivo, o qual calcula o custo unitário dos fluxos produtivos. Desta forma é necessária a elaboração da estrutura produtiva das unidades produtivas e aplicação do balanço de custo e equações auxiliares dos fluxos produtivos.

Figura 8 – Etapas para obtenção das equações de balanço de custo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A aplicação das metodologias termoeconômicas não serão abordadas nesta tese, mas para além das metodologias que abordam a desagregação da exergia (E^{TEM} , H&S, UFS, UFS+), são conhecidos outros métodos com características específicas:

- *Average Cost Approach (AVCO)* (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996)(LAZZARETTO; TSATSARONIS, 1997 apud LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006);
- *Engineering Functional Analysis (EFA)* (SPAKOVSKY, 1986; SPAKOVSKY; EVANS, 1990);
- *Exergetic Cost Theory (ECT)* (VALERO; LOZANO; MUNOZ, 1986);
- *Exergy Economics Approach (EEA)* (GAGGIOLI; WEPFER, 1980; GAGGIOLI, 1983);
- *First Exergoeconomic Approach (FEA)* (TSATSARONIS; WINHOLD, 1985);
- *Last-In-First-Out Approach (LIFO)* (TSATSARONIS; LIN, 1990; TSATSARONIS, 1993);
- *Specific Exergetic Cost (SPECOC)* (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006);
- *Structural Analysis Approach (SAA)* (VALERO; TORRES; SERRA, 1992);
- *Thermoeconomic Function Analysis (TFA)* (FRANGOPOULOS, 1983; FRANGOPOULOS, 1987);

2.4 Exergia e a Desagregação

Os sistemas térmicos possuem diferentes tipos de qualidades e quantidades de fluxos, o que torna útil e justificada a utilização de uma mesma base de comparação (CERQUEIRA, 1999). Vários trabalhos (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1996; CERQUEIRA, 1999; VALERO;

SERRA; UCHE, 2006; DINCER; ROSEN, 2013) concordam que a exergia é a magnitude termodinâmica adequada para se associar ao custo, haja vista que essa contém informações da primeira e segunda lei da termodinâmica, qualifica a energia e localiza irreversibilidades. Além disso, permite a comparação em bases iguais dos diferentes tipos de fluxos. Assim, a exergia tornou-se uma ferramenta importante para o projeto e análise de sistemas térmicos, pois, permite a combinação da termodinâmica e da economia, base essa para a Termoeconomia (SANTOS, 2009).

Diferentemente da energia, a exergia não se conserva, logo todo fenômeno irreversível causa perda exergética que contribuem para a redução da eficiência do processo por consequência de um aumento do consumo de energia ou potência. Ao realizar uma análise exergética, o principal objetivo é identificar e avaliar quantitativamente o efeito de fenômenos irreversíveis que aumentam a ineficiência dos processos considerados (GAGGIOLI, 1980; SZARGUT, 1980; GAGGIOLI, 1983), ou seja, a análise exergética localiza e quantifica as irreversibilidades ou a destruição de exergia de um processo (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

Segundo Kotas (1985) “a exergia de um fluxo de matéria é igual à quantidade máxima de trabalho que pode ser obtida quando o fluxo é trazido de seu estado inicial para o estado morto por processos reversíveis durante os quais o fluxo pode interagir apenas com o ambiente”. Ainda conforme o autor, a exergia pode ser dividida em quatro componentes principais, cinética, potencial, física e química, desde que excluídos os efeitos nucleares, magnetismo, eletricidade e tensão superficial, conforme a Eq. (8) (KOTAS, 1980; KOTAS, 1985), onde E é a exergia total e os componentes E^{ki} , E^p , E^{ph} e E^{ch} , respectivamente, exergia cinética, potencial, física e química. A Eq. (8) ainda pode ser escrita na forma de exergia específica, Eq. (9), onde $e = E/m$.

$$E = E^{ki} + E^p + E^{ph} + E^{ch} \quad (8)$$

$$e = e^{ki} + e^p + e^{ph} + e^{ch} \quad (9)$$

Por apresentarem a capacidade de se transformar completamente em trabalho, as exergias cinética e potencial são consideradas de alta qualidade. Em contrapartida, as exergias física e química são consideradas de baixa qualidade por não apresentarem a mesma capacidade (KOTAS, 1980; KOTAS, 1985). As exergias cinética e potencial normalmente não são aplicadas em análises de sistemas de energia, devido à baixa contribuição para a exergia total, a menos que o sistema possua bocais ou difusores.

A componente física da exergia (E^{ph}) pode ser desagregada em parcelas térmica e mecânica, apresentadas por Frangopoulos (1983). Contudo, segundo Torres et al. (1996), o primeiro a propor a desagregação da exergia física em térmica e mecânica foi Tsatsaronis e Lin (1990). Kotas (1985) comprovou que essas parcelas fazem parte da exergia através de processos reversíveis

hipotéticos. Dessa forma, a Eq. (11) é obtida pela substituindo da Eq. (10) na Eq. (8).

$$E^{ph} = E^T + E^M \quad (10)$$

$$E = E^T + E^M + E^{ch} \quad (11)$$

Onde a exergia física (E^{ph}) representa o potencial máximo de produção de trabalho por um fluxo quando alterada das condições iniciais até o estado de referência, definido por temperatura e pressão. A parcela térmica (E^T) está associada aos efeitos da temperatura, enquanto a parcela mecânica (E^M) a efeitos da pressão e a exergia química (E^{ch}) representa o potencial de produzir trabalho por meio da variação da composição ou concentração (KOTAS, 1985; TSATSARONIS; WINHOLD, 1985; ARENA; BORCHIELLINI, 1999).

Segundo Lourenço (2016), a desagregação da exergia física apresenta limitações quando se trabalha com fluido real, pois, na mudança de fase a pressão e a temperatura de uma substância pura são dependentes, gerando arbitrariedade devido à impossibilidade de obtenção das parcelas térmica e mecânica de forma direta. Ainda segundo o autor, outras formas de obtenção das componentes foram sugeridas nos trabalhos de Paulus, Tsatsaronis e Morosuk (2004) e Morosuk e Tsatsaronis (2005), porém, nenhuma delas superou tal limitação e arbitrariedade. A metodologia mais utilizada foi proposta por Tsatsaronis (1993) e Morosuk e Tsatsaronis (2008) (FARIA, 2014).

Frangopoulos (1983), buscando alternativas à desagregação da exergia total, utilizou de um fluxo fictício, a neguentropia, com a exergia total na definição da estrutura produtiva (TORRES et al., 1996). Apesar de ser fictícia, a neguentropia, contribuiu para definir o produto do condensador, a qual não era definida até aquele momento (AGAZZANI; MASSARDO, 1997; ARENA; BORCHIELLINI, 1999).

A tese de Frangopoulos (1983) pode ser considerada o primeiro trabalho com neguentropia aplicada na termoeconomia, porém, o próprio autor relata que o termo neguentropia foi introduzido por Brillouin, e que Smith em 1981 utilizou o conceito (FRANGOPOULOS, 1987; SPAKOVSKY; EVANS, 1989). Segundo Santos (2009), “A *neguentropia (negativa da entropia)* é uma magnitude ou função que quantifica a redução da entropia do fluido de trabalho. Para ter a mesma dimensão da exergia, a neguentropia se expressa multiplicando a variação da entropia pela temperatura de referência”, conforme Eq. (12), onde o subscrito 0 é referente ao ambiente, \dot{m} é a vazão mássica, S é a neguentropia ou entropia e o s é a entropia específica.

$$S = \dot{m} T_0 (s - s_0) \quad (12)$$

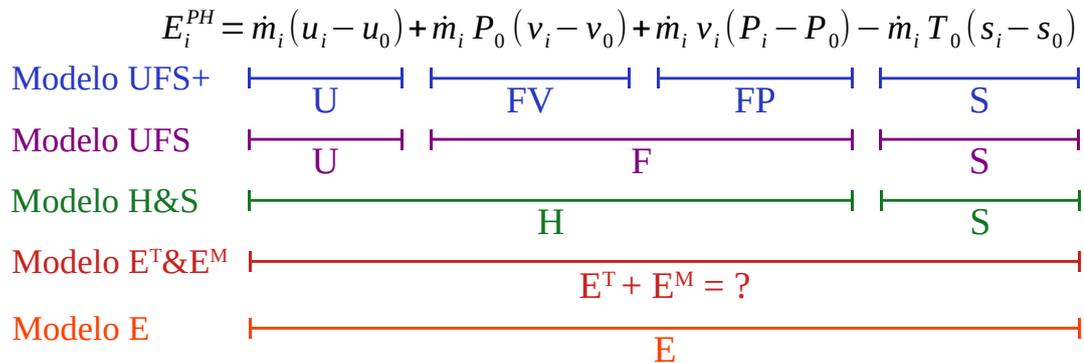
A utilização da neguentropia como fluxo fictício com a exergia total geram resultados incoerentes, pois, contradizem a vantagem da cogeração em relação à produção separada dos produtos, bem como apresentam produto maior que o insumo (SANTOS; NASCIMENTO; LORA, 2006; SANTOS et al., 2008; SANTOS et al., 2009a).

Por criticarem a utilização da neguentropia com a exergia total e reconhecerem a utilidade desse fluxo na definição de produto do condensador, Santos, Nascimento e Lora (2006) propuseram desagregar a exergia física nas parcelas entálpica (H) e entrópica (S), de modo a remover a inconsistência apresentada pela utilização da neguentropia com a exergia total. A comprovação, que a entalpia e a entropia eram parcelas da exergia, foi realizada por Lourenço (2016) utilizando de metodologia semelhante à de Kotas (KOTAS, 1985).

Lourenço (2012) visando uma solução para equipamentos dissipativos, neste caso, válvulas, propôs a desagregação da exergia física nas parcelas de energia interna (U), trabalho de fluxo (F) e entropia (S). Percebendo que a metodologia desenvolvida definia produto e insumo somente de válvulas de fluido real, o autor sugeriu outro nível de desagregação, cujo trabalho de fluxo é um produto da pressão pelo volume específico (LOURENÇO, 2016). Dessa forma, a exergia física passou a ter quatro parcelas: energia interna (U), trabalho de fluxo do volume (FV) e da pressão (FP), e entropia (S). Portanto, definindo o produto e insumo de qualquer equipamento, entretanto, aumentando a complexidade no desenvolvimento da estrutura produtiva e do diagrama produtivo.

As desagregações da exergia física para fluidos reais são mostrados na Fig. 9, na qual se observa que não é possível desagregar a exergia física em térmica e mecânica sem arbitrariedade, conforme relatado anteriormente. Já as desagregações da exergia física para fluido com comportamento de gás ideal são mostrados na Fig. 10.

Figura 9 – Desagregação da exergia física para o fluido real.



Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

As variáveis que definem estas equações são: vazão mássica (\dot{m}), entalpia específica (h), entropia específica (s), pressão (p), volume específico (v), energia interna específica (u), temperatura (T) e o subscrito (0) é referente as condições do ambiente.

A desagregação da exergia física em suas parcelas podem melhora a precisão dos resultados da análise. No entanto, devido ao aumento do número de fluxos, também resulta em crescimento da complexidade na elaboração das equações de balanço de custo, bem como na elaboração dos diagramas. Dessa forma, a desagregação da exergia deve ser baseada na finalidade do estudo e no sistema que está sendo avaliado (TORRES et al., 1996; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

Figura 10 – Desagregação da exergia física para fluido com comportamento de gás ideal.

$$E^{PH} = \dot{m} \int_{T_0}^T c_v dT + \dot{m} \int_{v_0}^v P dv + \dot{m} \int_{P_0}^P v dP - \dot{m} T_0 \int_{T_0}^T \frac{c_p}{T} dT + \dot{m} R T_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

Modelo UFS+ | U | FV | FP | S

Modelo UFS | U | F | S

Modelo H&S | H | S

Modelo E^T&E^M | E^T | E^M

Modelo E | E

Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

2.5 Equipamento Dissipativos

Os equipamentos dissipativos (válvulas, condensadores, etc.) não apresentam um propósito produtivo, ou seja, esses componentes destroem a exergia sem ganho termodinâmico, porém, são essenciais para o funcionamento correto de uma planta (CERQUEIRA, 1999; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006). Segundo Torres et al. (2008), os equipamentos dissipativos têm como finalidade eliminar total ou parcialmente um fluxo indesejável através de interações com outros componentes, que permite em alguns casos, maior produção ou eficiência para o sistema (TORRES et al., 1996; ARENA; BORCHIPELLINI, 1999).

Com a impossibilidade de definir insumo e produto de equipamentos dissipativos por meio da exergia total, uma das soluções consiste na união com um equipamento produtivo. Esta opção, porém, reduz tanto a qualidade, quanto a precisão da análise termoeconômica. Assim, cada análise termoeconômica requer um nível de agregação específica dos componentes e dos fluxos da planta (SERRA, 1994; ARENA; BORCHIPELLINI, 1999). Haja vista que a estrutura produtiva ajuda a entender o processo de formação de custo dos produtos, podendo assim ser usada como um critério para a desagregação do sistema (TORRES et al., 1996).

No caso de condensadores, uma solução foi proposta por Frangopoulos (1983) e Frangopoulos (1987) para definir produto e insumo. Essa utiliza de um fluxo fictício chamado neguentropia, a qual é considerada o produto do condensador, e a exergia, como insumo. Dessa forma, o condensador torna-se o fornecedor de neguentropia para o sistema. Alguns pesquisadores constataram que este fluxo fictício gera resultados inconsistentes quando utilizado em conjunto da exergia total (SANTOS; NASCIMENTO; LORA, 2006; SANTOS et al., 2008; SANTOS et al., 2009a), conforme comentado anteriormente na seção 2.4.

A solução dessa inconsistência foi desenvolvida por Santos, Nascimento e Lora (2006) por meio da desagregação da exergia física nas parcelas entálpica (H) e entrópica (S), as quais permitem definir insumo e produto do condensador sem resultados inconsistentes. A Fig. 11 ilustra o insumo e produto do condensador utilizando a exergia total e a desagregação nas parcelas entálpica e entrópica.

Figura 11 – Definição do insumo e produto do condensador utilizando exergia total e a desagregação nas parcelas entálpica e entrópica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar da desagregação nas parcelas entálpica e entrópica definirem insumo e produto do condensador, o mesmo não é possível para as válvulas, conforme identificado por Lourenço (2012). Uma solução para a válvula é a utilização da desagregação da exergia em térmica e mecânica com a metodologia de cálculo apresentada por Tsatsaronis (1993) e Morosuk e Tsatsaronis (2008). Contudo, as metodologias apresentam arbitrariedades e a desagregação só define insumo e produto para válvulas de ciclos de refrigeração e depende do estado do fluido na entrada e saída da válvula (FARIA, 2014).

Dessa forma, conforme apresentado na seção 2.4, Lourenço (2012) apresentou o Modelo UFS, o qual permite definir insumo e produto para as válvulas de gases reais e condensadores. Posteriormente, Lourenço (2016) desenvolveu o Modelo UFS+, que permite definir o propósito produtivo de válvulas operando com fluidos com comportamento de gás ideal. Esta última desagregação permitiu definir produto e insumo de condensadores e válvulas operadas com qualquer fluido.

Em suma, o desenvolvimento da ideia de Frangopoulos possibilitou o surgimento da desagregação da exergia em suas parcelas, permitindo a definição do insumo e do produto (LOZANO; VALERO, 1993b), e o isolamento ou decomposição dos equipamentos dissipativos.

A partição do custo dos equipamentos dissipativos utilizando o diagrama físico e a exergia total permanece um assunto em aberto. Torres e Valero (2000) consideraram a exergia dissipada como produto principal do condensador, a qual deve ser alocada proporcionalmente para os equipamentos que aumentam a entropia. Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) propuseram algumas formas de partição do custo dos equipamentos dissipativos, onde o custo pode ser particionado para o(s) componente(s) servido(s) por ele, ou repartida para o(s) componente(s) produtivo(s) responsável(is) pelo uso do componente dissipativo, ou ainda, o custo rateado pelo(s) produto(s) final(is) do sistema. Torres et al. (2008) propuseram a definição de um coeficiente de distribuição, o qual torna proporcional a exergia dos fluxos processados nas unidades dissipativas conforme a estrutura produtiva.

2.6 Resíduos

Em um processo produtivo pode haver fluxos indesejados de matéria ou energia, chamados resíduos, causados principalmente em função de limitações técnicas impostas pelos equipamentos que compõe um sistema de energia. Os resíduos podem ser usados parcialmente em outros

processos, descartados no ambiente ou para eliminá-los é necessário consumir mais recursos (TORRES; VALERO, 2000; TORRES et al., 2008).

O processo de formação de custo dos resíduos torna-se essencial quando se trata de eliminá-los através de algum sistema de controle de poluição, sendo necessário alocar racionalmente seus custos aos produtos do sistema. Dessa forma, a alocação de custos de resíduos mostra ser um problema complexo, pois, depende da natureza desses fluxos e da sua formação, haja vista que o modelo físico não é suficiente para identificar o processo de formação dos resíduos. (TORRES; VALERO, 2000; TORRES et al., 2008).

Na década de 1990, diferentes metodologias termoeconômicas (FRANGOPOULOS, 1994; LOZANO; VALERO, 1993b; TSATSARONIS; PISA, 1994; SPAKOVSKY, 1994), não consideravam explicitamente a destinação dos resíduos em seu processo de formação de custos. De acordo com Santos (2009), até 1994 as metodologias baseadas em diagrama físico não haviam definido a forma de alocação dos custos dos resíduos. Tsatsaronis e Pisa (1994) calcularam os custos dos gases de exaustão e distribuíram proporcionalmente a potência líquida e calor útil. Valero et al. (1994a) propuseram atribuir o custo do resíduo na caldeira de recuperação e posteriormente na câmara de combustão (TORRES; VALERO, 2000; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006). Para as metodologias que utilizam os diagramas produtivos (FRANGOPOULOS, 1994; SPAKOVSKY, 1994), a alocação do custo dos resíduos é realizada implícita e proporcionalmente à exergia térmica consumida na unidade produtiva que produziu o produto final.

Alguns trabalhos (FRANGOPOULOS, 1994; TORRES et al., 2008; SEYYEDI; AJAM; FARAHAT, 2010; DENISE et al., 2020) concordam que o custo da exergia dos resíduos e os recursos empregados em seu tratamento devem ser distribuídos entre as unidades produtivas, portanto, aos produtos finais, proporcionalmente à sua responsabilidade por tal magnitude (LOZANO; VALERO, 1993b). Esta proporcionalidade também é conhecida como razão de distribuição de custo de resíduo e pode ser definida por diferentes métodos, ou seja, não há um critério geral para defini-la.

Segundo Torres et al. (2008), as metodologias termoeconômicas não consideram a análise aprofundada da alocação de custos, sendo necessário desenvolver novas técnicas ou aprimorar as existentes para incluir tanto a alocação de custos dos resíduos quanto a análise de seu processo de formação. Desde 2000, diversas metodologias para tratamento de resíduos e isolamento dissipativo de equipamentos foram apresentadas. Entre as principais propostas estão:

- Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) propuseram que o custo operacional de um equipamento dissipativo seja cobrado diretamente do componente a que serve, enquanto o resíduo deve ser cobrado da câmara de combustão.
- Torres et al. (2008) propuseram duas metodologias de alocação de custos. A primeira opção é o custo do resíduo alocado proporcionalmente à exergia dos fluxos processados

nas unidades dissipativas. A segunda opção usa a geração de entropia ao longo do processo para alocá-la proporcionalmente.

- No Modelo H&S (SANTOS; NASCIMENTO; LORA, 2006; SANTOS et al., 2009a), o custo dos resíduos é alocado para todas as unidades e/ou componentes, primeiro e diretamente por meio dos fluxos da parcela entrópica e, posteriormente, usando fluxos da parcela entálpica.
- Seyyedi, Ajam e Farahat (2010) apresentou um novo critério de razão de distribuição de custo baseado na entropia distribuída nos componentes.
- A metodologia de Agudelo, Valero e Torres (2012) foi uma melhoria da razão de distribuição de custos propostas por Torres et al. (2008).
- A razão de distribuição de custos baseada em irreversibilidades foi proposta por Denise et al. (2020), sendo este método uma extensão da segunda opção apresentada por Torres et al. (2008).
- Uma metodologia de realocação de custo de resíduos por meio do diagrama abrangente foi apresentada em Faria et al. (2020) e Faria et al. (2021). Esse método alocou o custo do resíduo na malha interna dos fluxos físicos, ao invés de diretamente na unidade produtiva.

Dentre estas metodologias, o Modelo H&S foi a única elaborada pensando na alocação do custo do resíduo e o isolamento de equipamentos dissipativos, ou seja, o tratamento de resíduo é uma característica inerente ao Modelo H&S que alocada de forma automática e sistemática por meio da definição de sua estrutura produtiva. No entanto, esse modelo foi originalmente usado no diagrama produtivo. Portanto, ficou exposto à arbitrariedade devido às unidades fictícias (junções e bifurcações).

No Modelo de H&S, existe um dispositivo denominado ambiente (AMB), que tem a função de dissipar os resíduos existentes, fazendo assim a alocação dos custos dos resíduos de forma explícita. Do ambiente, a parcela entrópica é distribuída para aquelas unidades que aumentam a entropia do fluido de trabalho. A exergia química, também presente no modelo, é dissipada no meio ambiente, onde os gases de exaustão chegam e saí o ar puro.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo tem por objetivo apresentar a metodologia de Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) para o diagrama abrangente. Primeiramente será abordado a origem deste diagrama, bem como os trabalhos que foram utilizados para a sua elaboração. Posteriormente, também serão abordados aspectos referentes à representação dos subsistemas, identificação dos fluxos, construção da estrutura produtiva, equações auxiliares e por fim o balanço de custo aplicado ao diagrama abrangente.

3.1 Diagrama Abrangente

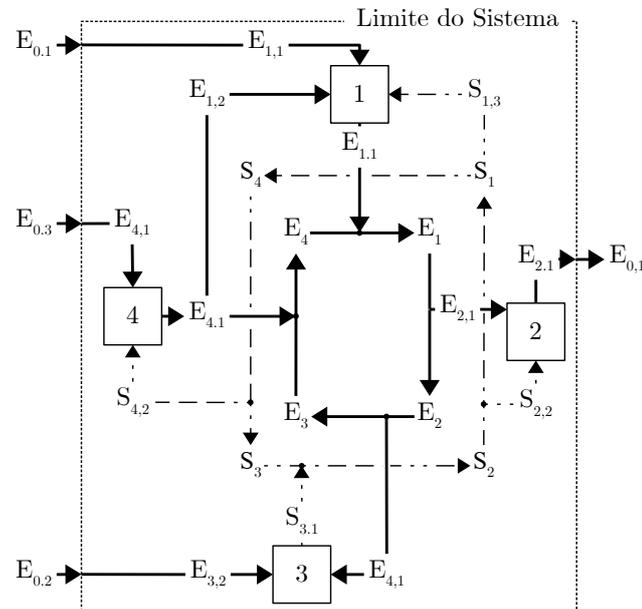
A elaboração do diagrama abrangente foi baseada nos trabalhos de Frangopoulos (1983), Lazzaretto e Macor (1995) e Lazzaretto e Tsatsaronis (2006). Reunindo as informações contidas nestes trabalhos foi possível a elaboração de um diagrama que mostra os fluxos físicos e produtivos em um único diagrama. Como consequência, os subsistemas do diagrama abrangente atuam como componente e unidade produtiva, permitindo o cálculo dos custos físicos e produtivos simultaneamente, além de eliminar os equipamentos fictícios existentes no diagrama produtivo (AVELLAR et al., 2018a; AVELLAR et al., 2018b).

Em sua tese, Frangopoulos (1983) identificou as funções de cada unidade produtiva e suas distribuições ao longo do sistema, resultando em uma nova abordagem de construção de diagramas, o diagrama produtivo. No desenvolvimento desse, o autor elaborou um diagrama termoeconômico intermediário, o qual não apresentava as junções e bifurcações presentes no diagrama produtivo e utilizava de fluxos produtivos e *loops* de fluxos físicos (Fig. 12).

A Fig. 12 é composta pelos equipamentos: caldeira (1), turbina à vapor (2), condensador (3) e bomba (4). Sendo utilizado a exergia total (E) em conjunto com a neguentropia (S) para definir insumo e produto. No entanto, já foi comprovada que essa combinação de exergia obtêm valores incoerentes de custos, isto é, insumos menores que produtos. (HERNÁNDEZ, 2005; SANTOS, 2009; SANTOS et al., 2009a; SANTOS et al., 2009b; AGUDELO; VALERO; TORRES, 2012).

Ainda na mesma figura, pode-se observar a existência de um *loop* interno formado pela exergia total (E_1, E_2, E_3 e E_4) e outro mais externo, da neguentropia (S_1, S_2, S_3 e S_4), sendo todos fluxos físicos. Já os fluxos produtivos são identificados pelas siglas $E_{k,j}$ ou $S_{k,j}$ e $E_{k,j}$ ou $S_{k,j}$. Onde o subscrito k indica o equipamento, j o número do fluxo, a vírgula é indicativo de insumo daquele equipamento e o ponto é produto. Assim, Frangopoulos (1983) estabeleceu que para obter o fluxo produtivo por meio dos fluxos mássicos é necessário realizar a diferença entre os fluxos físicos de um equipamento, por exemplo, $E_2 - E_1 = E_{2,1}$ e $S_2 - S_3 = S_{3,1}$.

Figura 12 – Diagrama termoeconômico intermediário do ciclo Rankine utilizando o Modelo E&S.



Fonte: Adaptada de Frangopoulos (1987).

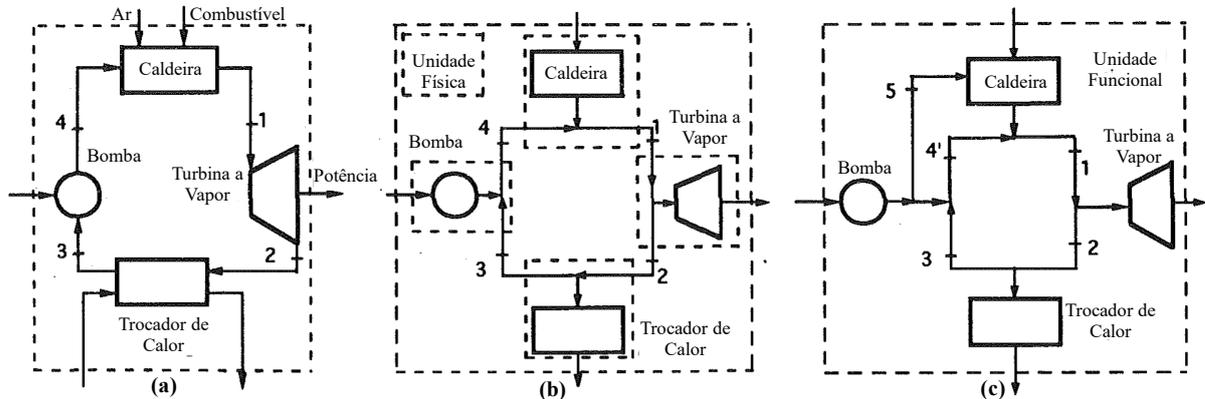
Apesar da elaboração do diagrama termoeconômico intermediário pelo autor, esse não prosseguiu no desenvolvimento, dando continuidade aos estudos para alocação de custo com o diagrama produtivo.

Lazzaretto e Macor (1995) utilizam da formulação algébrica da análise termoeconômica estrutural elaborada por Valero, Torres e Serra (1992) para demonstrar o cálculo do custo médio e do custo marginal a partir da mesma estrutura produtiva. Esta estrutura utiliza de fluxos físicos e produtivos para representá-la, sendo semelhante com o diagrama termoeconômico intermediário de Frangopoulos (1987).

A partir da estrutura física (Fig. 13a), elabora-se uma estrutura produtiva estabelecendo as interconexões produtivas entre os componentes. Tanto o produto quanto insumo podem corresponder a fluxos de exergia ou ser iguais às suas somas ou diferenças. Dessa forma, a representação do insumo e produto de um componente requer a introdução dos equipamentos fictícios (junção e bifurcação) na estrutura física. Em virtude da inserção desses equipamentos é gerado uma nova estrutura produtiva, denominada pelos autores como estrutura produtiva física, conforme Fig. 13b.

De acordo com Lazzaretto e Macor (1995) para o componente que apresenta apenas um produto, aquele é dividido em uma unidade fictícia e unidade de componente. Dessa forma, ao componente é adicionado a junção ou bifurcação com a função de interligar o produto do componente com o resto do sistema. Assim, as unidades fictícias são chamadas de junção primária e bifurcação primária (ver Fig. 13b). Também é possível adicionar mais unidades fictícias, sendo o componente dividido em mais unidades de componentes para obter informações adicionais do processo produtivo.

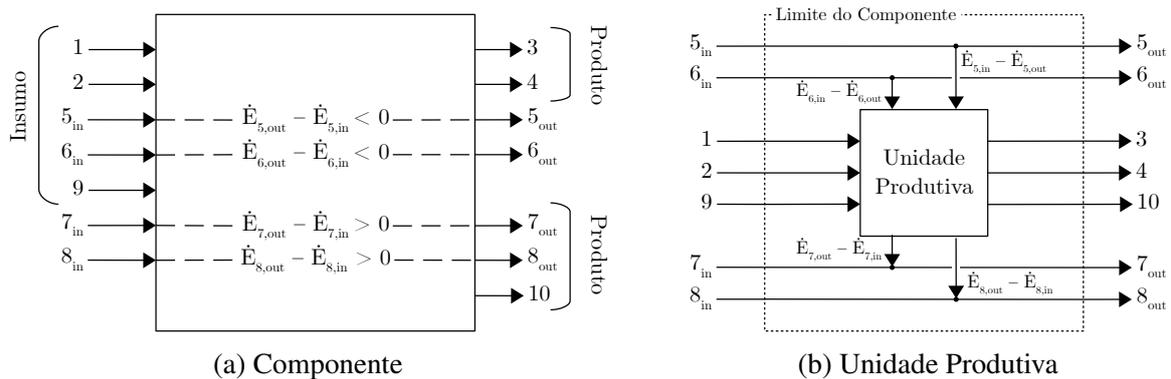
Figura 13 – (a) Estrutura física de uma planta de potência a vapor de cogeração; (b) Diagrama produtivo físico; (c) Diagrama produtivo.



Fonte: Adaptada de Lazzaretto e Macor (1995).

E por fim, Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) demonstraram o comportamento dos fluxos físicos em um componente (Fig. 14a) e os fluxos físicos e produtivos em um unidade produtiva (Fig. 14b).

Figura 14 – Conceito de componente e unidade produtiva.



Fonte: Adaptada de Lazzaretto e Tsatsaronis (2006).

Os fluxos de energia 1, 2, 3, 4, 9 e 10, da Fig. 14, apresentam o mesmo comportamento no componente como na unidade produtiva. Diferentemente dos fluxos mássicos 5, 6, 7 e 8, que sofrem uma variação positiva ou negativa, conforme mostrado na Fig. 14a. Essas variações são mais detalhadas ao observar dentro do componente (Fig. 14b), onde é possível compreender seu comportamento e visualizar a unidade produtiva. Por exemplo, o fluxo de exergia $E_{5,in}$ entra no componente e segue até o nó, onde deixa parte da exergia para a unidade produtiva ($\Delta E = E_{5,in} - E_{5,out}$) e sai como $E_{5,out}$ do componente. Esta variação de exergia (ΔE) nada mais é que o fluxo produtivo ($E_{5,in} : 5,out = E_{i:j}$), conforme a Eq. (5).

Além de demonstrar o comportamento dos fluxos, Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) elaboraram uma metodologia sistemática e generalizada para calcular os custos de um sistema térmico, porém aplicaram somente nos fluxos físicos. Visto que a origem do diagrama abrangente foi apresentada, segue-se com a exposição da metodologia para a elaboração do diagrama, visando estabelecer as relações existentes entre os fluxos físicos e produtivos, definir insumo e produto

dos subsistemas, estabelecer a equação de balanço de custo, bem como definir as regras para definição das equações auxiliares.

3.2 Representação do Subsistema

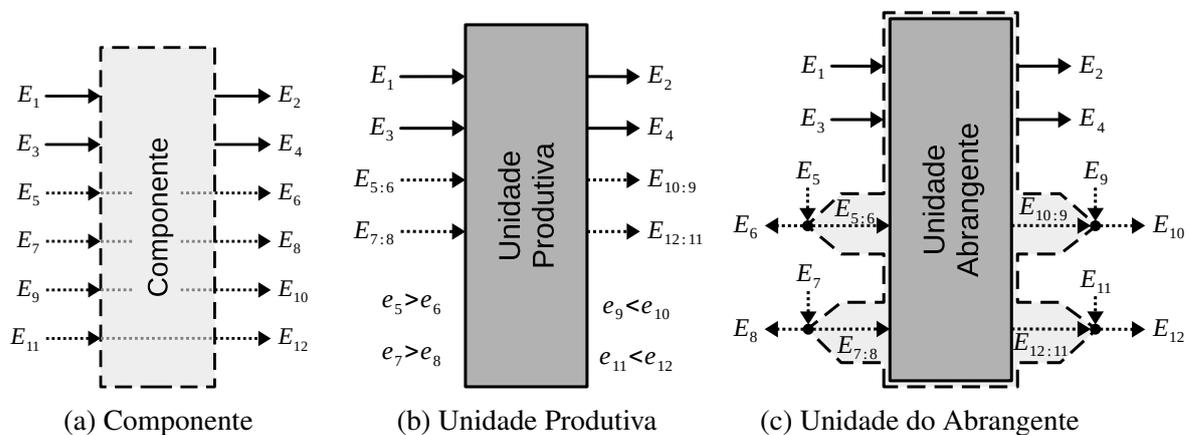
A partir da unidade do componente desenvolvida por Lazzaretto e Macor (1995) foi realizada duas alterações com o propósito de mostrar claramente e graficamente o componente com fluxos físicos e a unidade produtiva com fluxos produtivos.

Primeiramente foi realizada a substituição dos equipamentos fictícios por nós e posteriormente a fixação desses na fronteira do componente e não dentro até o limite da fronteira, conforme definido por Lazzaretto e Tsatsaronis (2006). Essas alterações clarificam as fronteiras, por consequência melhora a definição e visualização dos subsistemas como componentes e unidades produtivas, bem como a representação da estrutura produtiva, além da identificação dos fluxos físicos do diagrama físico e os fluxos produtivos do diagrama produtivo. A unidade do componente é chamada de unidade do abrangente, que passa a atuar como componente e unidade produtiva concomitantemente.

Em qualquer sistema de energia, os componentes podem ser classificados como equipamentos produtivos, com a finalidade de fornecer recursos para os outros equipamentos ou geram o produto final do sistema. Enquanto o propósito dos equipamentos dissipativos é eliminar total ou parcialmente os fluxos *indesejáveis*. Ao mesmo tempo, é um equipamento no qual a exergia é destruída sem ganho termodinâmico útil (TORRES et al., 2008; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

A Fig. 15 representa um equipamento produtivo genérico nas três representações de subsistema: componente, unidade produtiva e unidade do abrangente.

Figura 15 – Representação dos fluxos materiais e de energia em um componente, unidade produtiva e unidade do abrangente para equipamento produtivo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 15 ilustra um equipamento produtivo genérico composto por fluxos de energia (1 a

4) e materiais (5 a 12), os quais foram representados no componente (linha tracejada) (Fig. 15a), na unidade produtiva (linha contínua) (Fig. 15b) e na unidade do abrangente (Fig. 15c).

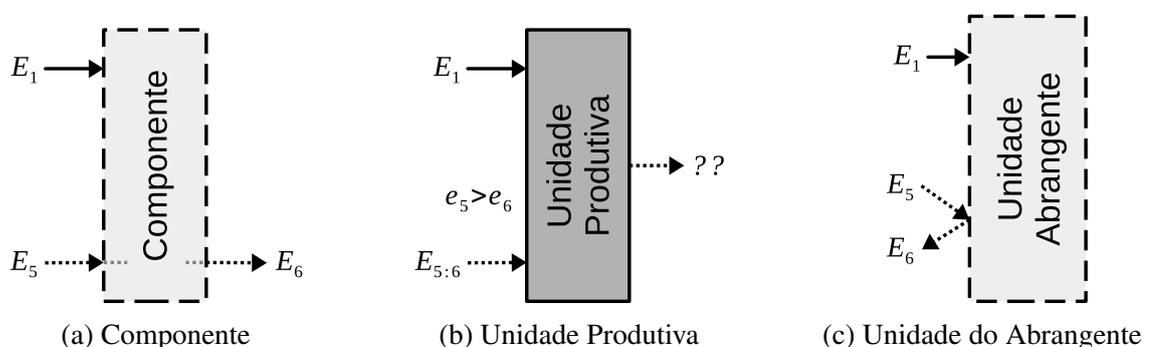
Como demonstrado por Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), os fluxos de energia (E_1 a E_4) apresentam o mesmo comportamento como fluxos físicos e fluxos produtivos. Esses fluxos de energia podem ser combustível, água de reposição, injeção de vapor, potências, gás combustível, dentre outros. Dessa maneira, na unidade do abrangente não é necessária a representação dentro do componente e quando possível, as fronteiras do componente e da unidade produtiva podem ser próximos, indicando a presença de ambos.

O mesmo não ocorre com os fluxos materiais (E_5 a E_{12}), uma vez que os fluxos produtivos são constituídos pelos fluxos físicos. Desse modo, os fluxos produtivos ($E_{5:6}$, $E_{7:8}$, $E_{10:9}$, $E_{12:11}$) devem conectar a fronteira da unidade produtiva ao nó na fronteira do componente, ou seja, os fluxos produtivos estão contidos dentro do componente. Por sua vez, os fluxos físicos conectam os subsistemas por meio dos nós conforme descrito no fluxograma do sistema.

O nó representa o ponto de conexão dos fluxos físicos e produtivos, o qual existirá quando for possível definir um fluxo produtivo a partir dos fluxos materiais. Além disso, o nó não é uma junção ou bifurcação, ou seja, não é um equipamento fictício ou arbitrário, mas sim, demonstra a interface entre fluxos físicos e produtivos na fronteira do componente. Sua representação é um círculo preenchido, conforme Fig. 15c.

A Fig. 16 é a representação de um equipamento dissipativo genérico no componente, unidade produtiva e unidade do abrangente. Uma vez que, a depender da desagregação da exergia adotada, esses equipamentos não definem insumo e produto, nesse caso, a unidade produtiva deve se unir a outro equipamento produtivo para realizar a análise termoeconômica. Por outro lado, a unidade do abrangente permanece isolada por meio dos fluxos físicos. No entanto, não apresenta a fronteira da unidade produtiva.

Figura 16 – Representação dos fluxos materiais e de energia em um componente, unidade produtiva e unidade do abrangente para equipamento dissipativo.



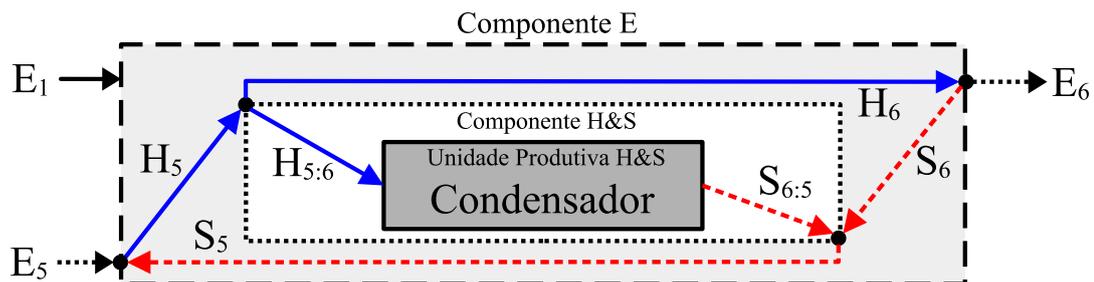
Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Lazzaretto e Macor (1995) e Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) é possível subdividir mais o componente, bastando incluir junções e bifurcações secundárias. A partir dessa premissa é possível definir insumo e produto de um equipamento dissipativo por meio da desagregação

localizada.

A desagregação localizada tem por objetivo definir insumo e produto sem o aumento da complexidade devido à desagregação da exergia física. O método cria um componente e uma unidade produtiva baseada na desagregação da exergia para definir insumo e produto do equipamento em estudo. Por exemplo, considerando a Fig. 16c como um condensador. Ao aplicar a desagregação localizada utilizando as parcelas entálpica e entrópica, obtém-se a Fig. 17.

Figura 17 – Desagregação localizada no condensador com exergia total e a desagregação H&S.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura mostra o componente E (linha tracejada) com os fluxos materiais (E_5 e E_6) e de energia (E_1). Contudo, dentro desse é criado o componente H&S (linha pontilhada) e unidade produtiva H&S (linha contínua). Sabe-se que a exergia total (E) pode ser desagregada nas parcelas entálpica (H) e entrópica (S), $E_i = H_i - S_i$. Desta forma, os fluxos físicos dessas parcelas conectam o nó presente no componente E até o nó das respectivas parcelas presentes na fronteira do componente H&S. Assim, os fluxos físicos H_5 e H_6 formam o fluxo produtivo $H_{5:6}$, insumo do condensador, que conecta o nó da fronteira do componente H&S a unidade produtiva H&S. O mesmo ocorre com a parcela entrópica, os fluxos físicos S_5 e S_6 formam o fluxo produtivo $S_{6:5}$, produto do condensador, que conecta o nó da fronteira do componente H&S a unidade produtiva H&S.

Portanto, obtêm-se insumo e produto de um equipamento dissipativo com fluxos de exergia total por meio da desagregação localizada sem a necessidade de aumentar a complexidade, ou seja, realizar a desagregação da exergia em todo o sistema, mas somente no componente desejado.

3.3 Definição de Insumo e Produto

O próximo passo para da metodologia é a definição da estrutura produtiva, isto é, definir insumo e produto dos subsistemas. Contudo, antes há a necessidade de pontuar sobre os fluxos materiais. A análise somente do fluxo físico (E_i) não é considerado insumo ou produto de um equipamento. Para isso, é preciso verificar a variação específica da exergia ($e_{out} - e_{in}$), ou de suas desagregações, para somente então definir insumo ou produto, que no final acarreta também

na definição dos fluxos produtivos, uma vez que esses são variações dos fluxos físicos, conforme já definido pela Eq. (5).

Uma vez esclarecido a questão dos fluxos materiais, agora é possível definir a estrutura produtiva. Dessa forma, os fluxos podem ser classificados como produtos ou insumos. De acordo com a metodologia de Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), no caso dos fluxos materiais quando a variação da exergia específica ou de suas parcelas for positiva, isto é, a exergia específica de saída for maior que a entrada, é considerado produto e caso contrário é insumo. Além disso, o fluxo produtivo originado dessa variação também assume a mesma classificação. A exceção é em relação a parcela entrópica devido ao sinal negativo que essa apresenta, conforme a Fig. 9. Assim, o inverso ao estabelecido é adotado, isto é, se a variação da entropia específica for negativa então essa é classificada como produto, e insumo quando a variação da entropia específica for positiva.

Para ilustrar as regras de classificação para os fluxos materiais, a Fig. 15 contém os fluxos E_5 a E_{12} , sendo a variação de exergia específica definida como: $e_5 > e_6$, $e_7 > e_8$, $e_9 < e_{10}$ e $e_{11} < e_{12}$. Dessa forma, pode-se definir que $(E_5 - E_6)$ ou $E_{5:6}$ e $(E_7 - E_8)$ ou $E_{7:8}$ são classificados como insumos, enquanto $(E_{10} - E_9)$ ou $E_{10:9}$ e $(E_{12} - E_{11})$ ou $E_{12:11}$ são produtos.

Os fluxos de energia são considerados produtos quando fornecidos pelo subsistema (potência, gás da gaseificação) e insumo ao serem consumidos pelo mesmo (combustível, água de reposição). Para exemplificar, na Fig. 15 os fluxos E_2 e E_4 são classificados como produtos, enquanto os fluxos E_1 e E_3 são insumos.

3.4 Balanço de Custo e Equações Auxiliares

O diagrama tem por objetivo descrever graficamente o processo de formação de custo de um sistema térmico, já as equações de balanço de custo descrevem matematicamente o processo de formação de custos (SANTOS, 2009). Segundo Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) as equações de balanço de custo podem ser obtidas de duas formas:

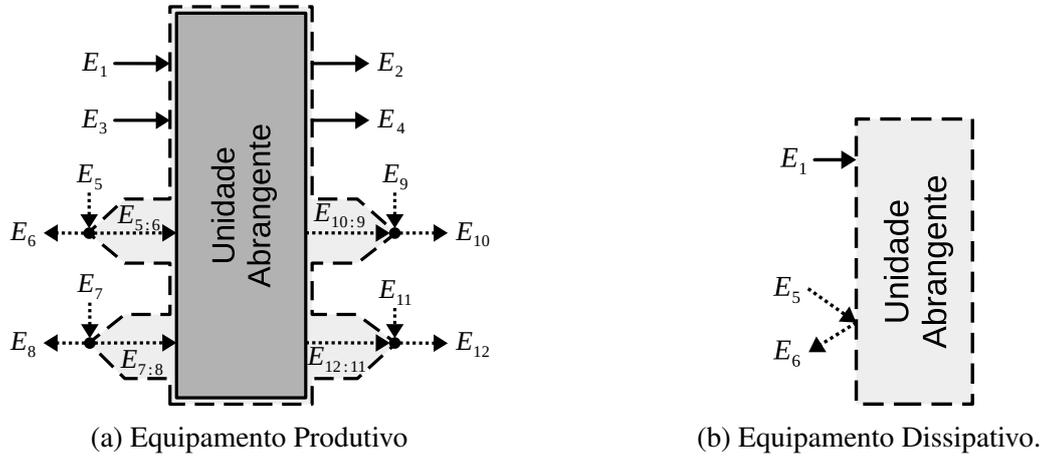
- O balanço em termos de insumo e produto pode ser escrito considerando o fluxo de exergia cruzando o limite da unidade produtiva (linha contínua).
- O balanço em termos de entrada e saída pode ser escrito observando os fluxos de exergia que cruzam os limites do componente (linha tracejada).

Devido às modificações realizadas, os fluxos de exergia não cruzam os limites dos componente ou unidade produtiva, mas entram e saem do nó, que se encontra no limite do componente. Em virtude dessa modificação, há necessidade de incluir o balanço de custo nos nós. Dessa maneira, o balanço de custo pode ser aplicada no componente e nó ou ainda unidade produtiva e nó. Ao realizar o balanço de custo no diagrama abrangente é utilizada a Eq. (3) da seção 2.2.

$$\sum (\alpha_{out} Y_{out}) - \sum (\alpha_{in} Y_{in}) = Z \quad (3)$$

Onde Y é a magnitude termodinâmica, α o custo unitário, Z o custo externo por hora e os subscritos *in* e *out*, entrada e saída, respectivamente. A Fig. 18 apresenta um equipamento produtivo e dissipativo, os quais são utilizados para exemplificar a aplicação do balanço de custo.

Figura 18 – Representação das unidades genéricas de equipamento produtivo e dissipativo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 18a é um equipamento produtivo, o qual define insumo e produto, bem como permite obter o balanço de custo do componente e da unidade produtiva, além dos nós existentes. Analogamente, a Fig. 18b é um equipamento dissipativo, o qual não define insumo ou produto, por consequência, o balanço de custo é aplicado somente no componente.

Para aplicar o balanço de custo nos subsistemas da Fig. 18, adota-se a exergia total (E) para a magnitude termodinâmica (Y), o custo exergético unitário (k) para o custo unitário (α) e o custo externo por hora (Z) é zero.

Por uma questão de demonstração das equações, mostra-se a aplicação tanto no componente quanto na unidade produtiva, no entanto utiliza-se apenas uma, conforme definido anteriormente. Como resultado, as Eqs. (13) e (14) representam a aplicação do balanço de custo no componente e na unidade produtiva, respectivamente. Enquanto as Eqs. (15) a (18) são referentes as aplicações da equação nos nós do equipamento produtivo. É importante salientar que nos nós há uma inversão de sinal para o fluxo produtivo, uma vez que o referencial foi alterado, isto é, a análise de entrada e saída do fluxo passa a ser o nó.

• **Componente:**

$$\begin{aligned}
 & [+k_2^E E_2 + k_4^E E_4 + k_6^E E_6 + k_8^E E_8 + k_{10}^E E_{10} + k_{12}^E E_{12}] + \\
 & [-k_1^E E_1 - k_3^E E_3 - k_5^E E_5 - k_7^E E_7 - k_9^E E_9 - k_{11}^E E_{11}] = 0
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

• **Unidade Produtiva:**

$$\begin{aligned}
 & [+k_2^E E_2 + k_4^E E_4 + k_{10:9}^E E_{10:9} + k_{12:11}^E E_{12:11}] + \\
 & [-k_1^E E_1 - k_3^E E_3 - k_{5:6}^E E_{5:6} - k_{7:8}^E E_{7:8}] = 0
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

- **Nós:**

$$+k_6^E E_6 - k_5^E E_5 + k_{5:6}^E E_{5:6} = 0 \quad (15)$$

$$+k_8^E E_8 - k_7^E E_7 + k_{7:8}^E E_{7:8} = 0 \quad (16)$$

$$+k_{10}^E E_{10} - k_9^E E_9 - k_{10:9}^E E_{10:9} = 0 \quad (17)$$

$$+k_{12}^E E_{12} - k_{11}^E E_{11} - k_{12:11}^E E_{12:11} = 0 \quad (18)$$

Analogamente para o equipamento dissipativo, a Eq. (19) representa o balanço de custo aplicado na fronteira do componente, isto porque, esse equipamento não apresenta a unidade produtiva por não define a função do equipamento pela exergia total.

$$+k_6^E E_6 - k_5^E E_5 - k_1^E E_1 = 0 \quad (19)$$

É sabido que o número de equação de balanço de custo não é suficiente para o número de incógnitas existentes no sistema (VALERO; LOZANO; MUNOZ, 1986; LOZANO; VALERO, 1993a), logo é necessário estabelecer regras para obter as equações restantes, chamadas de equações auxiliares, e assim igualar o número de equações com de incógnitas. Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) estabelecem dois princípios para obtenção das equações auxiliares. São eles:

- **Princípio do Insumo** afirma que os custos específicos devem ser iguais quando um fluxo que entra e sai de um componente deixa parte de sua exergia.
- **Princípio do Produto** enuncia que cada unidade de exergia é fornecida a qualquer fluxo associado ao produto com mesmo custo médio, isto é, todos os produtos apresentam o mesmo custo específico.

Um ponto a se destacar no princípio do produto no diagrama abrangente é que esse aplica-se somente em fluxos produtivos. Outras duas regras para as equações auxiliares foram obtidas de Valero, Torres e Serra (1992). São elas:

- O fluxo externo com recursos para adicionar ao sistema, na ausência de informações, terá seu custo exergético unitário igual a um.
- Fluxos físicos advindos da natureza (ar, água de rios ou mares, dentre outros), apresentaram custo exergético igual ao valor da exergia. No caso de análise de custo monetário, o custo monetário unitário será zero, uma vez que não apresentam custo de aquisição e não sofreram processo de destruição de exergia.

Aplicando as regras de obtenção das equações auxiliares no equipamento produtivo da Fig. 18, obtêm-se as Eqs. (20) a (24). Por sua vez, o equipamento dissipativo nesse caso não é possível aplicar qualquer regra para obtenção das equações auxiliares.

• **Princípio do Produto:**

$$k_2^E - k_4^E = 0 \tag{20}$$

$$k_4^E - k_{10:9}^E = 0 \tag{21}$$

$$k_{10:9}^E - k_{12:11}^E = 0 \tag{22}$$

• **Princípio do Insumo:**

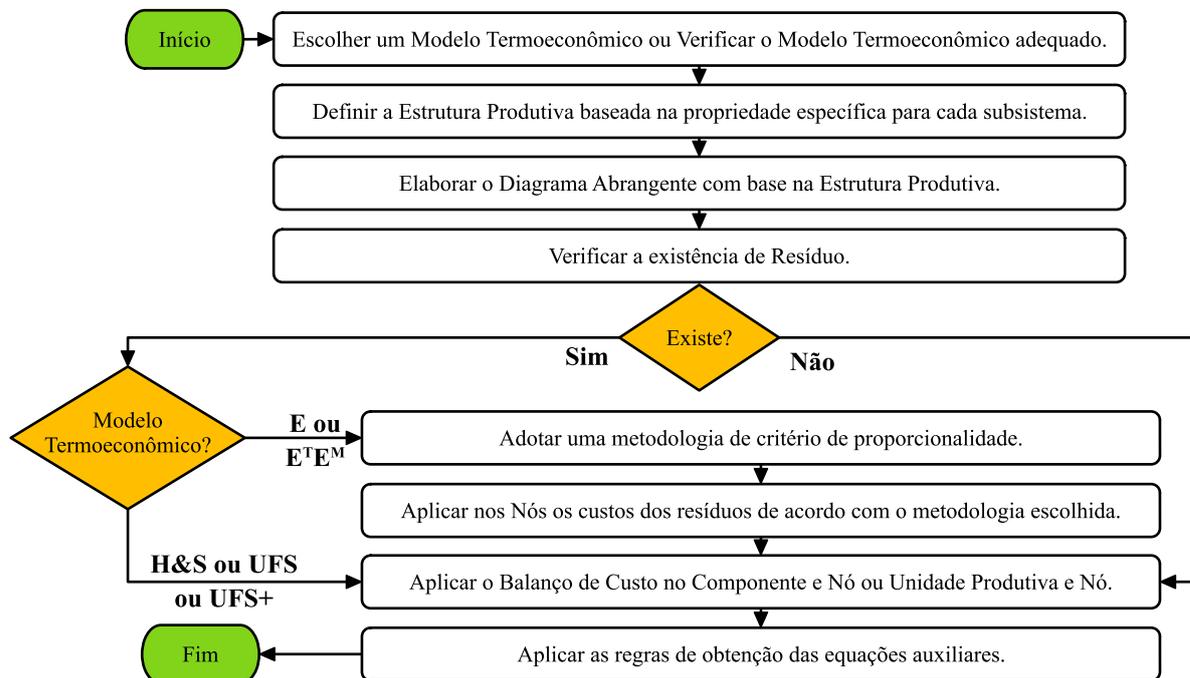
$$k_5^E - k_6^E = 0 \tag{23}$$

$$k_7^E - k_8^E = 0 \tag{24}$$

3.5 Consolidação das Etapas

Nessa seção será consolidada as etapas da metodologia para o diagrama abrangente. O fluxograma da Fig. 19 mostra as etapas necessárias para elaboração do processo de formação de custo e obtenção dos custos internos e produtos do diagrama abrangente.

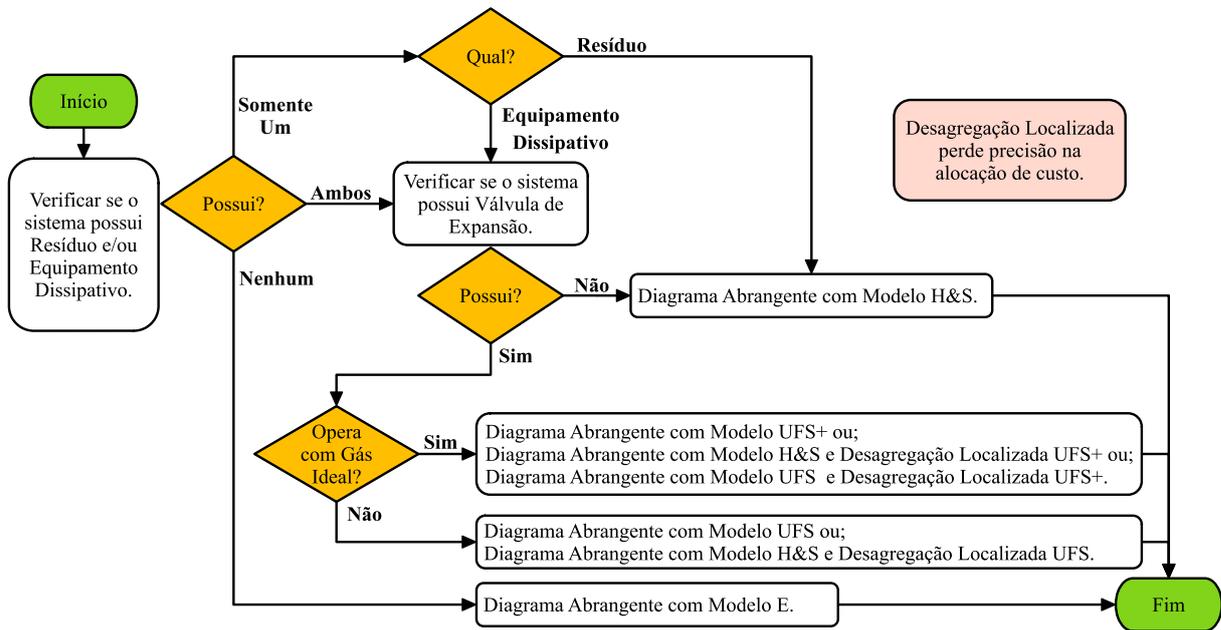
Figura 19 – Fluxograma de síntese das etapas de elaboração do diagrama abrangente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira etapa é escolher um modelo termoeconômico (E, E^{TE^M}, H&S, UFS, UFS+) ou verificar o modelo adequado para o sistema em estudo por meio da Fig. 20. Essa irá fornecer o modelo termoeconômico com complexidade adequada para os equipamentos existentes, sem arbitrariedade de interconexão entre os sistemas e com tratamento de resíduo.

Figura 20 – Fluxograma de escolha do modelo termoeconômico com menor complexidade, sem arbitrariedade de interconexão entre os subsistemas e tratamento de resíduo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez definido o modelo termoeconômico é preciso definir a estrutura produtiva. De acordo com a metodologia apresentada, para definir insumo e produto é necessário analisar a variação da magnitude/propriedade específica da saída e entrada ($y_{out} - y_{in}$). Quando esta variação for positiva, então é classificada como produto, se negativa é insumo. No caso da parcela entrópica essa relação é invertida devido ao sinal negativo presente na parcela, ou seja, positivo é insumo, e produto se negativo. A próxima etapa é elaborar o diagrama abrangente de acordo com a estrutura produtiva do passo anterior e representação dos subsistemas definida na metodologia.

Em seguida verifica-se a existência de resíduo no sistema. Caso o sistema não possua resíduo ou o modelo termoeconômico utilizado seja H&S, UFS ou UFS+, segue para a aplicação do balanço de custo no componente ou unidade produtiva e nó. Agora, se o sistema tenha resíduo e o modelo termoeconômico escolhido seja E ou E^{TEM} é necessário adotar uma metodologia de critério de proporcionalidade, que gera arbitrariedade no tratamento do resíduo. Na sequência, o custo do resíduo é distribuído de acordo com o método selecionado e alocado nos nó dos subsistemas.

Posteriormente é aplicado o balanço de custo no componente e nó ou unidade produtiva e nó. E por fim aplica-se as regras de obtenção das equações auxiliares para finalizar o sistema de equações.

4 ESTUDO DE CASO I: AS ARBITRARIEDADES DOS DIAGRAMAS CONVENCIONAIS

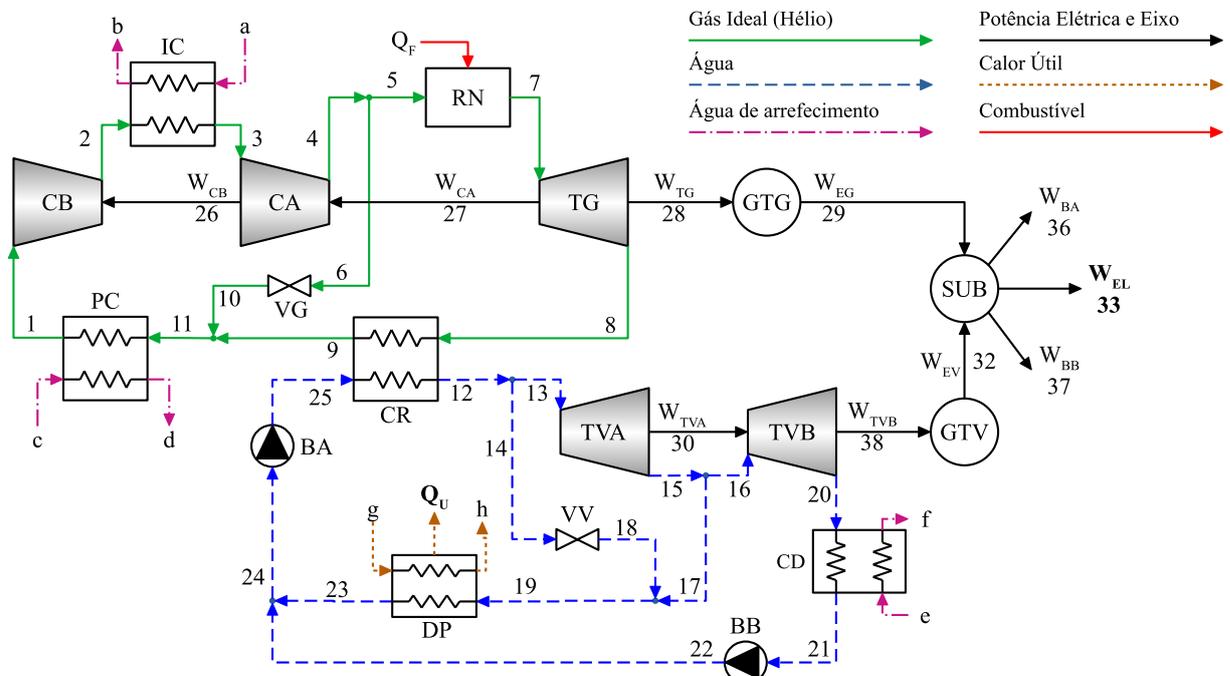
Esse capítulo visa mostrar as arbitrariedades e complexidades que envolvem a elaboração dos diagramas convencionais (físico e produtivo). Sendo assim, é mostrado o processo de formação de custo do sistema por meio da definição do insumo e produto dos subsistemas, bem como o tratamento dos equipamentos dissipativos por meio da desagregação da exergia física.

Para realizar os estudos desse capítulo foi selecionada uma planta nuclear de cogeração em ciclo combinado com turbina a gás hélio, *intercooler* e válvula de *by-pass*. Essa planta foi elaborada a partir de vários outros sistemas menores visando incorporar diversos tipos de equipamentos dissipativos (COLOMBO, 2016; COLOMBO et al., 2017). O autor realizou uma análise literal do sistema, sem estudos com valores.

4.1 Descrição da Planta

A Fig. 21 mostra a estrutura física da planta nuclear de cogeração em ciclo combinado com turbina a gás hélio, *intercooler* e válvula de *by-pass*.

Figura 21 – Estrutura física da planta nuclear.



Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

O sistema é composto pelos equipamentos: bomba de alta pressão (BA), bomba de baixa pressão (BB), compressor de alta pressão (CA), compressor de baixa pressão (CB), condensador

(CD), caldeira recuperativa (CR), disponibilidade para processo industrial (DP), gerador elétrico acoplado a turbina a gás (GTG), gerador elétrico acoplado a turbina a vapor (GTV), *intercooler* (IC), *precooler* (PC), reator nuclear (RN), subestação elétrica (SUB), turbina a gás (TG), turbina a vapor de alta pressão (TVA), turbina a vapor de baixa pressão (TVB), válvula de expansão no ciclo a gás (VG), válvula de expansão no ciclo a vapor (VV). Os parâmetros dos fluxos físicos da planta estão na Tab. 4.

Tabela 4 – Principais parâmetros dos fluxos físicos da planta nuclear.

Fluxo	\dot{m} (kg/s)	P (bar)	T (°C)	Fluxo	\dot{m} (kg/s)	P (bar)	T (°C)
1	145,00	25,600	28,00	12	104,87	19,803	347,15
2	145,00	42,394	103,64	13	73,41	19,803	347,15
3	145,00	42,266	28,00	14	31,46	19,803	347,15
4	145,00	69,993	103,64	15	73,41	2,000	122,85
5	130,50	69,993	103,64	16	36,70	2,000	122,85
6	14,50	69,993	103,64	17	36,70	2,000	122,85
7	130,50	67,193	900,00	18	31,46	2,000	329,35
8	130,50	26,071	567,15	19	68,16	2,000	217,38
9	130,50	25,862	116,09	20	36,70	0,056	35,04
10	14,50	25,862	103,64	21	36,70	0,056	34,98
11	145,00	25,862	114,85	22	36,70	1,013	34,99
				23	68,16	1,013	60,00
				24	104,87	1,013	51,25
				25	104,87	21,000	51,41

Fonte: Produzido pelo autor.

O lado gás do sistema é formado pelos fluxos de 1 a 11, sendo o gás hélio como fluido de trabalho. Os fluxos W_{CB} , W_{CA} , W_{TG} , W_{EG} são: a potência mecânica de acionamento do compressor de baixa (CB), potência mecânica de acionamento do compressor de alta (CA), potência mecânica da turbina a gás (TG) e potência elétrica do gerador da turbina a gás (GTG). A potência mecânica da turbina a gás (TG) é de 225.549 kW, sendo 113.910 kW utilizado para acionamento dos compressores de alta e baixa pressão. Desta forma, a potência líquida enviada para o gerador da turbina a gás é de 111.636 kW, resultando em uma potência elétrica de 109.966 kW.

No lado vapor, os fluxos 12 a 25 utilizam a água como fluido de trabalho. Os fluxos W_{TVA} , W_{TVB} , W_{EV} , W_{BA} e W_{BB} são, respectivamente: potência mecânica da turbina de vapor do estágio de alta pressão (TVA) e do estágio de baixa pressão (TVB), potência elétrica do gerador da turbina a vapor (GTV), potência de acionamento da bomba de alta pressão (BA) e potência de acionamento da bomba de baixa pressão (BB). As potências mecânicas geradas pelas turbinas a vapor de alta pressão (TVA) e baixa pressão (TVB) são de 30.813 kW e 16.227 kW. Desta maneira, a potência total enviada para o gerador da turbina a vapor é de 47.040 kW, que resulta em uma potência elétrica de 46.344 kW.

Ao receber as potências elétricas dos geradores, a subestação (SUB) fornece uma potência elétrica líquida (W_{EL}) de 156.050 kW, além de fornecer para bombas de alta pressão (BA) e baixa pressão (BB) potência elétrica de 249,60 kW e 4,15 kW.

A adição de calor ao sistema é realizada por meio do combustível (Q_F), que em base exergética (E_F) é da ordem de 539.639 kW. Por sua vez, o calor útil (Q_U) está disponível para o processo industrial e em base exergética (E_U), é igual à variação de exergia entre os fluxos 19 e 23 com valor de 34.303 kW.

Os fluxos (a, b, c, d, e, f), que se encontram no condensador (CD), no *precooler* (PC) e no *intercooler* (IC) são utilizados para o **resfriamento** do fluido de trabalho.

A seguir é aplicado na planta nuclear de cogeração em ciclo combinado com turbina a gás hélio, *intercooler* e válvulas de *by-pass* os modelos termoeconômicos E, H&S, UFS e UFS+. Visto que o número de fluxos é sempre maior do que o número de subsistemas, as equações auxiliares são necessárias. Desta maneira, para obter as equações auxiliares nos modelos baseados no diagrama produtivo foi adotado o critério de multiproduto (FRANGOPOULOS, 2003; SANTOS et al., 2008; SANTOS et al., 2010), enquanto nos modelos baseados no diagrama físico foi utilizado os princípios do insumo e produto (TORRES; VALERO, 2000; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

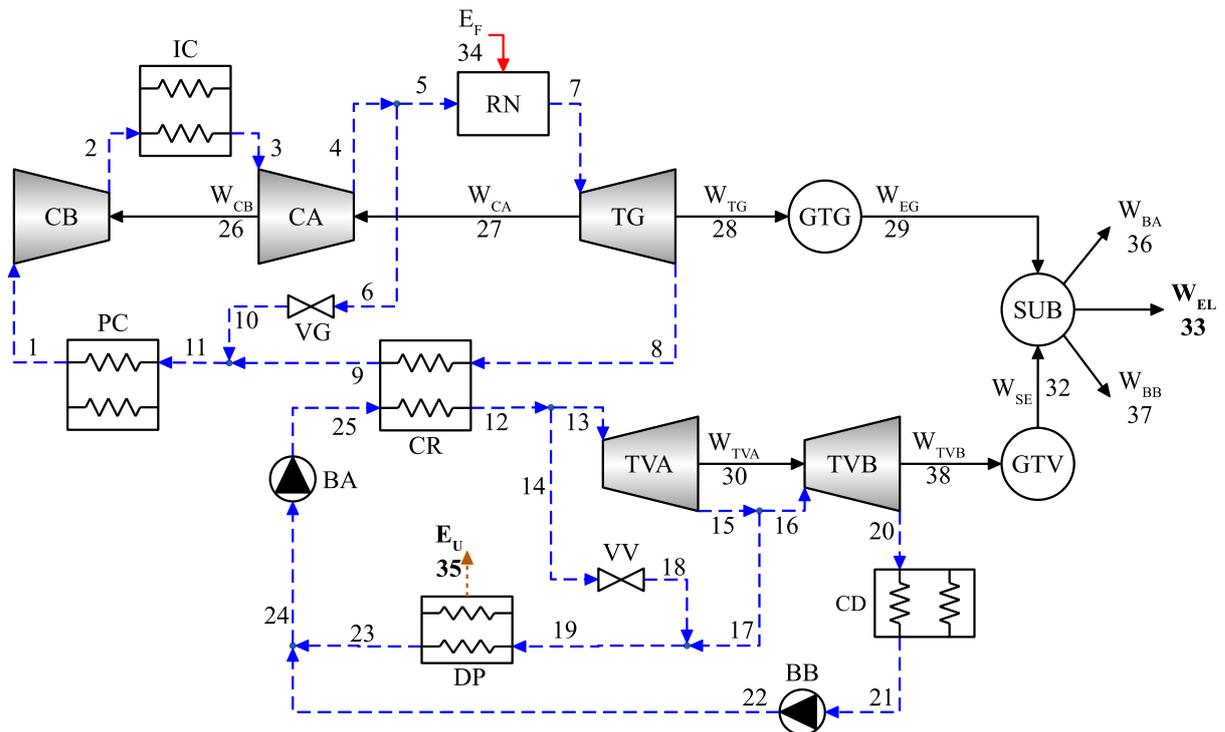
4.2 Modelo E

Este modelo termoeconômico utiliza da exergia total (E) para descrever o processo de formação de custo da planta. Para obter o sistema de equações de custo são formuladas as equações de balanço de custos em cada componente do diagrama físico e em cada unidade produtiva (real e fictícia) do diagrama produtivo.

A Fig. 22 apresenta o diagrama físico utilizando a exergia total. A elaboração desse diagrama baseia-se na estrutura física com a remoção de fluxos não necessários para a análise termoeconômica. Além disso, as metodologias que utilizam fluxos físicos necessitam definir a estrutura produtiva, que geralmente é na forma de tabelas (VALERO et al., 1994a; TSATSARONIS; PISA, 1994; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006). A estrutura produtiva da planta em estudo é apresentada na Tab. 5.

Na Tab. 5 não se encontram os equipamentos dissipativos, condensador (CD), *precooler* (PC), *intercooler* (IC), válvula de expansão no ciclo a gás (VG) e no ciclo a vapor (VV), pois não definem claramente o produto utilizando a exergia total. No entanto, no diagrama físico não há necessidade de uni-los a outros equipamentos produtivos, visto que os equipamentos podem ser tratados, ou seja, permanecerem separados por meio dos fluxos físicos.

Figura 22 – Diagrama físico da planta utilizando o Modelo E.



Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

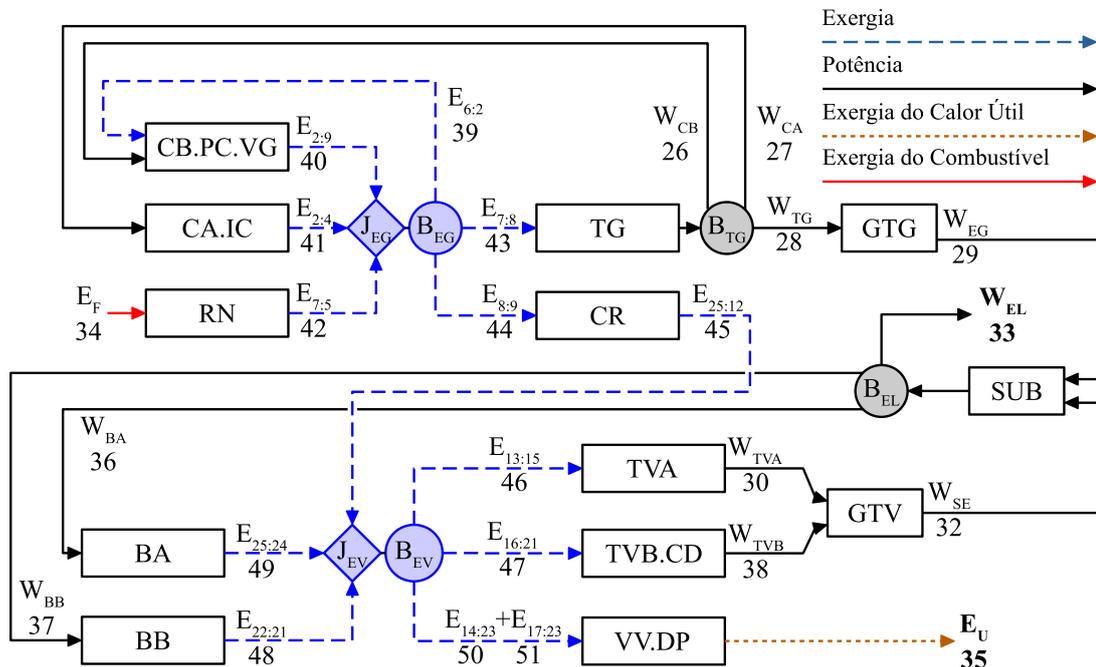
Tabela 5 – Estrutura Produtiva da planta com base na exergia total.

Unidade Produtiva	Insumo	Produto
Compressor de Baixa Pressão	W_{CB}	$E_2 - E_1$
Pressão de Alta Pressão	W_{CA}	$E_4 - E_3$
Reator Nuclear	E_F	$E_7 - E_5$
Turbina a Gás	$E_7 - E_8$	$W_{TG} + W_{CA} + W_{CB}$
Gerador da Turbina a Gás	W_{TG}	W_{EG}
Caldeira Recuperativa	$E_8 - E_9$	$E_8 - E_9$
Turbina a Vapor de Alta Pressão	$E_{13} - E_{15}$	W_{TVA}
Turbina a Vapor de Baixa Pressão	$E_{16} - E_{20}$	W_{TVB}
Gerador das Turbinas a Vapor	$W_{TVA} + W_{TVB}$	W_{EG}
Bomba de Alta Pressão	W_{BA}	$E_{25} - E_{24}$
Bomba de Baixa Pressão	W_{BB}	$E_{22} - E_{21}$
Disponibilidade para Processo Industrial	$E_{19} - E_{23}$	E_U

Fonte: Produzido pelo autor.

Por sua vez, a Fig. 23 apresenta o diagrama produtivo da planta utilizando a exergia total. Para esse diagrama, os retângulos representam as unidades produtivas que podem ser equivalente à estrutura física. O losango e círculo são unidades fictícias denominadas junção e bifurcação, respectivamente. As junções são utilizadas onde dois ou mais fluxos produtivos se juntam. As bifurcações são utilizadas onde o produto de um equipamento se subdivide em insumos de outros equipamentos.

Figura 23 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o Modelo E **com dois pares de unidades fictícias.**



Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

É possível notar na Fig. 23 que alguns equipamentos foram agrupados, isso porque, para o Modelo E, não é possível definir insumo e produto dos equipamentos dissipativos. Desse modo, uma solução é agrupá-los aos equipamentos produtivos. De acordo com Colombo (2016) há cinco hipóteses que auxiliam na agrupação entre os equipamentos dissipativos e produtivos. O autor ainda lembra que as hipóteses são subjetivas, ou seja, são arbitrárias.

- A *primeira hipótese* refere-se ao condensador, o qual alguns autores dizem ser um equipamento auxiliar da turbina. Uma vez que o condensador ajuda a turbina a condensar para as próximas etapas do processo. Assim, o condensador (CD) e a turbina de baixa pressão a vapor (TVB) formam uma unidade (TVB.CD).
- A *segunda hipótese* menciona a válvula do ciclo a vapor. O agrupamento da válvula do ciclo a vapor (VV) com disponibilidade para o processo industrial (DP) formam a unidade produtiva (VV.DP). Segundo os estudos de Faria (2014), o agrupamento da válvula de expansão do ciclo a vapor com "disponibilidade para o processo industrial" apresenta resultados razoáveis. Assim, forma-se a unidade produtiva (VV.DP).
- Na *terceira hipótese* utiliza da premissa que o *intercooler* é um equipamento auxiliar do compressor de alta pressão, visto que reduz o consumo de potência mecânica do compressor com temperatura de entrada baixa. Nesse sentido, o *intercooler* (CD) e o compressor de alta pressão (CA) formam uma unidade produtiva (CA.IC).
- A *quarta hipótese* possui o mesmo raciocínio da terceira hipótese, sendo aplicada ao *pre-cooler* (PC) e ao compressor de baixa pressão (CB). Dessa forma, a unidade é identificada como CB.PC.

- Na *quinta hipótese* a válvula de expansão do ciclo a gás (VG) destrói exergia do fluido com a finalidade de atender o *precooler* (PC). Portanto, a válvula de expansão do ciclo a gás (VG) é agregada ao *precooler* (PC), que estava agrupado com o compressor de baixa pressão (CB), assim a unidade formada é CB.PC.VG.

No diagrama as setas entrando em cada subsistema são os insumos e as saindo, os produtos. O diagrama produtivo da Fig. 23 é definido por 13 retângulos que representam as unidades produtivas e por duas junção-bifurcação ($J_{EG} - B_{EG}$ e $J_{EV} - B_{EV}$). As unidades produtivas CB.PC.VG, CA.IC e RN aumentam a exergia do fluido de trabalho, logo esses fluxos produtivos são classificados como produto e destinados à unidade fictícia ($J_{EG} - B_{EG}$) que distribui para as unidades que consomem exergia do fluido de trabalho (TG, CR e CB.PC.VG).

O mesmo ocorre no ciclo a vapor da planta. As unidades CR, BA e BB aumentam a exergia do fluido de trabalho, logo esses são produtos destinados para a unidade fictícia ($J_{EV} - B_{EV}$), enquanto as unidades TVA, TVB.CD e CC.DP são consumidoras de exergia distribuída pela mesma unidade fictícia.

A exergia do combustível é representada por E_F e os produtos finais, potência elétrica e exergia do calor útil, são W_{EL} e E_U , respectivamente. Após a definição das unidades produtivas é então elaborado as equações de balanço de custo em cada subsistema. Essas são apresentadas na Tab. 6.

Tabela 6 – Equações de balanço de custo para o diagrama produtivo da Fig. 23

Unidade Produtiva	Equação de Balanço de Custo
CB.PC.VG	$k_{2:9}^E E_{2:9} - k_{6:2}^E E_{6:2} - k_{CB} W_{CB} = 0$
CA.IC	$k_{2:4}^E E_{2:4} - k_{CA} W_{CA} = 0$
RN	$k_{7:5}^E E_{7:5} - k_F E_F = 0$
TG	$k_{TG} W_{TG} + k_{CA} W_{CA} + k_{CB} W_{CB} - k_{7:8}^E E_{7:8} = 0$
GTG	$k_{EG} W_{EG} - k_{TG} W_{TG} = 0$
CR	$k_{25:12}^E E_{25:12} - k_{8:9}^E E_{8:9} = 0$
VV.DP	$k_U E_U - k_{14:23}^E E_{14:23} - k_{17:23}^E E_{17:23} = 0$
TVA	$k_{TVA} W_{TVA} - k_{13:15}^E E_{13:15} = 0$
TVB.CD	$k_{TVB} W_{TVB} - k_{16:21}^E E_{16:21} = 0$
BA	$k_{25:24}^E E_{25:24} - k_{BA} W_{BA} = 0$
BB	$k_{22:21}^E E_{22:21} - k_{BB} W_{BB} = 0$
GTV	$k_{SE} W_{SE} - k_{TVA} W_{TVA} - k_{TVB} W_{TVB} = 0$
SUB	$k_{EL} W_{EL} + k_{CA} W_{CA} + k_{CB} W_{CB} - k_{EG} W_{EG} - k_{SE} W_{SE} = 0$
J_{BEG}	$k_{6:2}^E E_{6:2} + k_{7:8}^E E_{7:8} + k_{8:9}^E E_{8:9} - k_{2:9}^E E_{2:9} - k_{2:4}^E E_{2:4} - k_{7:5}^E E_{7:5} = 0$
J_{BEV}	$k_{13:15}^E E_{13:15} + k_{16:21}^E E_{16:21} + k_{14:23}^E E_{14:23} + k_{17:23}^E E_{17:23} - k_{25:24}^E E_{25:24} - k_{22:21}^E E_{22:21} = 0$

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 7 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E da Planta Nuclear.

Fluxo	Valor (kW)	E - k (kJ/kJ)			Fluxo	Valor (kW)	E - k (kJ/kJ)
		DF	DP	DP JB			
W_{CB}	56.954,60	2,103	2,103	2,475	E_1	289.996,51	2,180
W_{CA}	56.954,60	2,103	2,103	2,475	E_2	341.938,17	2,199
W_{TG}	111.640,28	2,103	2,103	2,475	E_3	335.018,87	2,245
W_{EG}	109.965,67	2,135	2,135	2,513	E_4	386.960,53	2,253
W_{TVA}	30.813,18	3,199	3,122	2,698	E_5	348.264,48	2,253
W_{TVB}	16.226,66	3,304	3,655	3,158	E_6	38.696,05	2,253
W_{SE}	46.334,24	3,284	3,356	2,900	E_7	655.141,45	2,021
W_{BA}	245,86	2,476	2,497	2,628	E_8	420.498,37	2,021
W_{BB}	4,09	2,476	2,497	2,628	E_9	269.674,53	2,021
W_{EL}	156.049,96	2,476	2,497	2,628	E_{10}	29.756,21	2,930
E_U	34.303,49	4,469	4,372	3,778	E_{11}	299.420,15	2,112
E_F	539.639,45	1,000	1,000	1,000	E_{12}	111.494,10	2,822
$E_{6:2}$	4.502,24		2,021	2,379	E_{13}	78.045,87	2,822
$E_{9:2}$	38.069,83		3,385	3,985	E_{14}	33.448,23	2,822
$E_{4:2}$	45.022,36		2,660	3,131	E_{15}	43.112,27	2,822
$E_{5:7}$	306.876,97		1,758	1,758	E_{16}	21.556,14	2,822
$E_{7:8}$	234.643,07		2,021	2,379	E_{17}	21.556,14	2,822
$E_{8:9}$	150.823,84		2,021	2,379	E_{18}	23.670,53	3,987
$E_{25:12}$	110.800,25		2,752	3,239	E_{19}	44.311,89	3,503
$E_{13:15}$	34.933,60		2,754	2,379	E_{20}	2.559,19	2,822
$E_{16:21}$	21.534,59		2,754	2,379	E_{21}	21,55	335,113
$E_{21:22}$	3,55		2,877	3,028	E_{22}	25,10	288,085
$E_{24:25}$	215,20		2,853	3,002	E_{23}	543,40	3,503
$E_{14:23}$	33.197,43		2,754	2,379	E_{24}	478,65	19,085
$E_{17:23}$	21.263,54		2,754	2,379	E_{25}	693,85	14,043

Fonte: Produzido pelo autor.

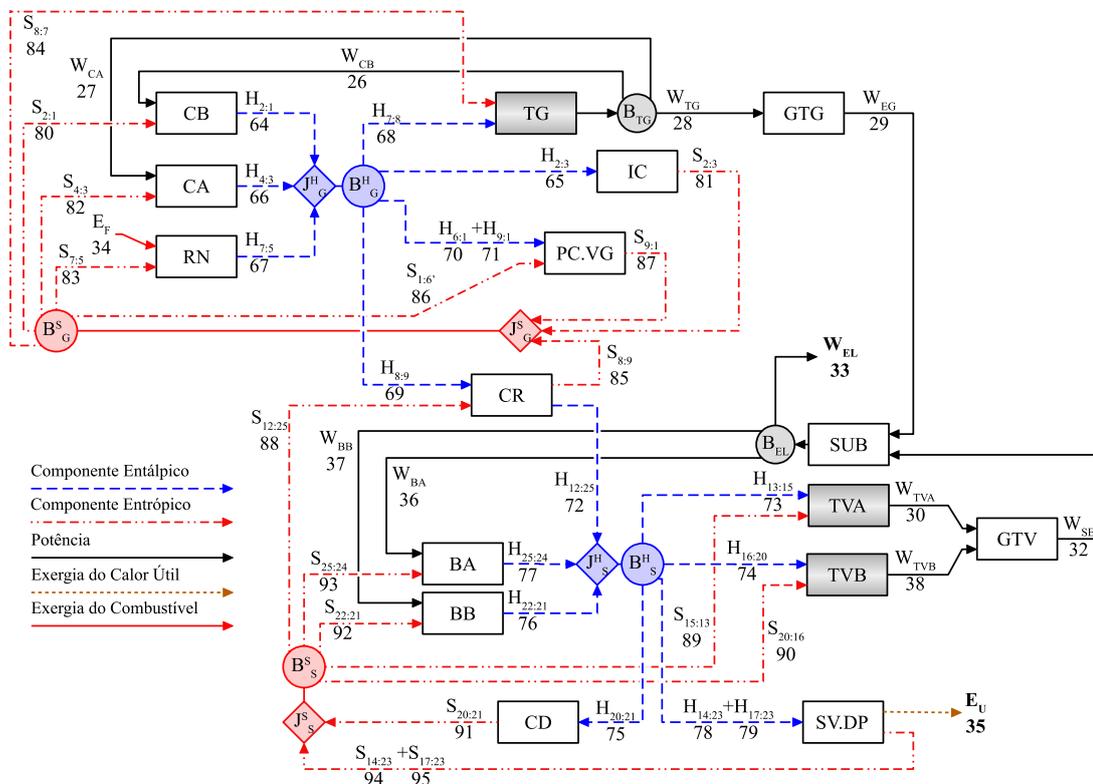
4.3 Modelo H&S

O modelo termoeconômico H&S desagrega a exergia física nas suas parcelas entálpica (H) e entrópica (S) para descrever o processo de formação de custo da planta. Para obter o sistema de equações de custo são formuladas as equações de balanço de custos em cada unidade (real e fictícia) do diagrama produtivo. O diagrama produtivo utilizando o Modelo H&S da planta é apresentada na Fig. 25, o qual é definido por 15 retângulos que representam as unidades produtivas e por quatro junção-bifurcação, sendo duas referentes a entalpia e duas a entropia.

No Modelo H&S a classificação dos fluxos como insumo e produto é parecida com o Modelo E. A parcela entálpica (H) apresenta uma contribuição positiva para a exergia (ver Fig. 9), logo se a variação da entalpia no subsistema for positiva, então o fluxo é considerado produto, caso contrário é insumo. Por sua vez, a parcela entrópica (S) tem uma contribuição negativa, assim há uma interpretação contrária da parcela entálpica, ou seja, se a variação da entropia no

subsistema for positiva, então o fluxo é considerado insumo, caso contrário é produto.

Figura 25 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o Modelo H&S.



Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

A vantagem do Modelo H&S em relação ao Modelo E é a possibilidade de isolar os equipamentos dissipativos com a função de trocar calor, que nessa planta são *intercooler*, *precooler* e o condensador. Entretanto, há um aumento na quantidade de fluxos a serem analisados, tornando o processo de elaboração de equações de custo complexo.

Em relação às hipóteses subjetivas de união de equipamentos, não são necessárias as aplicações da primeira, terceira e quarta hipóteses. Dado que o Modelo H&S permite o isolamento dos trocadores de calor, ou seja, permite definir insumo e produto desses subsistemas. O mesmo não ocorre com a segunda e quinta hipóteses, pois, essas são referentes às válvulas de expansão, as quais são geralmente modeladas com processo isoentálpico. Ainda na quinta hipótese não há necessidade do compressor de baixa pressão (CB) permanecer no agrupamento, visto que é definido insumo e produto do *precooler*. Assim, a unidade é modificada para PC.VG.

A Tab. 8 mostra o valor de cada fluxo do diagrama produtivo (HS DP) e do diagrama produtivo com um par de unidade fictícia (HS DP JB), bem como os respectivos custos exergéticos unitários.

Tabela 8 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E da Planta Nuclear.

Fluxo	Valor (kW)	HS - k (kJ/kJ)		Fluxo	Valor (kW)	HS - k (kJ/kJ)	
		DP	DP JB			DP	DP JB
W_{CB}	56.954,60	2,444	2,688	$H_{16:20}$	16.226,66	2,871	2,569
W_{CA}	56.954,60	2,444	2,688	$H_{20:21}$	77.932,13	2,871	2,569
W_{TG}	111.640,28	2,444	2,688	$H_{21:22}$	4,16	3,161	3,208
W_{EG}	109.965,67	2,481	2,728	$H_{24:25}$	249,61	3,139	3,187
W_{TVA}	30.813,18	3,290	2,963	$H_{14:23}$	90.619,50	2,871	2,569
W_{TVB}	16.226,66	3,406	3,072	$H_{17:23}$	90.316,17	2,871	2,569
W_{SE}	46.334,24	3,381	3,046	$S_{1:2}$	5.012,94	2,895	2,947
W_{BA}	245,86	2,748	2,823	$S_{2:3}$	50.035,30	2,649	2,924
W_{BB}	4,09	2,748	2,823	$S_{3:4}$	5.012,94	2,895	2,947
W_{EL}	156.049,96	2,748	2,823	$S_{5:7}$	232.762,49	2,895	2,947
E_U	34.303,49	3,231	2,891	$S_{7:8}$	9.093,59	2,895	2,947
E_F	539.639,45	1,000	1,000	$S_{8:9}$	154.830,03	2,871	2,952
$H_{1:2}$	56.954,60	2,699	2,947	$S_{6:1}$	4.000,94	2,895	2,947
$H_{2:3}$	56.954,60	2,327	2,569	$S_{9:1}$	51.017,57	3,210	3,524
$H_{3:4}$	56.954,60	2,699	2,947	$S_{25:12}$	194.853,63	3,134	2,947
$H_{5:7}$	539.639,46	2,249	2,271	$S_{13:15}$	4.120,42	3,134	2,947
$H_{7:8}$	225.549,48	2,327	2,569	$S_{16:20}$	2.770,29	3,134	2,947
$H_{8:9}$	305.653,88	2,327	2,569	$S_{20:21}$	75.394,49	2,968	2,655
$H_{6:1}$	5.695,46	2,327	2,569	$S_{21:22}$	0,60	3,134	2,947
$H_{9:1}$	59.695,24	2,327	2,569	$S_{24:25}$	34,40	3,134	2,947
$H_{25:12}$	305.653,88	2,871	2,952	$S_{14:23}$	57.422,07	3,231	2,891
$H_{13:15}$	30.813,18	2,871	2,569	$S_{17:23}$	69.052,63	3,231	2,891

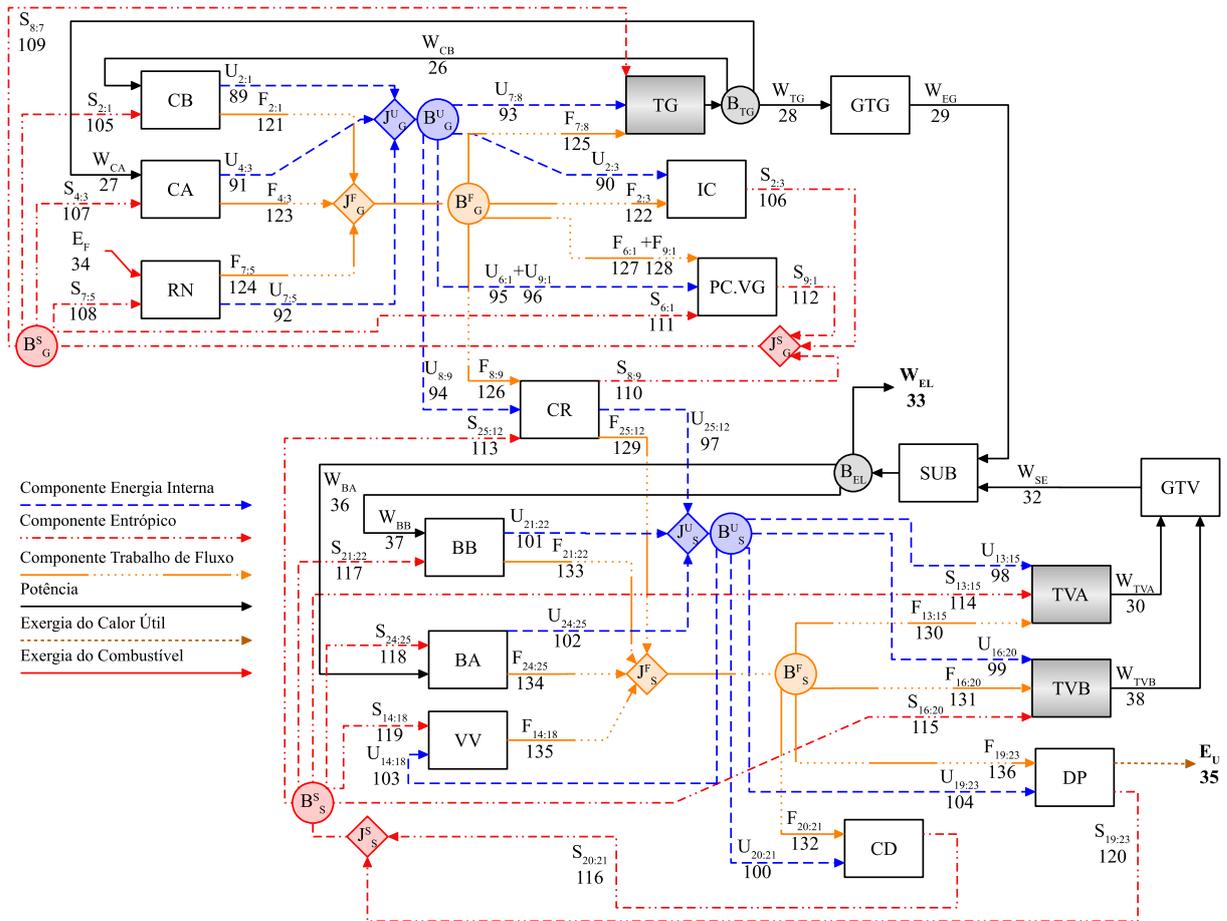
Fonte: Produzido pelo autor.

4.4 Modelo UFS

O modelo UFS desagrega a exergia física em energia interna (U), trabalho de fluxo (F) e entropia (S) para descrever o processo de formação de custo da planta. Neste modelo a classificação dos fluxos como insumo e produto é semelhante ao Modelo H&S, sendo igual à análise da parcela entrópica (S). As parcelas de energia interna (U) e trabalho de fluxo (F) realizam uma contribuição positiva para a exergia, logo se a variação dessas parcelas no subsistema for positiva, então o fluxo é considerado produto, caso contrário é insumo.

O diagrama produtivo utilizando o modelo UFS da planta nuclear de cogeração em ciclo combinado com turbina a gás hélio, *intercooler* e válvula de *by-pass* é apresentada na Fig. 26.

Figura 26 – Diagrama produtivo da planta nuclear utilizando o modelo UFS.



Fonte: Adaptada de Colombo et al. (2017).

A metodologia UFS avança na questão de isolamento de equipamentos dissipativos, principalmente na questão de válvulas. Porém, quando a válvula de expansão opera com fluidos que tenham comportamento semelhante aos gases ideais, esse modelo falha em definir insumo e produto. Isso porque, a entalpia e seus componentes (energia interna e trabalho de fluxo) dependem apenas da temperatura, ou seja, um processo isentálpico para gases ideais é um processo isotérmico. Isso significa que a energia interna e o trabalho de fluxo não varia na válvula de gás (VG). Dado que, apenas a entropia do fluido de trabalho varia na válvula de gás. O Modelo UFS permite definir apenas o seu insumo, pois, o produto não pode ser definido em energia interna nem de trabalho de fluxo. Desse modo, a válvula de expansão do ciclo a gás necessita de unir com um equipamento produtivo. Nesse caso, aplica-se somente a quinta hipótese com as mudanças realizadas no Modelo H&S.

Embora a entalpia não varie na válvula de vapor (VV), o Modelo UFS permite isolar este componente dissipativo porque desagrega a entalpia (H) em energia interna (U) e trabalho de fluxo (F). Tanto a energia interna quanto o trabalho de fluxo têm contribuições positivas para a exergia física total e variam na válvula de vapor. A energia interna do fluido de trabalho diminui e o trabalho de fluxo do fluido de trabalho aumenta a mesma quantidade, de modo a manter constante a entalpia da entrada à saída. Conseqüentemente, o primeiro é o insumo e o último é o

produto da válvula de vapor (VV).

Apesar de permitir definir insumo e produto de um número maior de equipamentos, há um aumento considerável de variáveis a serem contabilizadas, acarretando maior complexidade na elaboração das equações de balanço de custo, bem como na elaboração do diagrama.

A Tab. 9 mostra o valor de cada fluxo do diagrama produtivo (UFS DP) e do diagrama produtivo com um par de unidade fictícia (UFS DP JB), bem como os respectivos custos exergéticos unitários.

Tabela 9 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS da Planta Nuclear.

Fluxo	Valor (kW)	UFS - k (kJ/kJ)		Fluxo	Valor (kW)	UFS - k (kJ/kJ)	
		DP	DP JB			DP	DP JB
W_{CB}	56.954,60	2,428	2,711	$S_{3:4}$	5.012,94	2,863	2,932
W_{CA}	56.954,60	2,428	2,711	$S_{5:7}$	232.762,49	2,863	2,932
W_{GT}	111.640,28	2,428	2,711	$S_{7:8}$	9.093,59	2,863	2,932
W_{EG}	109.965,67	2,465	2,752	$S_{8:9}$	154.830,03	2,830	2,962
W_{TVA}	30.813,18	3,479	2,998	$S_{6:1}$	4.000,94	2,863	2,932
W_{SE}	46.334,24	3,532	3,085	$S_{9:1}$	51.017,57	3,188	3,553
W_{EL}	156.049,96	2,781	2,851	$S_{25:12}$	194.853,63	3,061	2,932
E_F	539.639,45	1,000	1,000	$S_{13:15}$	4.120,42	3,061	2,932
E_U	34.303,49	3,079	2,763	$S_{16:20}$	2.770,29	3,061	2,932
W_{BA}	245,86	2,781	2,851	$S_{20:21}$	75.394,49	2,989	2,709
W_{BB}	4,09	2,781	2,851	$S_{21:22}$	0,60	3,061	2,932
W_{TVB}	16.226,66	3,479	3,116	$S_{24:25}$	34,40	3,061	2,932
$U_{1:2}$	34.173,04	2,680	2,969	$S_{14:18}$	9.777,70	3,061	2,932
$U_{2:3}$	34.173,04	2,312	2,625	$S_{19:23}$	137.167,18	3,079	2,763
$U_{3:4}$	34.173,04	2,680	2,969	$F_{1:2}$	22.781,56	2,680	2,969
$U_{5:7}$	323.786,32	2,235	2,265	$F_{2:3}$	22.781,56	2,312	2,543
$U_{7:8}$	135.330,79	2,312	2,625	$F_{3:4}$	22.781,56	2,680	2,969
$U_{8:9}$	183.393,83	2,312	2,625	$F_{5:7}$	215.853,13	2,235	2,265
$U_{6:1}$	3.417,30	2,312	2,625	$F_{7:8}$	90.218,68	2,312	2,543
$U_{9:1}$	35.817,44	2,312	2,625	$F_{8:9}$	122.260,05	2,312	2,543
$U_{25:12}$	276.949,39	2,830	2,962	$F_{6:1}$	2.278,16	2,312	2,543
$U_{13:15}$	23.665,33	2,831	2,625	$F_{9:1}$	23.877,80	2,312	2,543
$U_{16:20}$	14.249,17	2,831	2,625	$F_{25:12}$	28.704,48	2,830	2,962
$U_{20:21}$	73.359,20	2,831	2,625	$F_{13:15}$	7.147,85	3,863	2,543
$U_{21:22}$	0,62	3,184	3,234	$F_{16:20}$	1.977,49	3,863	2,543
$U_{24:25}$	37,54	3,161	3,212	$F_{20:21}$	4.572,94	3,863	2,543
$U_{14:18}$	35,09	2,831	2,625	$F_{21:22}$	3,53	3,184	3,234
$U_{19:23}$	165.649,22	2,831	2,625	$F_{24:25}$	212,08	3,161	3,212
$S_{1:2}$	5.012,94	2,863	2,932	$F_{14:18}$	35,09	855,805	819,630
$S_{2:3}$	50.035,30	2,632	2,951	$F_{19:23}$	15.286,46	3,863	2,543

Fonte: Produzido pelo autor.

Os custos exergéticos unitários são coerentes, pois, todos são maiores que o custo exergético

unitário do combustível. O fluxo produtivo $F_{14:18}$ de ambos os diagramas repetem o mesmo comportamento do Modelo E, isto é, apresenta valores elevadores de custo. Isso conforme explicado no Modelo E, ocorre devido à destruição de exergia na válvula de expansão do ciclo a vapor (VV), logo há diminuição do valor da exergia do fluido de trabalho e conseqüentemente aumento do custo.

4.5 Modelo UFS+

O Modelo UFS+ é uma extensão do Modelo UFS que desagrega a exergia física nas parcelas de energia interna (U), trabalho de fluxo do volume (FV), trabalho de fluxo da pressão (FP) e entrópica (S). Essa abordagem é a mais completa até o momento, permitindo definir insumo e produto dos equipamentos dissipativos.

No Modelo UFS+ a classificação dos fluxos como insumo e produto são semelhantes ao Modelo H&S, sendo igual à parcela entrópica (S). Por sua vez, as parcelas de energia interna (U), trabalho de fluxo da pressão (F) e trabalho de fluxo do volume (FV) realizam uma contribuição positiva para a exergia, logo se a variação dessas parcelas no subsistema for positiva, então o fluxo é considerado produto, caso contrário é insumo.

Tanto trabalho de fluxo do volume (FV) quanto o trabalho de fluxo da pressão (FP) têm contribuição positiva na válvula de gás. O trabalho de fluxo da pressão (FP) diminui e o trabalho de fluxo do volume (FV) aumenta a mesma quantidade, de modo a manter constante o trabalho de fluxo (F) da entrada para a saída. Conseqüentemente, o primeiro é o insumo e o último é o produto da válvula de gás (VG). Dado que a entropia do fluido de trabalho aumenta na válvula de gás, esta magnitude também é um insumo. A energia interna não é insumo nem produto porque esta magnitude não varia na válvula de gás.

A Fig. 27 mostra o diagrama produtivo do modelo UFS+ aplicado a planta nuclear. Observa-se que todas as unidades foram isoladas, não sendo necessário a aplicação de alguma hipótese subjetiva, por conseqüência uma menor influência a análise termoeconômica. Entretanto, é notório o aumento da complexidade exigida, haja vista a quantidade de fluxos a serem analisados.

Tabela 10 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS+ da Planta Nuclear.

Fluxo	Valor (kW)	UFS+ k (kJ/kJ)		Fluxo	Valor (kW)	UFS+ k (kJ/kJ)	
		DP	DP JB			DP	DP JB
W_{CB}	56.954,60	2,435	2,755	$S_{21:22}$	0,60	3,262	2,983
W_{CA}	56.954,60	2,435	2,755	$S_{24:25}$	34,40	3,262	2,983
W_{TG}	111.640,28	2,435	2,755	$S_{14:18}$	9.777,70	3,262	2,983
W_{EG}	109.965,67	2,472	2,797	$S_{19:23}$	137.167,18	3,166	2,837
W_{TVA}	30.813,18	3,438	2,979	$S_{6:10}$	8.939,85	2,863	2,983
W_{SE}	46.334,24	3,451	2,924	$S_{11:1}$	55.967,06	2,772	3,094
W_{EL}	156.049,96	2,762	2,835	$FP_{1:2}$	23.659,05	2,732	3,021
E_F	539.639,45	1,000	1,000	$FP_{2:3}$	22.243,61	2,323	2,596
E_U	34.303,49	3,166	2,837	$FP_{3:4}$	23.313,04	2,715	3,020
W_{BA}	245,86	2,762	2,835	$FP_{5:7}$	212.536,72	2,235	2,287
W_{BB}	4,09	2,762	2,835	$FP_{7:8}$	94.275,49	2,323	2,596
W_{TVB}	16.226,66	3,325	2,693	$FP_{8:9}$	117.541,72	2,323	2,596
$U_{1:2}$	34.173,04	2,732	3,021	$FP_{25:12}$	27.235,20	2,956	3,020
$U_{2:3}$	34.173,04	2,320	2,665	$FP_{13:15}$	12.748,93	3,279	2,596
$U_{3:4}$	34.173,04	2,715	3,020	$FP_{16:20}$	80.813,37	3,279	2,596
$U_{5:7}$	323.786,32	2,235	2,287	$FP_{20:21}$	77.577,75	3,393	3,035
$U_{7:8}$	135.330,79	2,320	2,665	$FP_{21:22}$	3,53	3,194	3,225
$U_{8:9}$	183.393,83	2,320	2,665	$FP_{24:25}$	212,09	3,151	3,311
$U_{25:12}$	276.949,39	2,956	3,020	$FP_{14:18}$	3.935,05	3,279	2,596
$U_{13:15}$	23.665,33	2,956	2,665	$FP_{19:23}$	7.545,80	3,279	2,596
$U_{16:20}$	14.249,17	2,956	2,665	$FP_{6:10}$	280,30	2,323	2,596
$U_{20:21}$	73.359,20	2,956	2,665	$FP_{11:1}$	25.167,69	2,323	2,596
$U_{21:22}$	0,62	3,194	3,225	$FV_{1:2}$	877,49	5,689	3,271
$U_{24:25}$	37,54	3,279	2,596	$FV_{2:3}$	537,95	5,689	3,271
$U_{14:18}$	35,09	2,956	2,665	$FV_{3:4}$	531,48	5,689	3,271
$U_{19:23}$	165.649,22	2,956	2,665	$FV_{5:7}$	3.316,42	2,235	2,287
$U_{11:1}$	39.234,74	2,320	2,665	$FV_{7:8}$	4.056,80	2,435	2,755
$S_{1:2}$	5.012,94	2,863	2,983	$FV_{8:9}$	4.718,33	5,689	3,271
$S_{2:3}$	50.035,30	2,679	3,009	$FV_{25:12}$	1.469,28	2,956	3,020
$S_{3:4}$	5.012,94	2,863	2,983	$FV_{13:15}$	5.601,08	3,438	2,979
$S_{5:7}$	232.762,49	2,863	2,983	$FV_{16:20}$	78.835,88	3,325	2,693
$S_{7:8}$	9.093,59	2,863	2,983	$FV_{20:21}$	82.150,69	3,678	3,271
$S_{8:9}$	154.830,03	2,956	3,020	$FV_{21:22}$	0,00	3,678	3,271
$S_{25:12}$	194.853,63	3,262	2,983	$FV_{24:25}$	0,01	3,678	3,271
$S_{13:15}$	4.120,42	3,262	2,983	$FV_{14:18}$	3.970,14	11,309	9,943
$S_{16:20}$	2.770,29	3,262	2,983	$FV_{19:23}$	7.740,65	3,678	3,271
$S_{20:21}$	75.394,49	3,393	3,035	$FV_{6:10}$	280,30	93,641	97,742
				$FV_{11:1}$	988,26	5,689	3,271

Fonte: Produzido pelo autor.

4.6 Análise Comparativa

A Tab. 11 mostra os resultados das metodologias termoeconômicas aplicadas (E, H&S, UFS e UFS+), como também a quantidade de equações, equações auxiliares e o número de fluxos produtivos envolvidos na análise.

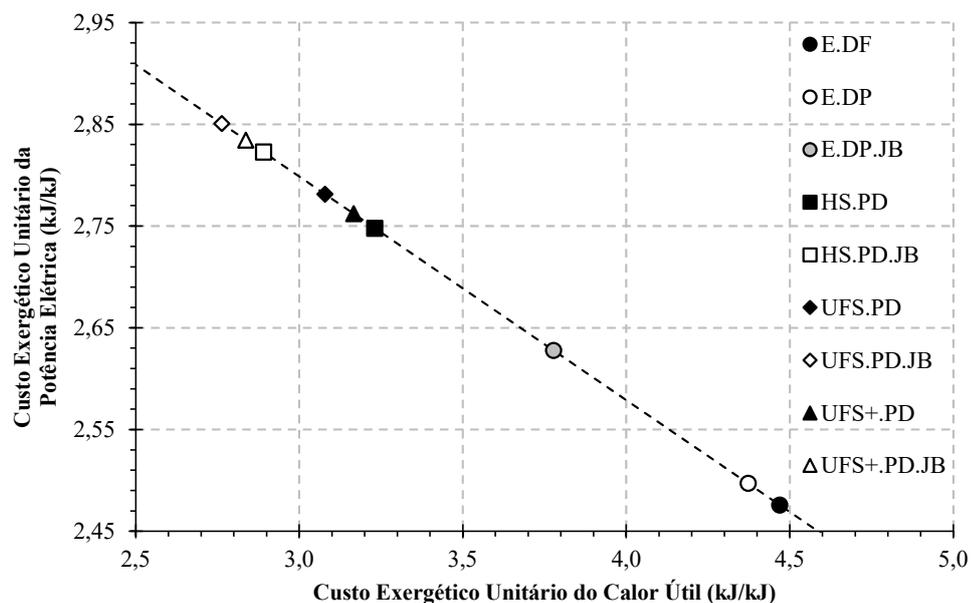
Tabela 11 – Resultados do custo exergetico unitário dos produtos e da complexidade entre as metodologias termoeconômicas aplicadas a planta nuclear.

Modelo	Custo Exergetico Unitário (kJ/kJ)		Complexidade do Modelo		
	E_U	W_{EL}	Unidades	Equações Auxiliares	Fluxos
E.DF	4,469	2,476	24	13	37
E.DP	4,372	2,497	15	10	25
E.DP.JB	3,778	2,628	14	11	25
HS.DP	3,231	2,748	20	24	44
HS.DP.JB	2,891	2,823	18	26	44
UFS.DP	3,079	2,781	23	37	60
UFS.DP.JB	2,763	2,851	20	40	60
UFS+.DP	3,166	2,762	26	49	75
UFS+.DP.JB	2,837	2,835	22	53	75

Fonte: Produzido pelo autor.

A Fig. 28 representa a reta solução da planta estudada. Essa compara os custos exergeticos unitários dos produtos finais, calor útil (E_U) e potência elétrica (W_{EL}), obtidos por diferentes modelos termoeconômicos.

Figura 28 – Reta solução do custo exergetico unitário das metodologias aplicadas a planta nuclear.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 28 mostra que o Modelo E sobrecarrega o custo do calor útil, enquanto os Modelos com diagrama produtivo e apenas um par de junção-bifurcação (DP.JB) acabam por sobrecarregar o custo da potência elétrica.

O Modelo E no diagrama físico (E.DF) obteve o maior custo exergético unitário do calor útil ($4,469 \text{ kJ/kJ}$) e o menor valor de custo para a potência elétrica ($2,476 \text{ kJ/kJ}$). Na outra extremidade encontra-se o Modelo UFS no diagrama produtivo com apenas um par de junção-bifurcação por parcela de exergia (UFS.DP.JB) com o menor custo do calor útil ($2,763 \text{ kJ/kJ}$) e o maior custo da potência elétrica ($2,851 \text{ kJ/kJ}$). Em porcentagem a metodologia E.DF em relação a UFS.DP.JB aumentou em 38,18% o custo do calor útil e reduziu em 15,15% o custo da potência.

No caso do Modelo E, a unidade produtiva que produz o calor útil (E_U) está unida com a válvula de expansão do ciclo a vapor (VV) formando a unidade VV.DP por meio das hipóteses subjetivas. Esse procedimento é necessário para definir insumo e produto de equipamentos dissipativos, porém, penaliza aqueles que são analisados conjuntamente, assim todas as perdas são contabilizadas no mesmo agrupamento.

A solução para evitar a união de equipamentos é a desagregação da exergia física, possibilitando isolar os equipamentos dissipativos, bem como reduzir ou até eliminar as hipóteses subjetivas de agrupamento de equipamentos. Além disso, quanto maior a desagregação, maior é a precisão dos custos, visto que o processo de formação de custo é mais detalhado.

Esse fato é evidente a partir do isolamento dos condensadores, visto que a desagregação da exergia física corroborou com o aumento do custo exergético da potência elétrica. Haja vista que os Modelos H&S, UFS e UFS+ utilizaram a parcela entrópica para distribuírem as perdas para todos os equipamentos que aumentam a entropia do fluido de trabalho. No entanto, como mostrado na Tab. 11, a desagregação da exergia física acarreta um aumento de cerca de 5 vezes o número de fluxos a serem analisados, quando comparado E.DP com UFS+.DP. Desta forma, o processo de formação de custo apresenta maior complexidade na elaboração das equações de balanço de custo e equações auxiliares.

O diagrama produtivo possibilitou dois arranjos devido aos equipamentos fictícios (junção e bifurcação). Nesse caso um arranjo apresentava um par de equipamentos fictícios para cada tipo de fluido e outro arranjo possuía apenas um par para todo o sistema sem diferenciar o tipo de fluido. Para ambos os arranjos, os custos dos produtos da planta estão contidos na reta solução, ou seja, são valores de custos coerentes e possíveis. No entanto, os diagramas com dois pares de junções e bifurcações são mais coerente, pois, separam os diferentes fluidos de trabalho, bem como os sistemas.

Ao analisar o processo de formação de custo dos arranjos nota-se que o diagrama produtivo com um par para cada tipo de fluido apresentava valores de custo menores no ciclo a gás em relação ao ciclo a vapor. Dado que o ciclo a vapor apresenta como insumo a potência

elétrica, maior valor por ser produto final, além do custo advindo do ciclo a gás por meio da caldeira recuperativa (CR). Acarretando um custo maior para o calor útil em detrimento da potência elétrica. O diagrama produtivo sem o diferenciamento do tipo de fluido coloca todos os subsistemas consumidores de exergia ou das desagregações de exergia em um mesmo custo de insumo, ou seja, a potência produzida pelo ciclo a gás torna-se mais cara, enquanto a potência do ciclo a vapor e calor útil, mais baratos.

Em suma, o Modelo E não permite definir insumo e produto de equipamentos dissipativos, sendo necessária adoção de hipóteses para uni-los a equipamentos produtivos ou a utilização da desagregação da exergia física. Essa permite isolar os equipamentos, além de fornecer processo de formação de custo mais detalhado. Por consequência, há aumento do número de equações, fluxos a serem analisados e da complexidade. Por sua vez, o diagrama produtivo mostra através de imagem a estrutura produtiva e o processo de formação de custo. O diagrama utiliza de fluxos produtivos para realizar as interconexões entre os subsistemas, além de possuírem os equipamentos fictícios, que permitem a elaboração de diferentes arranjos tornando o processo de formação de custo arbitrário. Em contrapartida, o diagrama físico geralmente necessita da descrição da estrutura produtiva, não sendo fácil o reconhecimento do processo de formação de custo. Esse diagrama utiliza dos fluxos físicos para as interconexões dos subsistemas.

5 ESTUDO DE CASO II: ELABORAÇÃO DO DIAGRAMA ABRANGENTE

Este estudo de caso visa aplicar a metodologia apresentada para a elaboração do diagrama abrangente utilizando a exergia total (E) e os diferentes níveis de desagregação da exergia física (E^{TE^M} , H&S, UFS e UFS+), que também serão aplicadas no diagrama físico e produtivo com o propósito de comparação.

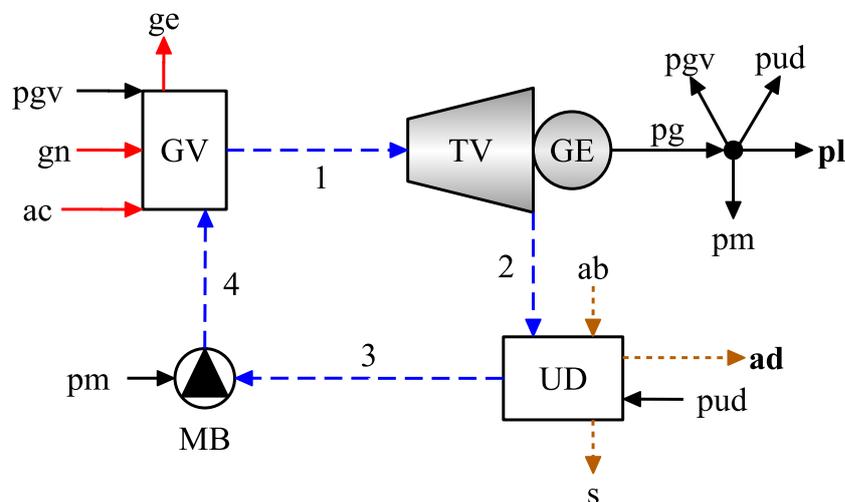
A planta selecionada foi utilizada por Avellar et al. (2018b). Os autores verificaram os diferentes processos de formação de custo dos diagramas físico, produtivo e abrangente utilizando a exergia total (E) de modo a obter o custo exergético e monetário. Posteriormente, Carvalho et al. (2020) utilizou o mesmo sistema para comparar uma análise ambiental e análise de ciclo de vida.

Essa planta foi escolhida por evitar questões relacionadas com tratamento de resíduo e equipamentos dissipativos, focando apenas na metodologia.

5.1 Descrição da Planta

A Fig. 29 representa a planta dual para a produção de energia elétrica e água dessalinizada. O sistema contém seis subsistemas: o gerador de vapor (GV), a turbina a vapor (TV), o gerador elétrico (GE), a unidade de dessalinização (UD) e a bomba com motor (MB). A planta produz $2.400 \text{ m}^3/d$ de água dessalinizada (ad) e $811,40 \text{ kW}$ de potência elétrica líquida (pl). O consumo de exergia do gás natural (gn) é de $10.480,31 \text{ kW}$.

Figura 29 – Fluxograma da planta dual.



Fonte: Adaptada de Avellar et al. (2018b).

A planta produz 1.052,91 kW de potência elétrica bruta (pg), sendo 27,21 kW são consumidos pelos ventiladores do gerador de vapor (pgv), 14,30 kW na motobomba (pm), 200 kW na unidade de dessalinização (pud). Os outros fluxos da planta são: água bruta do mar (ab), salmoura (s), ar de combustão (ac) e os gases de exaustão (ge). A Tab. 12 mostra os parâmetros dos fluxos físicos que representam o fluido de trabalho.

Tabela 12 – Parâmetros dos fluxos físicos que representam o fluido de trabalho.

Fluxo Físico	\dot{m} (kg/s)	T (°C)	P (bar)
1	3,194	330,0	25,0
2	3,194	136,0	2,0
3	3,194	60,2	1,013
4	3,194	60,7	26,01

Fonte: Adaptada de Avellar et al. (2018b).

5.2 Análise Termoeconômica

Um modelo termoeconômico descreve o processo de formação de custo da planta através de um sistema de equações. A definição do modelo termoeconômico passa pelo critério para definir a estrutura produtiva da planta e na formulação das equações auxiliares de custo. Sendo assim, será apresentado para cada modelo termoeconômico a estrutura produtiva e posteriormente os diagramas.

Geralmente, em análise termoeconômica são utilizadas as magnitudes termodinâmicas para descrever o insumo e produto de um subsistema. No entanto, Wang e Lior (2007) utilizam outra magnitude para descrever uma unidade de dessalinização, sendo o interesse na vazão volumétrica da água doce produzida, não na exergia. Segundo os autores, a equação de custo é modificada para esse subsistema, conforme a Eq. (25).

$$k_f E_f = k_W W_{net} + k_{ad} Q_{ad} \quad (25)$$

Onde E_f é o exergia do combustível, W_{net} é a potência líquida produzida, Q_{ad} é a vazão volumétrica da água doce produzida, k_f e k_W são os custos exergéticos unitário do combustível e potência, as quais usualmente possuem as unidades kJ/kJ ou kW/kW . Enquanto o custo exergético unitário da água doce (k_{ad}), tem como unidade (kWh/m^3). Este custo representa a quantidade de exergia do gás natural (em kWh) consumido para produzir cada unidade de água doce (em m^3).

Conforme a Fig. 19, a primeira etapa é referente a verificar ou escolher o modelo termoeconômico mais adequado. Segundo a Fig. 20, o diagrama abrangente com o Modelo E é o mais adequado para esse sistema, haja vista que não apresenta resíduo e equipamento dissipativo.

Em todas as avaliações, a temperatura e pressão de referência (estado morto) são 25°C (298,15 K) e 1,0132 bar, respectivamente.

5.2.1 Modelo E

A próxima etapa da metodologia é definir insumo e produto dos fluxos. Desse modo, para este modelo é necessário utilizar a exergia específica (e) contida na Tab. 13.

Tabela 13 – Valores de exergia específica (e) dos fluxos materiais.

Fluxo	Exergia Específica (e) (kJ/kg)
1	1067,8
2	594,6
3	8,1
4	10,8

Fonte: Produzido pelo autor.

Para os fluxos de energia, a definição de insumo e produto é de acordo com sua entrada (insumo) ou saída (produto) do subsistema. Diferentemente dos fluxos materiais, os quais necessitam analisar a variação de exergia específica da saída e entrada ($e_{out} - e_{in}$) de cada subsistema, conforme abaixo:

- **Gerador de Vapor (GV):**
 - ($e_1 - e_4$) é positivo, logo é produto formando o fluxo produtivo $E_{1:4}$.
- **Turbina e Gerador (TVGE):**
 - ($e_2 - e_1$) é negativo, logo é insumo formando o fluxo produtivo $E_{1:2}$.
- **Unidade de Dessalinização (UD):**
 - ($e_3 - e_2$) é negativo, logo é insumo formando o fluxo produtivo $E_{2:3}$.
- **Motor e Bomba (MB):**
 - ($e_4 - e_3$) é positivo, logo é produto formando o fluxo produtivo $E_{4:3}$.

Ao reunir todas as definições de insumo e produto é possível construir a estrutura produtiva da planta, representada na Tab. 14.

Pode-se notar que alguns fluxos do fluxograma não aparecem na estrutura produtiva, isso ocorre, devidos os fluxos serem considerados como perda e automaticamente cobrados nos produtos dos subsistemas nos quais foram gerados, por exemplo, os gases de exaustão (eg) no gerador de vapor e salmoura (b) na unidade de dessalinização. Existem outros tipos de fluxos do fluxograma que também não aparecem, isto porque sua exergia é zero ou não há custos associados a eles, por exemplo, ar de combustão (ca) e água do mar (sw). Assim, esses fluxos não são produtos nem insumos de nenhum subsistema da planta.

Tabela 14 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo E usando os fluxos físicos e produtivos.

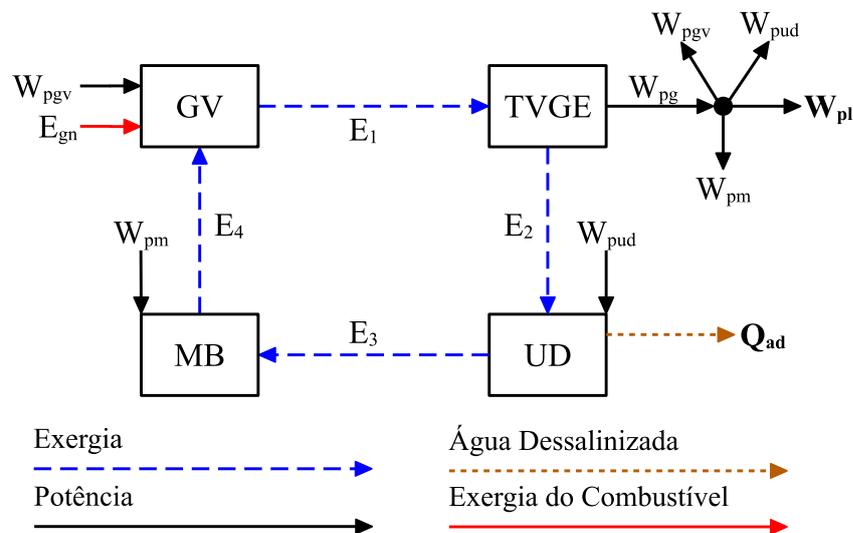
Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
GV	$E_{gn} + W_{pgv}$	$E_{gn} + W_{pgv}$	$E_1 - E_4$	$E_{1:4}$
TVGE	$E_1 - E_2$	$E_{1:2}$	W_{pg}	W_{pg}
UD	$(E_2 - E_3) + W_{pud}$	$E_{2:3} + W_{pud}$	Q_{ad}	Q_{ad}
MB	W_{pm}	W_{pm}	$E_4 - E_3$	$E_{4:3}$

Fonte: Adaptada de Avellar et al. (2018b).

5.2.1.1 Diagrama Físico

A Fig. 30 mostra o diagrama físico da planta dual para a produção de energia elétrica e água dessalinizada. O diagrama físico pode ser considerado uma simplificação do fluxograma (Fig. 29), o qual os subsistemas são definidos e representados conforme a estrutura produtiva Tab. 14.

Figura 30 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo E.



Fonte: Adaptada de Avellar et al. (2018b).

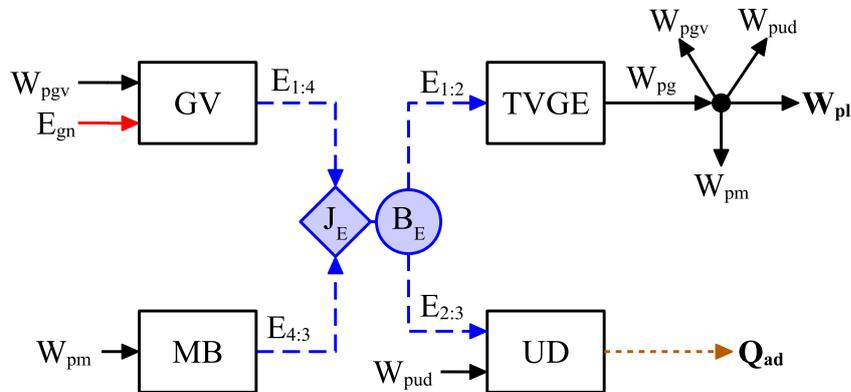
Uma vez elaborado o diagrama físico, é possível escrever as equações de balanço de custo exergético para cada subsistema, segundo as Eqs. (4) e (25). As equações auxiliares baseiam-se no princípio do insumo e produto. O princípio do insumo atribui o mesmo custo para três fluxos de exergia (E_1 , E_2 e E_3), enquanto o princípio do produto atribui o mesmo custo unitário para cinco fluxos (W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}).

5.2.1.2 Diagrama Produtivo

A Fig. 31 representa o diagrama produtivo para a planta, o qual já demonstra o processo de formação de custo sem a necessidade de apresentar a estrutura produtiva. Cada retângulo

é um subsistema, os losangos e círculos são os equipamentos fictícios chamados, junção (J) e bifurcação (B). Para cada unidade produtiva há setas de entrada e saída que representam insumo e produto.

Figura 31 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo E.



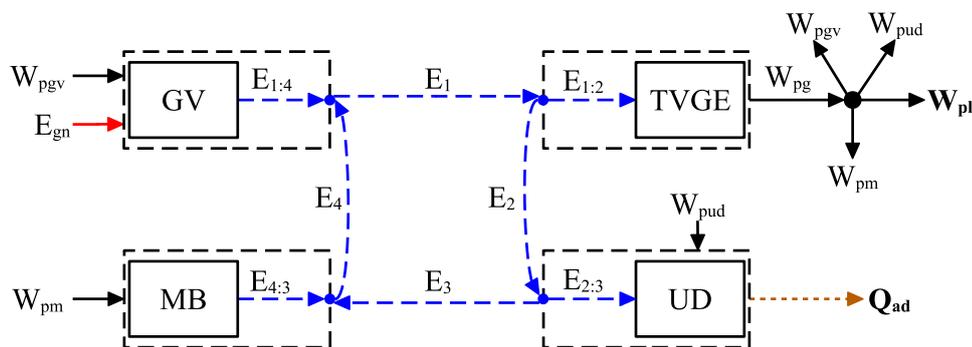
Fonte: Adaptada de Avellar et al. (2018b).

O modelo termoeconômico para a alocação de custo exergético é obtido pela formulação de balanço de custo em cada unidade produtiva e equipamentos fictícios utilizando as Eq. (4) e Eq. (25). As equações auxiliares são obtidas quando os fluxos produtivos que saem da mesma unidade produtiva apresenta o mesmo custo unitário. Assim, é atribuído o mesmo custo unitário na saída da bifurcação ($E_{1:2}$ e $E_{2:3}$) e na saída da unidade TVGE (W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}).

5.2.1.3 Diagrama Abrangente

Após a construção da estrutura produtiva (Tab. 14), o diagrama abrangente é elaborado, o qual é representado na Fig. 32.

Figura 32 – Diagrama abrangente da planta dual utilizando o Modelo E.



Fonte: Adaptada de Avellar et al. (2018b).

O diagrama abrangente mostra de forma clara e gráfica o produto e insumo dos subsistemas, bem como cada subsistema atua tanto como uma unidade produtiva (linha contínua) quanto como um componente (linha tracejada) combinando a característica do diagrama físico e produtivo. Assim, os subsistemas são interconectados usando os mesmos fluxos físicos apresentados no

fluxograma, quanto o produto e os insumos de cada subsistema também são apresentados no diagrama.

Em relação ao diagrama de Lazzaretto e Macor (1995) há duas diferenças, a ausência de subsistemas fictícios (junção (J) e bifurcação (B)) e o nó na fronteira do volume de controle do componente, não mais internamente ao componente.

A próxima etapa da metodologia para sistemas sem resíduo é a aplicação do balanço de custo nos subsistemas, conforme Fig. 19. Assim, o modelo matemático de alocação de custos exergéticos é obtido pela formulação de balanço de custo em cada unidade abrangente, conforme as Eqs. (4) e (25). Porém, cada subsistema permite formular duas equações de custo, uma como unidade produtiva e outra como componente. A partir da Fig. 32 é elaborado as equações para os componentes, unidades produtivas e nós nas Eqs. (26) a (37). A saber que é necessário apenas a combinação das equações dos componentes e nós ou unidade produtiva e nós.

• **Componente:**

$$\text{GV: } -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} + k_1^E E_1 - k_4^E E_4 = 0 \quad (26)$$

$$\text{TVGE: } -k_1^E E_1 + k_2^E E_2 + k_{pg} W_{pg} = 0 \quad (27)$$

$$\text{UD: } -k_2^E E_2 + k_3^E E_3 - k_{pud} W_{pud} + k_{ad} Q_{ad} = 0 \quad (28)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} - k_3^E E_3 + k_4^E E_4 = 0 \quad (29)$$

• **Unidade Produtiva:**

$$\text{GV: } -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} + k_{1:4}^E E_{1:4} = 0 \quad (30)$$

$$\text{TVGE: } -k_{1:2}^E E_{1:2} + k_{pg} W_{pg} = 0 \quad (31)$$

$$\text{UD: } -k_{2:3}^E E_{2:3} - k_{pud} W_{pud} + k_{ad} Q_{ad} = 0 \quad (32)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} + k_{4:3}^E E_{4:3} = 0 \quad (33)$$

• **Nó:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^E E_4 + k_1^E E_1 - k_{1:4}^E E_{1:4} = 0 \quad (34)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^E E_1 + k_2^E E_2 + k_{1:2}^E E_{1:2} = 0 \quad (35)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^E E_2 + k_3^E E_3 + k_{2:3}^E E_{2:3} = 0 \quad (36)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^E E_3 + k_4^E E_4 - k_{4:3}^E E_{4:3} = 0 \quad (37)$$

A próxima etapa do fluxograma da Fig. 19 é a aplicação das regras de obtenção das equações auxiliares para completar o sistema de equações. Dessa forma, cada subsistema é analisado, obtendo as Eqs. (38) a (44).

• **Gerador de Vapor (GV):**

– Fluxo Externo Sem Informação:

$$k_{gn} = 1 \quad (38)$$

• **Turbina e Gerador (TVGE):**

– Regra do Insumo:

$$k_1^E - k_2^E = 0 \quad (39)$$

– Regra do Produto:

$$k_{pg} - k_{pgv} = 0 \quad (40)$$

$$k_{pg} - k_{pud} = 0 \quad (41)$$

$$k_{pg} - k_{pm} = 0 \quad (42)$$

$$k_{pg} - k_{pl} = 0 \quad (43)$$

• **Unidade de Dessalinização (UD):**

– Regra do Insumo:

$$k_2^E - k_3^E = 0 \quad (44)$$

A Tab. 15 mostra o valor dos custos exergeticos unitários de cada fluxo do diagrama físico (DF), diagrama produtivo (DP) e o diagrama abrangente (DAB). Os custos exergeticos unitários de todos os diagramas foram iguais aos obtidos por Avellar et al. (2018b).

Tabela 15 – Custo Exergetico Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E da Planta Dual.

Fluxo	Valor (kW)	k (kW/kW)		
		DF	DP	DAB
E_1	3.410,4	3,152		3,152
E_2	1.899,0	3,152		3,152
E_3	25,7	3,152		3,152
E_4	34,4	4,237		4,237
$E_{1:2}$	1.511,4		3,152	3,152
$E_{2:3}$	1.873,3		3,152	3,152
$E_{4:3}$	8,7		7,457	7,457
$E_{1:4}$	3.376,0		3,141	3,141
E_{gn}	10.480,3	1,000	1,000	1,000
Q_{ad}	*100,0	**68,093	**68,093	**68,093
W_{gp}	1.052,9	4,524	4,524	4,524
W_{pgv}	27,2	4,524	4,524	4,524
W_{pl}	811,4	4,524	4,524	4,524
W_{pud}	200,0	4,524	4,524	4,524
W_{pm}	14,3	4,524	4,524	4,524

Nota: *(m^3/h); **(kWh/m^3)

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.2 Modelo $E^T E^M$

Neste modelo a exergia física é desagregada em exergia térmica (E^T) e exergia mecânica (E^M). As magnitudes termodinâmicas específicas dessas parcelas estão na Tab. 16.

Tabela 16 – Valores da exergia térmica específica (e^T) e exergia mecânica específica (e^M) dos fluxos materiais.

Fluxo	Magnitude Específica (kJ/kg)	
	e^T	e^M
1	1065,4	2,404
2	594,5	$9,896 \cdot 10^{-2}$
3	8,1	$5,015 \cdot 10^{-6}$
4	8,3	2,506

Fonte: Produzido pelo autor.

Em seguida são definidos os insumos e produtos em cada subsistema. Em virtude das parcelas, exergia térmica e exergia mecânica, apresentarem sinais positivos na composição da exergia total é adotado os mesmos critérios do Modelo E. Dessa forma, a variação da parcela específica de saída e entrada dos fluxos materiais quando positivos são produtos, caso contrário é insumo. Por sua vez, os fluxos de energia que fornecem recursos ao subsistema são classificados como insumo e aqueles sendo produzidos ou saem do subsistema são produtos. A análise de cada subsistema é realizada abaixo:

- **Gerador de Vapor (GV):**
 - $(e_1^T - e_4^T)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $E_{1:4}^T$.
 - $(e_1^M - e_4^M)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $E_{4:1}^M$.
 - E_{gn} e W_{pgv} fornecem recursos a GV, então são classificados como insumo.
- **Turbina e Gerador (TVGE):**
 - $(e_2^T - e_1^T)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $E_{1:2}^T$.
 - $(e_2^M - e_1^M)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $E_{1:2}^M$.
 - W_{pg} e todas potências são produzidas por TVGE, logo são produtos.
- **Unidade de Dessalinização (UD):**
 - $(e_3^T - e_2^T)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $E_{2:3}^T$.
 - $(e_3^M - e_2^M)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $E_{2:3}^M$.
 - W_{pud} fornece recurso, então é insumo.
- **Motor e Bomba (MB):**
 - $(e_4^T - e_3^T)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $E_{4:3}^T$.
 - $(e_4^M - e_3^M)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $E_{4:3}^M$.
 - W_{pm} fornece recurso, então é insumo.

Uma vez definido o insumo e produto de cada subsistema, a estrutura produtiva é elaborada, conforme a Tab. 17.

Tabela 17 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo $E^T E^M$ para os fluxos físicos e produtivos.

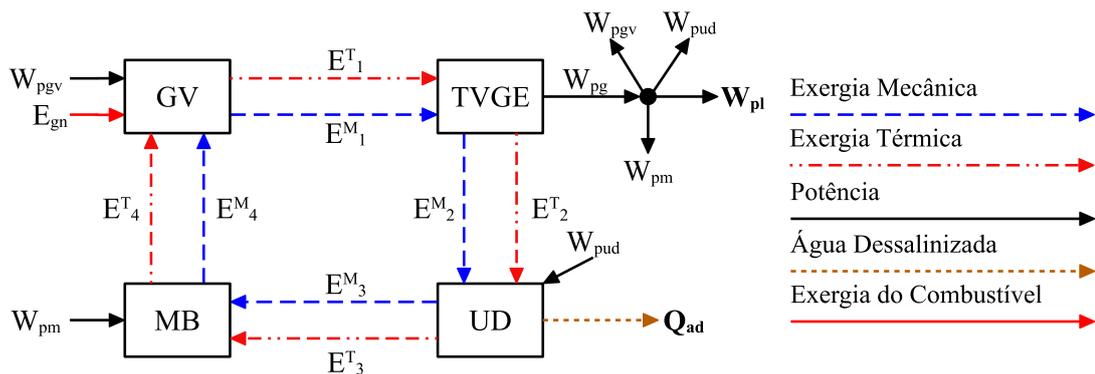
Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
GV	$E_{gn} + W_{pgv}$ $+ (E_1^M - E_4^M)$	$E_{gn} + W_{pgv}$ $+ E_{1:4}^M$	$(E_1^T - E_4^T)$	$E_{1:4}^T$
TVGE	$(E_1^T - E_2^T)$ $+ (E_1^M - E_2^M)$	$E_{1:2}^T + E_{1:2}^M$	W_{pg}	W_{pg}
UD	W_{pud} $+ (E_2^T - E_3^T)$ $+ (E_2^M - E_3^M)$	W_{pud} $+ E_{2:3}^T$ $+ E_{2:3}^M$	Q_{ad}	Q_{ad}
MB	W_{pm}	W_{pm}	$(E_4^T - E_3^T)$ $+ (E_4^M - E_3^M)$	$E_{4:3}^T + E_{4:3}^M$

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.2.1 Diagrama Físico

A Fig. 33 mostra o diagrama físico da planta dual para a produção de energia elétrica e água dessalinizada aplicado ao Modelo $E^T E^M$, sendo os subsistemas definidos e representados conforme a estrutura produtiva Tab. 17.

Figura 33 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo $E^T E^M$.



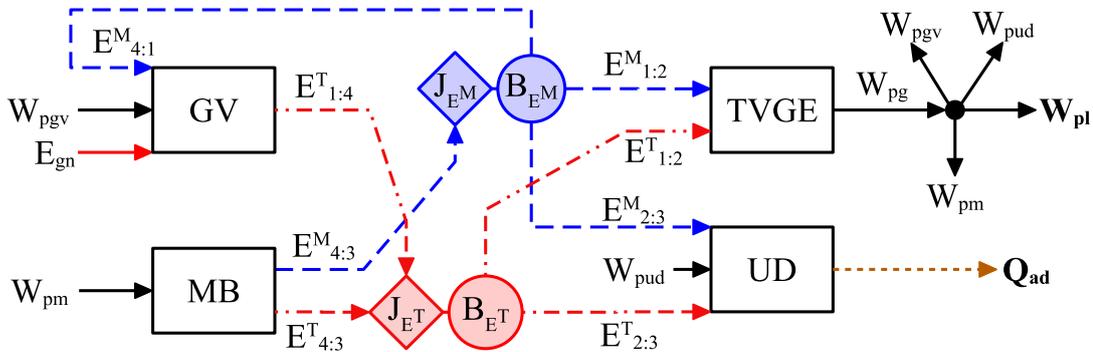
Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a estrutura produtiva e o diagrama físico, elaborá-se as equações de balanço de custo exergético para cada subsistema, conforme as Eqs. (4) e (25). As equações auxiliares baseiam-se no princípio do insumo e produto. O princípio do insumo atribui o mesmo custo para os fluxos de exergia mecânica (E_1^M , E_2^M , E_3^M e E_4^M), para os fluxos de exergia térmica (E_1^T , E_2^T e E_3^T), enquanto o princípio do produto atribui o mesmo custo unitário para os fluxos de energia (W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}), além dos fluxos de saída do subsistema motor e bomba ($E_{4:3}^T$ e $E_{4:3}^M$).

5.2.2.2 Diagrama Produtivo

A Fig. 34 representa o diagrama produtivo, o qual demonstra o processo de formação de custo sem a necessidade de apresentar a estrutura produtiva.

Figura 34 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo $E^T E^M$.



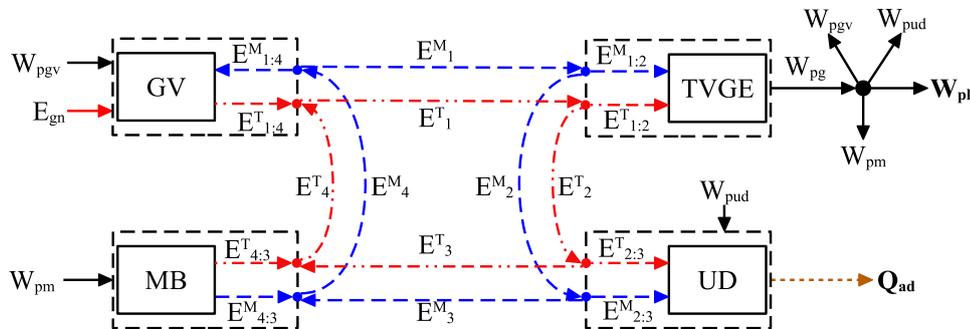
Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo termoeconômico para a alocação de custo exergético é obtido pela formulação de balanço de custo em cada unidade produtiva e equipamentos fictícios utilizando as Eqs. (4) e (25). As equações auxiliares são obtidas quando os fluxos produtivos que saem da mesma unidade produtiva ou unidade fictícia apresentam o mesmo custo unitário. Assim, é atribuído o mesmo custo unitário na saída da bifurcação da exergia térmica ($E_{1:2}^T$ e $E_{2:3}^T$), bifurcação da exergia mecânica ($E_{1:2}^M$, $E_{2:3}^M$ e $E_{4:1}^M$), na saída da unidade MB ($E_{4:3}^M$ e $E_{4:3}^T$) e por fim, na saída da unidade TVGE (W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}).

5.2.2.3 Diagrama Abrangente

O diagrama abrangente foi elaborado com base na estrutura produtiva (Tab. 17), sendo diagrama representado na Fig. 35.

Figura 35 – Diagrama abrangente da planta dual para o Modelo $E^T E^M$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Novamente, o diagrama abrangente mostra de forma clara e gráfica o produto e insumo dos subsistemas, além de cada subsistema atuar tanto como uma unidade produtiva (linha contínua) quanto como um componente (linha tracejada), combinando a característica do diagrama físico,

o qual os subsistemas são interconectados usando os mesmos fluxos de exergia física apresentada no fluxograma, enquanto do diagrama produtivo apresenta o produto e os insumos de cada subsistema no diagrama.

O modelo matemático de alocação de custos exergeticos é obtido pela formulação de balanço de custo em cada unidade abrangente, conforme as Eqs. (4) e (25). Porém, cada subsistema permite formular duas equações de custo, uma como unidade produtiva e outra como componente. A partir da Fig. 35 é elaborado as equações para os componentes nas Eqs. (45) a (48), unidades produtivas nas Eqs. (49) a (52) e nós nas Eqs. (53) a (60). A saber que é necessário apenas a combinação das equações dos componentes e nós ou unidade produtiva e nós.

- **Componente:**

$$\text{GV: } -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} + k_1^M E_1^M - k_4^M E_4^M + k_4^T E_4^T - k_4^T E_4^T = 0 \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \text{TVGE: } & + k_{pgv} W_{pgv} + k_{pud} W_{pud} + k_{pm} W_{pm} + k_{pl} W_{pl} \\ & - k_1^M E_1^M + k_2^M E_2^M - k_1^T E_1^T + k_2^T E_2^T = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

$$\text{UD: } -k_{pud} W_{pud} + k_{ad} Q_{ad} - k_2^T E_2^T + k_3^T E_3^T - k_2^M E_2^M + k_3^M E_3^M = 0 \quad (47)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} - k_3^T E_3^T + k_4^T E_4^T - k_3^M E_3^M + k_4^M E_4^M = 0 \quad (48)$$

- **Unidade Produtiva:**

$$\text{GV: } -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} - k_{1:4}^M E_{1:4}^M + k_{1:4}^T E_{1:4}^T = 0 \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \text{TVGE: } & -k_{1:2}^M E_{1:2}^M - k_{1:2}^T E_{1:2}^T + k_{pgv} W_{pgv} + k_{pud} W_{pud} \\ & + k_{pm} W_{pm} + k_{pl} W_{pl} = 0 \end{aligned} \quad (50)$$

$$\text{UD: } -k_{2:3}^M E_{2:3}^M - k_{2:3}^T E_{2:3}^T - k_{pud} W_{pud} + k_{ad} Q_{ad} = 0 \quad (51)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} + k_{4:3}^M E_{4:3}^M + k_{4:3}^T E_{4:3}^T = 0 \quad (52)$$

- **Nó da Exergia Térmica:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^T E_4^T + k_1^T E_1^T - k_{1:4}^T E_{1:4}^T = 0 \quad (53)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^T E_1^T + k_2^T E_2^T + k_{1:2}^T E_{1:2}^T = 0 \quad (54)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^T E_2^T + k_3^T E_3^T + k_{2:3}^T E_{2:3}^T = 0 \quad (55)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^T E_3^T + k_4^T E_4^T - k_{4:3}^T E_{4:3}^T = 0 \quad (56)$$

- **Nó da Exergia Mecânica:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^M E_4^M + k_1^M E_1^M + k_{1:4}^M E_{1:4}^M = 0 \quad (57)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^M E_1^M + k_2^M E_2^M + k_{1:2}^M E_{1:2}^M = 0 \quad (58)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^M E_2^M + k_3^M E_3^M + k_{2:3}^M E_{2:3}^M = 0 \quad (59)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^M E_3^M + k_4^M E_4^M - k_{4:3}^M E_{4:3}^M = 0 \quad (60)$$

A próxima etapa é a aplicação das regras de obtenção das equações auxiliares para completar o sistema de equações. Dessa forma, cada subsistema é analisado, obtendo as Eqs. (61) a (71).

• **Gerador de Vapor (GV):**

– *Fluxo Externo Sem Informação:*

$$k_{gn} = 1 \quad (61)$$

– *Regra do Insumo:*

$$k_1^M - k_4^M = 0 \quad (62)$$

• **Turbina e Gerador (TVGE):**

– *Regra do Insumo:*

$$k_1^T - k_2^T = 0 \quad (63)$$

$$k_1^M - k_2^M = 0 \quad (64)$$

– *Regra do Produto:*

$$k_{pg} - k_{pgv} = 0 \quad (65)$$

$$k_{pg} - k_{pud} = 0 \quad (66)$$

$$k_{pg} - k_{pm} = 0 \quad (67)$$

$$k_{pg} - k_{pl} = 0 \quad (68)$$

• **Unidade de Dessalinização (UD):**

– *Regra do Insumo:*

$$k_2^T - k_3^T = 0 \quad (69)$$

$$k_2^M - k_3^M = 0 \quad (70)$$

• **Motor e Bomba (MB):**

– *Regra do Produto:*

$$k_{4:3}^T - k_{4:3}^M = 0 \quad (71)$$

A Tab. 18 mostra o valor dos custos exeréticos unitários de cada fluxo do diagrama físico (DF), diagrama produtivo (DP) e o diagrama abrangente (DAB). Os valores obtidos de custo unitários pelo Modelo E^TE^M não apresentaram grandes diferenças em relação ao Modelo E. Também se observa que a parcela mecânica possui baixos valores de exergia, elevando assim o custo unitário.

Tabela 18 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo E^TE^M da Planta Dual.

Fluxo	Valor (kW)	k (kW/kW)		
		DF	DP	DAB
E_1^T	3.402,77	3,142		3,142
E_2^T	1.898,73	3,142		3,142
E_3^T	25,74	3,142		3,142
E_4^T	26,42	3,253		3,253
E_1^M	7,68	7,484		7,484
E_2^M	0,32	7,484		7,484
E_3^M	$1,1601 \cdot 10^{-5}$	7,484		7,484
E_4^M	8,00	7,484		7,484
$E_{1:2}^T$	1.504,04		3,142	3,142
$E_{2:3}^T$	1.872,98		3,142	3,142
$E_{4:3}^T$	0,67	7,484	7,484	7,484
$E_{1:4}^T$	3.376,35		3,141	3,141
$E_{1:2}^M$	7,36		7,484	7,484
$E_{2:3}^M$	0,32		7,484	7,484
$E_{4:3}^M$	8,00	7,484	7,484	7,484
$E_{4:1}^M$	0,32		7,484	7,484
E_{gn}	10.480,31	1,000	1,000	1,000
Q_{ad}	*100,00	**67,959	**67,959	**67,959
W_{pg}	1.052,91	4,541	4,541	4,541
W_{pgv}	27,21	4,541	4,541	4,541
W_{pl}	811,40	4,541	4,541	4,541
W_{pud}	200,00	4,541	4,541	4,541
W_{mp}	14,30	4,541	4,541	4,541

Nota: * (m^3/h); ** (kWh/m^3)

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.3 Modelo H&S

O Modelo H&S desagrega a exergia física nas parcelas entálpica (H) e entrópica (S), além da exergia química. Para a planta em estudo não há variação de exergia química, logo é uma parcela da exergia que não será considerada. Na Tab. 19 mostra as magnitudes termodinâmicas específicas dessas parcelas.

Diferentemente do Modelo E e E^TE^M, o Modelo H&S para definir insumo e produto necessita observar o sinal negativa da parcela entrópica. A entalpia apresenta uma contribuição positiva, o qual adota os mesmos critérios do Modelo E. Em virtude do sinal negativo, a entropia é o inverso da entalpia, ou seja, se a variação de entropia específica for positiva, então é classificado como insumo, e o produto quando a variação for negativa. Os fluxos de energia que entram no subsistema são classificados como insumo e aqueles que saem do subsistema são produtos. A

Tabela 19 – Valores da entalpia específica (h) e entropia específica (s) dos fluxos materiais.

Fluxo	Magnitude Específica (kJ/kg)	
	h	s
1	2.975,9	1.908,1
2	2.635,0	2.040,5
3	147,2	139,1
4	151,4	140,6

Fonte: Produzido pelo autor.

análise de cada subsistema é realizada abaixo:

• **Gerador de Vapor (GV):**

- $(h_1 - h_4)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $H_{1:4}$.
- $(s_1 - s_4)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{1:4}$.
- E_{gn} e W_{pgv} fornecem recursos a GV, então são classificados como insumo.

• **Turbina e Gerador (TVGE):**

- $(h_2 - h_1)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $H_{1:2}$.
- $(s_2 - s_1)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{2:1}$.
- W_{pg} e todas potências são produzidas por TVGE, logo são produtos.

• **Unidade de Dessalinização (UD):**

- $(h_3 - h_2)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $H_{2:3}$.
- $(s_3 - s_2)$ é negativo, logo é produto com fluxo produtivo $S_{2:3}$.
- W_{pud} entra no subsistema, então é insumo.

• **Motor e Bomba (MB):**

- $(h_4 - h_3)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $H_{4:3}$.
- $(s_4 - s_3)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{4:3}$.
- W_{pm} fornece recurso, então é insumo.

Uma vez definido o insumo e produto de cada subsistema, a estrutura produtiva é elaborada, conforme a Tab. 20.

Tabela 20 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo H&S.

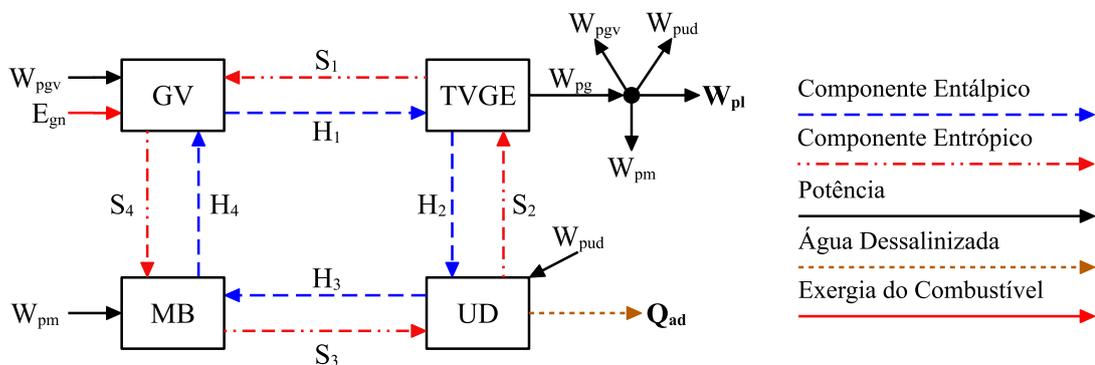
Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
GV	$E_{gn} + W_{pgv} + (S_1 - S_4)$	$E_{gn} + W_{pgv} + S_{1:4}$	$(H_1 - H_4)$	$H_{1:4}$
TVGE	$(H_1 - H_2) + (S_2 - S_1)$	$H_{1:2} + S_{2:1}$	$W_{pgv} + W_{pud} + W_{pm} + W_{pl}$	$W_{pgv} + W_{pud} + W_{pm} + W_{pl}$
UD	$W_{pud} + (H_2 - H_3) - (S_2 - S_3) = E_{UD}$	$W_{pud} + H_{2:3} - S_{2:3} = E_{UD}$	Q_{ad}	Q_{ad}
MB	$W_{pm} + (S_4 - S_3)$	$W_{pm} + S_{4:3}$	$(H_4 - H_3)$	$H_{4:3}$

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.3.1 Diagrama Físico

A Fig. 36 mostra o diagrama físico da planta dual para a produção de energia elétrica e água dessalinizada. Os subsistemas são definidos e representados conforme a estrutura produtiva Tab. 20.

Figura 36 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo H&S.



Fonte: Elaborada pelo autor.

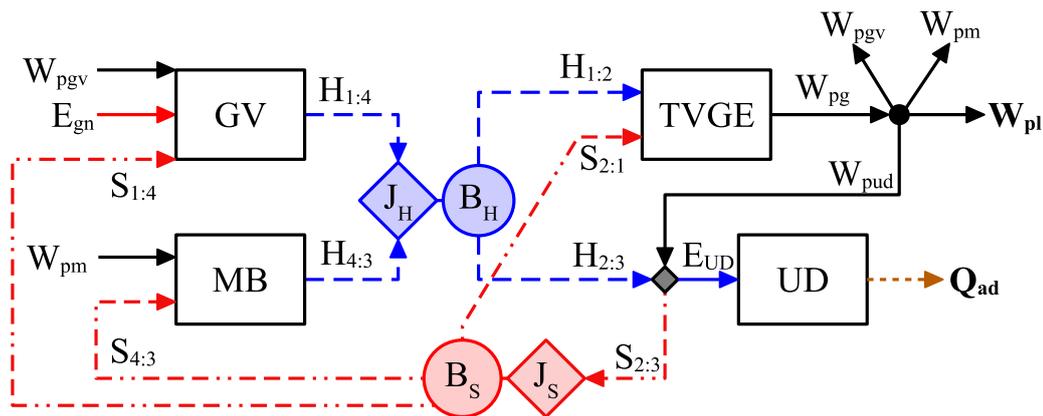
Aplicando as Eqs. (4) e (25) no diagrama físico obtêm-se as equações de balanço de custo exergético para cada subsistema. As equações auxiliares baseiam-se no princípio do insumo e produto. O princípio do insumo atribui o mesmo custo para os fluxos de entalpia (H_1, H_2 e H_3), para os fluxos de entropia (S_1, S_2, S_3 e S_4), enquanto o princípio do produto atribui o mesmo custo unitário para os fluxos de potência ($W_{pgv}, W_{pud}, W_{pm}, W_{gp}$ e W_{pl}) e os fluxos $S_{2:3}$ e E_{UD} .

A estrutura produtiva no auxílio da elaboração das equações auxiliares é extremamente importante no caso do Modelo H&S aplicado no diagrama físico, pois, somente pelo diagrama não é possível identificar os fluxos produtivos. Por exemplo, na unidade dessalinizadora (UD) foi necessária a adição de uma equação para relacionar os custos dos fluxos de entropia físicos (S_2 e S_3) e produtivo ($S_{2:3}$). Ao visualizar o diagrama abrangente (Fig. 38), essa relação fica mais clara.

5.2.3.2 Diagrama Produtivo

A Fig. 37 representa o diagrama produtivo para a planta, o qual já demonstra o processo de formação de custo sem a necessidade de apresentar a estrutura produtiva. Cada retângulo é um subsistema, os losangos e círculos são os equipamentos fictícios chamados, junção (J) e bifurcação (B). Para cada unidade produtiva há setas de entrada e saída que representam insumo e produto.

Figura 37 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo H&S.



Fonte: Elaborada pelo autor.

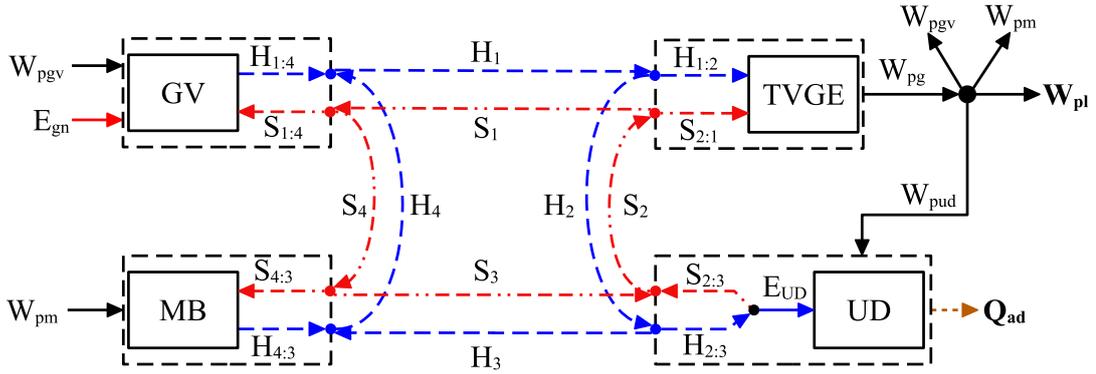
A alocação de custo exergético é obtido pela aplicação de balanço de custo em cada unidade produtiva e equipamentos fictícios utilizando as Eqs. (4) e (25). As equações auxiliares são obtidas quando os fluxos produtivos que saem da mesma unidade produtiva, apresentam o mesmo custo unitário. Assim, é atribuído o mesmo custo unitário na saída da bifurcação da entalpia ($H_{1:2}$ e $H_{2:3}$), bifurcação da entropia ($S_{2:1}$, $S_{1:4}$ e $S_{4:3}$), na saída da unidade TVGE (W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}) e também na junção anterior a unidade UD ($S_{2:3}$ e E_{UD}).

5.2.3.3 Diagrama Abrangente

O Modelo H&S aplicado no diagrama abrangente é mostrado na Fig. 38, baseado na estrutura produtiva (Tab. 20).

Os subsistemas dos diagrama abrangente permitem formular duas equações de balanço de custo, uma vez que atuam tanto como unidade produtiva quanto componente. Aplicando as Eqs. (4) e (25) na Fig. 38 obtêm as equações para os componentes nas Eqs. (72) a (76), unidades produtivas nas Eqs. (77) a (81) e nós nas Eqs. (82) a (89).

Figura 38 – Diagrama abrangente da planta dual utilizando o Modelo H&S.



Fonte: Elaborada pelo autor.

• Componente:

$$\text{GV: } -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} + k_1^H H_1 - k_4^H H_4 + k_4^S S_4 - k_1^S S_1 = 0 \quad (72)$$

$$\begin{aligned} \text{TVGE: } &+ k_{pgv} W_{pgv} + k_{pud} W_{pud} + k_{pm} W_{pm} + k_{pl} W_{pl} \\ &+ k_2^H H_2 - k_1^H H_1 + k_1^S S_1 - k_2^S S_2 = 0 \end{aligned} \quad (73)$$

$$\text{UD: } -k_{UD} E_{UD} + k_{ad} Q_{ad} = 0 \quad (74)$$

$$\text{Nó UD: } -k_{pud} W_{pud} + k_3^H H_3 - k_2^H H_2 + k_2^S S_2 - k_3^S S_3 + k_{UD} E_{UD} = 0 \quad (75)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} + k_4^H H_4 - k_3^H H_3 + k_3^S S_3 - k_4^S S_4 = 0 \quad (76)$$

• Unidade Produtiva:

$$\text{GV: } -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} + k_{1:4}^H H_{1:4} - k_{1:4}^S S_{1:4} = 0 \quad (77)$$

$$\text{TVGE: } -k_{1:2}^H H_{1:2} - k_{1:2}^S S_{1:2} + k_{pgv} W_{pgv} + k_{pud} W_{pud} + k_{pm} W_{pm} + k_{pl} W_{pl} = 0 \quad (78)$$

$$\text{UD: } -k_{UD} E_{UD} + k_{ad} Q_{ad} = 0 \quad (79)$$

$$\text{Nó UD: } -k_{2:3}^H H_{2:3} + k_{2:3}^S S_{2:3} - k_{pud} W_{pud} + k_{UD} E_{UD} = 0 \quad (80)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} + k_{4:3}^H H_{4:3} - k_{4:3}^S S_{4:3} = 0 \quad (81)$$

• Nó da parcela Entálpica:

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^H H_4 + k_1^H H_1 - k_{1:4}^H H_{1:4} = 0 \quad (82)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^H H_1 + k_2^H H_2 + k_{1:2}^H H_{1:2} = 0 \quad (83)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^H H_2 + k_3^H H_3 + k_{2:3}^H H_{2:3} = 0 \quad (84)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^H H_3 + k_4^H H_4 - k_{4:3}^H H_{4:3} = 0 \quad (85)$$

- **Nó da parcela Entrópica:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_1^S S_1 + k_4^S S_4 + k_{1:4}^S S_{1:4} = 0 \quad (86)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_2^S S_2 + k_1^S S_1 + k_{1:2}^S S_{1:2} = 0 \quad (87)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_3^S S_3 + k_2^S S_2 - k_{2:3}^S S_{2:3} = 0 \quad (88)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_4^S S_4 + k_3^S S_3 + k_{4:3}^S S_{4:3} = 0 \quad (89)$$

A próxima etapa é a aplicação das regras de obtenção das equações auxiliares para completar o sistema de equações. Dessa forma, cada subsistema é analisado, obtendo as Eqs. (90) a (100).

- **Gerador de Vapor (GV):**

- Fluxo Externo Sem Informação:

$$k_{gn} = 1 \quad (90)$$

- Regra do Insumo:

$$k_4^S - k_1^S = 0 \quad (91)$$

- **Turbina e Gerador (TVGE):**

- Regra do Insumo:

$$k_1^H - k_2^H = 0 \quad (92)$$

$$k_2^S - k_1^S = 0 \quad (93)$$

- Regra do Produto:

$$k_{pg} - k_{pgv} = 0 \quad (94)$$

$$k_{pg} - k_{pud} = 0 \quad (95)$$

$$k_{pg} - k_{pm} = 0 \quad (96)$$

$$k_{pg} - k_{pl} = 0 \quad (97)$$

- **Unidade de Dessalinização (UD):**

- Regra do Insumo:

$$k_2^H - k_3^H = 0 \quad (98)$$

- Regra do Produto:

$$k_{2:3}^S - k_{UD} = 0 \quad (99)$$

- **Motor e Bomba (MB):**

- Regra do Insumo:

$$k_3^S - k_4^S = 0 \quad (100)$$

A Tab. 21 mostra o valor dos custos exergéticos unitários de cada fluxo do diagrama físico (DF), diagrama produtivo (DP) e o diagrama abrangente (DAB). O Modelo H&S apresentou custos unitários próximos dos Modelos E e E^TE^M. Nota-se uma redução em torno de 1,2% no custo unitário da água doce e aumento de 2,2% para o custo unitário da potência, quando comparado o Modelo H&S com o Modelo E.

Tabela 21 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo H&S da Planta Dual.

Fluxo	Valor (kW)	k (kW/kW)		
		DF	DP	DAB
H_1	9.504,96	3,211		3,211
H_2	8.416,29	3,211		3,211
H_3	470,05	3,211		3,211
H_4	483,42	3,290		3,290
S_1	6.094,51	3,246		3,246
S_2	6.517,25	3,246		3,246
S_3	444,30	3,246		3,246
S_4	449,00	3,246		3,246
$H_{1:2}$	1.088,66		3,211	3,211
$H_{2:3}$	7.946,25		3,211	3,211
$H_{4:3}$	13,37		6,083	6,083
$H_{1:4}$	9.021,53		3,207	3,207
$S_{2:1}$	422,74		3,246	3,246
$S_{2:3}$	6.072,95	3,246	3,246	3,246
$S_{4:3}$	4,70		3,246	3,246
$S_{1:4}$	5.645,51		3,246	3,246
E_{gn}	10.480,31	1,000	1,000	1,000
Q_{ad}	*100,00	**67,291	**67,291	**67,291
W_{pg}	1.052,91	4,623	4,623	4,623
W_{pgv}	27,21	4,623	4,623	4,623
W_{pl}	811,40	4,623	4,623	4,623
W_{pud}	200,00	4,623	4,623	4,623
W_{pm}	14,30	4,623	4,623	4,623
E_{UD}	2.073,30	3,246	3,246	3,246

Nota: *(m^3/h); **(kWh/m^3)

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.4 Modelo UFS

O Modelo UFS é uma extensão do Modelo H&S, o qual desagrega a exergia física nas parcelas de energia interna (U), trabalho de fluxo (F) e entrópica (S). Na Tab. 22 mostra as magnitudes termodinâmicas específicas dessas parcelas.

Por se considerado uma extensão do Modelo H&S, o Modelo UFS apresenta as mesmas condições para definir insumo e produto. Neste modelo, as parcelas da energia interna e do trabalho de fluxo seguem os critérios da entalpia. A análise de cada subsistema é realizada abaixo.

Tabela 22 – Valores de energia interna específica (u), trabalho de fluxo específica (f) e entropia específica (s) dos fluxos materiais.

Fluxo	Magnitude Específica (kJ/kg)		
	u	f	s
1	2712,2	263,72	1908,1
2	2450,1	184,97	2040,5
3	147,2	$1,448 \cdot 10^{-3}$	139,1
4	148,8	2,542	140,6

Fonte: Produzido pelo autor.

• **Gerador de Vapor (GV):**

- $(u_1 - u_4)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $U_{1:4}$.
- $(f_1 - f_4)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $F_{1:4}$.
- $(s_1 - s_4)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{1:4}$.
- E_{gn} e W_{pgv} fornecem recursos a GV, então são classificados como insumo.

• **Turbina e Gerador (TVGE):**

- $(u_2 - u_1)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $U_{1:2}$.
- $(f_2 - f_1)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $F_{1:2}$.
- $(s_2 - s_1)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{2:1}$.
- W_{pg} e todas potências são produzidas por TVGE, logo são produtos.

• **Unidade de Dessalinização (UD):**

- $(u_3 - u_2)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $U_{2:3}$.
- $(f_3 - f_2)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $F_{2:3}$.
- $(s_3 - s_2)$ é negativo, logo é produto com fluxo produtivo $S_{2:3}$.
- W_{pud} entra no subsistema, então é insumo.

• **Motor e Bomba (MB):**

- $(u_4 - u_3)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $U_{4:3}$.
- $(f_4 - f_3)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $F_{4:3}$.
- $(s_4 - s_3)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{4:3}$.
- W_{pm} fornece recurso, então é insumo.

Uma vez definido o insumo e produto de cada subsistema, a estrutura produtiva é elaborada, conforme a Tab. 23.

Tabela 23 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo UFS.

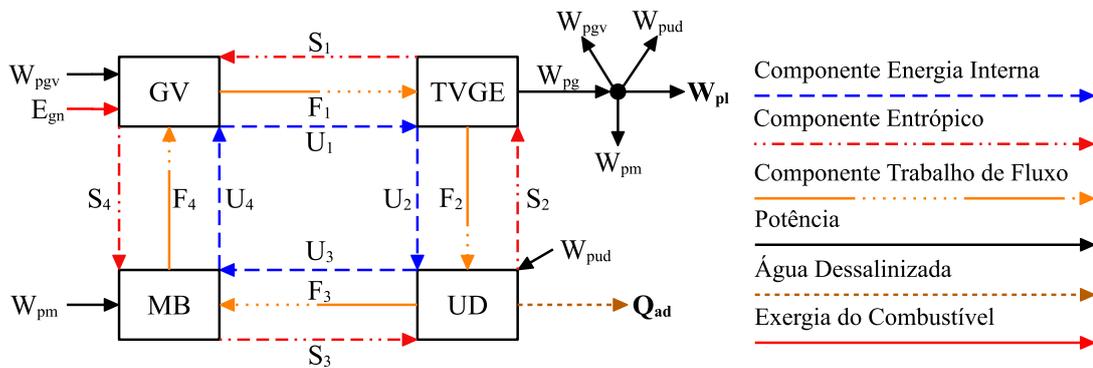
Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
GV	$E_{gn} + W_{pgv}$ $+ (S_1 - S_4)$	$E_{gn} + W_{pgv}$ $+ S_{1:4}$	$(U_1 - U_4)$ $+ (F_1 - F_4)$	$U_{1:4} + F_{1:4}$
TVGE	$(U_1 - U_2)$ $+ (F_1 - F_2)$ $+ (S_2 - S_1)$	$U_{1:2} + F_{1:2}$ $+ S_{2:1}$	$W_{pgv} + W_{pud}$ $+ W_{pm} + W_{pl}$	$W_{pgv} + W_{pud}$ $+ W_{pm} + W_{pl}$
UD	$W_{pud} + (U_2 - U_3)$ $+ (F_2 - F_3)$ $- (S_2 - S_3) = E_{UD}$	$W_{pud} + U_{2:3}$ $+ F_{2:3}$ $- S_{2:3} = E_{UD}$	Q_{ad}	Q_{ad}
MB	$W_{pm} + (S_4 - S_3)$	$W_{pm} + S_{4:3}$	$(U_4 - U_3)$ $+ (F_4 - F_3)$	$U_{4:3} + F_{4:3}$

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.4.1 Diagrama Físico

A Fig. 39 mostra o diagrama físico da planta dual para a produção de energia elétrica e água dessalinizada no Modelo UFS. Os subsistemas são definidos e representados conforme a estrutura produtiva Tab. 23.

Figura 39 – Diagrama físico da planta dual utilizando o Modelo UFS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Aplicando as Eqs. (4) e (25) no diagrama físico obtêm-se as equações de balanço de custo exergético para cada subsistema. As equações auxiliares baseiam-se no princípio do insumo e produto. O princípio do insumo atribui o mesmo custo para os fluxos de energia interna (U_1, U_2 e U_3), para os fluxos de trabalho de fluxo (F_1, F_2 e F_3), para os fluxos de entropia (S_1, S_2, S_3 e S_4), enquanto o princípio do produto atribui o mesmo custo unitário para os fluxos de potência ($W_{pgv}, W_{pud}, W_{pm}, W_{gp}$ e W_{pl}), do gerador de vapor ($U_{1:4}$ e $F_{1:4}$), do motor e bomba ($U_{4:3}$ e $F_{4:3}$) e dos fluxos $S_{2:3}$ e E_{UD} .

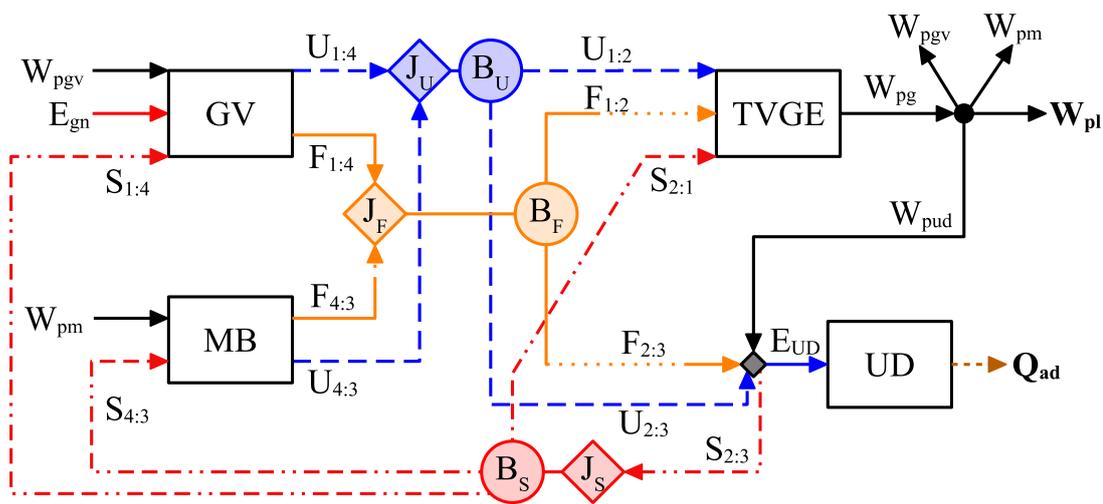
A estrutura produtiva na elaboração das equações auxiliares é extremamente importante

também no Modelo UFS aplicado no diagrama físico, pois, somente pelo diagrama não é possível identificar os fluxos produtivos. Neste caso foi necessária adições de equações para relacionar os custos dos fluxos físicos (S_2 e S_3 ; U_1 e U_4 ; U_3 e U_4 ; F_1 e F_4 ; F_3 e F_4) e produtivos ($S_{2,3}$; $U_{1,4}$; $U_{4,3}$; $F_{1,4}$; $F_{4,3}$). Ao visualizar o diagrama abrangente (Fig. 41), essas relações ficam mais evidentes.

5.2.4.2 Diagrama Produtivo

A Fig. 40 representa Modelo UFS aplicado no diagrama produtivo para a planta dual, o qual já demonstra o processo de formação de custo sem a necessidade de apresentar a estrutura produtiva. Cada retângulo é um subsistema, os losangos e círculos são os equipamentos fictícios chamados, junção (J) e bifurcação (B). Para cada unidade produtiva há setas de entrada e saída que representam insumo e produto.

Figura 40 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo UFS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A alocação de custo exergetico é obtido pela aplicação de balanço de custo em cada unidade produtiva e equipamentos fictícios utilizando as Eqs. (4) e (25). As equações auxiliares são obtidas quando os fluxos produtivos que saem da mesma unidade, isto é, apresentam o mesmo custo unitário. Assim, é atribuído o mesmo custo unitário na saída da bifurcação da energia interna (B_U) ($U_{1,2}$ e $U_{2,3}$), do trabalho de fluxo (B_F) ($F_{1,2}$ e $F_{2,3}$), bifurcação da entropia (B_S) ($S_{2,1}$, $S_{1,4}$ e $S_{4,3}$), na saída da unidade TVGE (W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}), da unidade motor e bomba ($U_{4,3}$ e $F_{4,3}$), na saída da unidade gerador de vapor ($U_{1,4}$ e $F_{1,4}$), e por fim, dos fluxos $S_{2,3}$ e E_{UD} .

5.2.4.3 Diagrama Abrangente

O Modelo UFS aplicado no diagrama abrangente é mostrado na Fig. 41, baseado na estrutura produtiva (Tab. 23).

- **Nó da parcela Energia Interna:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^U U_4 + k_1^U U_1 - k_{1:4}^U U_{1:4} = 0 \quad (111)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^U U_1 + k_2^U U_2 + k_{1:2}^U U_{1:2} = 0 \quad (112)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^U U_2 + k_3^U U_3 + k_{2:3}^U U_{2:3} = 0 \quad (113)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^U U_3 + k_4^U U_4 - k_{4:3}^U U_{4:3} = 0 \quad (114)$$

- **Nó da parcela Trabalho de Fluxo:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^F F_4 + k_1^F F_1 - k_{1:4}^F F_{1:4} = 0 \quad (115)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^F F_1 + k_2^F F_2 + k_{1:2}^F F_{1:2} = 0 \quad (116)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^F F_2 + k_3^F F_3 + k_{2:3}^F F_{2:3} = 0 \quad (117)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^F F_3 + k_4^F F_4 - k_{4:3}^F F_{4:3} = 0 \quad (118)$$

- **Nó da parcela Entrópica:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_1^S S_1 + k_4^S S_4 + k_{1:4}^S S_{1:4} = 0 \quad (119)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_2^S S_2 + k_1^S S_1 + k_{1:2}^S S_{1:2} = 0 \quad (120)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_3^S S_3 + k_2^S S_2 - k_{2:3}^S S_{2:3} = 0 \quad (121)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_4^S S_4 + k_3^S S_3 + k_{4:3}^S S_{4:3} = 0 \quad (122)$$

A próxima etapa é a aplicação das regras de obtenção das equações auxiliares para completar o sistema de equações. Dessa forma, cada subsistema é analisado, obtendo as Eqs. (123) a (137).

- **Gerador de Vapor (GV):**

- Fluxo Externo Sem Informação:

$$k_{gn} = 1 \quad (123)$$

- Regra do Insumo:

$$k_4^S - k_1^S = 0 \quad (124)$$

- Regra do Produto:

$$k_{1:4}^U - k_{1:4}^F = 0 \quad (125)$$

- **Turbina e Gerador (TVGE):**

- Regra do Produto:

$$k_{pg} - k_{pgv} = 0 \quad (126)$$

$$k_{pg} - k_{pud} = 0 \quad (127)$$

$$k_{pg} - k_{pm} = 0 \quad (128)$$

$$k_{pg} - k_{pl} = 0 \quad (129)$$

- Regra do Insumo:

$$k_1^U - k_2^U = 0 \quad (130)$$

$$k_1^F - k_2^F = 0 \quad (131)$$

$$k_2^S - k_1^S = 0 \quad (132)$$

- **Unidade de Dessalinização (UD):**

- Regra do Produto:

$$k_{2:3}^S - k_{UD} = 0 \quad (133)$$

- Regra do Insumo:

$$k_2^U - k_3^U = 0 \quad (134)$$

$$k_2^F - k_3^F = 0 \quad (135)$$

- **Motor e Bomba (MB):**

- Regra do Produto:

$$k_{4:3}^U - k_{4:3}^F = 0 \quad (136)$$

- Regra do Insumo:

$$k_3^S - k_4^S = 0 \quad (137)$$

A Tab. 24 mostra o valor dos custos exergéticos unitários de cada fluxo do diagrama físico (DF), diagrama produtivo (DP) e o diagrama abrangente (DAB). Os dados da tabela mostraram que o Modelo UFS apresentou valores de custo unitários similares aos modelos anteriores, bem como a mesma variação do Modelo H&S em relação ao Modelo E.

Tabela 24 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS da Planta Dual.

Fluxo	Valor (kW)	k (kW/kW)		
		DF	DP	DAB
U_1	8.662,65	3,208		3,208
U_2	7.825,52	3,208		3,208
U_3	470,04	3,208		3,208
U_4	475,30	3,240		3,240
F_1	842,31	3,234		3,234
F_2	590,78	3,234		3,234
F_3	$4,624 \cdot 10^{-3}$	3,234		3,234
F_4	8,12	6,084		6,084
S_1	6.094,51	3,245		3,245
S_2	6.517,25	3,245		3,245
S_3	444,30	3,245		3,245
S_4	449,00	3,245		3,245
$U_{1:2}$	837,13		3,208	3,208
$U_{2:3}$	7.355,47		3,208	3,208
$U_{4:3}$	5,26	6,086	6,086	6,086
$U_{1:4}$	8.187,34	3,206	3,206	3,206
$F_{1:2}$	251,53		3,234	3,234
$F_{2:3}$	590,77		3,234	3,234
$F_{4:3}$	8,11	6,086	6,086	6,086
$F_{1:4}$	834,19	3,206	3,206	3,206
$S_{2:1}$	422,74		3,245	3,245
$S_{2:3}$	6.072,95	3,245	3,245	3,245
$S_{4:3}$	4,70		3,245	3,245
$S_{1:4}$	5.645,51		3,245	3,245
E_{gn}	10.480,31	1,000	1,000	1,000
Q_{ad}	*100,00	**67,270	**67,270	**67,270
W_{pg}	1.052,91	4,626	4,626	4,626
W_{pgv}	27,21	4,626	4,626	4,626
W_{el}	811,40	4,626	4,626	4,626
W_{pud}	200,00	4,626	4,626	4,626
W_{pm}	14,30	4,626	4,626	4,626
E_{UD}	2.073,30	3,245	3,245	3,245

Nota: * (m^3/h); ** (kWh/m^3)

Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.5 Modelo UFS+

O Modelo UFS+ é uma extensão do Modelo H&S, no qual desagrega a exergia física nas parcelas de energia interna (U), trabalho de fluxo da pressão (FP), trabalho de fluxos do volume (FV) e entrópica (S). Na Tab. 25 mostra as magnitudes termodinâmicas específicas dessas

parcelas.

Tabela 25 – Valores da energia interna específica (u), trabalho de fluxo do volume específica (fv), trabalho de fluxo da pressão específica (fp) e entropia específica (s) dos fluxos materiais.

Fluxo	Magnitude Específica (kJ/kg)			
	u	fp	fv	s
1	2.712,2	253,1	10,59	1.908,1
2	2.450,1	91,31	93,66	2.040,5
3	147,2	$5,086 \cdot 10^{-6}$	$1,443 \cdot 10^{-3}$	139,1
4	148,8	2,541	$1,355 \cdot 10^{-3}$	140,6

Fonte: Produzido pelo autor.

O Modelo UFS apresenta as mesmas condições para definir insumo e produto do Modelo H&S. Neste modelo, as parcelas da energia interna, trabalho de fluxo da pressão e do volume seguem os critérios da entalpia. A análise de cada subsistema é realizada abaixo.

• **Gerador de Vapor (GV):**

- $(u_1 - u_4)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $U_{1:4}$.
- $(fp_1 - fp_4)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $FP_{1:4}$.
- $(fv_1 - fv_4)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $FV_{1:4}$.
- $(s_1 - s_4)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{1:4}$.
- E_{gn} e W_{pgv} fornecem recursos a GV, então são classificados como insumo.

• **Turbina e Gerador (TVGE):**

- $(u_2 - u_1)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $U_{1:2}$.
- $(fp_2 - fp_1)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $FP_{1:2}$.
- $(fv_2 - fv_1)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $FV_{2:1}$.
- $(s_2 - s_1)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{2:1}$.
- W_{pg} e todas potências são produzidas por TVGE, logo são produtos.

• **Unidade de Dessalinização (UD):**

- $(u_3 - u_2)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $U_{2:3}$.
- $(fp_3 - fp_2)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $FP_{2:3}$.
- $(fv_3 - fv_2)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $FV_{2:3}$.
- $(s_3 - s_2)$ é negativo, logo é produto com fluxo produtivo $S_{2:3}$.
- W_{pud} entra no subsistema, então é insumo.

• **Motor e Bomba (MB):**

- $(u_4 - u_3)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $U_{4:3}$.

- $(fp_4 - fp_3)$ é positivo, logo é produto com fluxo produtivo $FP_{4:3}$.
- $(fv_4 - fv_3)$ é negativo, logo é insumo com fluxo produtivo $FV_{3:4}$.
- $(s_4 - s_3)$ é positivo, logo é insumo com fluxo produtivo $S_{4:3}$.
- W_{pm} fornece recurso, então é insumo.

Uma vez definido o insumo e produto de cada subsistema, a estrutura produtiva é elaborada, conforme a Tab. 26.

Tabela 26 – Estrutura Produtiva da planta dual com base no Modelo UFS+.

Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
GV	$E_{gn} + W_{pgv}$ $+ (S_1 - S_4)$	$E_{gn} + W_{pgv}$ $+ S_{1:4}$	$(U_1 - U_4)$ $+ (FP_1 - FP_4)$ $+ (FV_1 - FV_4)$	$U_{1:4}$ $+ FP_{1:4}$ $+ FV_{1:4}$
TVGE	$(U_1 - U_2)$ $+ (FP_1 - FP_2)$ $+ (S_2 - S_1)$	$U_{1:2}$ $+ FP_{1:2}$ $+ S_{2:1}$	$W_{pgv} + W_{pud}$ $+ W_{pm} + W_{pl}$	$W_{pgv} + W_{pud}$ $+ W_{pm} + W_{pl}$
UD	W_{pud} $+ (U_2 - U_3)$ $+ (FP_2 - FP_3)$ $+ (FV_2 - FV_3)$ $- (S_2 - S_3) = E_{UD}$	W_{pud} $+ U_{2:3}$ $+ FP_{2:3}$ $+ FV_{2:3}$ $- S_{2:3} = E_{UD}$	Q_{ad}	Q_{ad}
MB	W_{pm} $+ (FV_3 - FV_4)$ $+ (S_4 - S_3)$	W_{pm} $+ FV_{3:4}$ $+ S_{4:3}$	$(U_4 - U_3)$ $+ (FP_4 - FP_3)$	$U_{4:3}$ $+ FP_{4:3}$

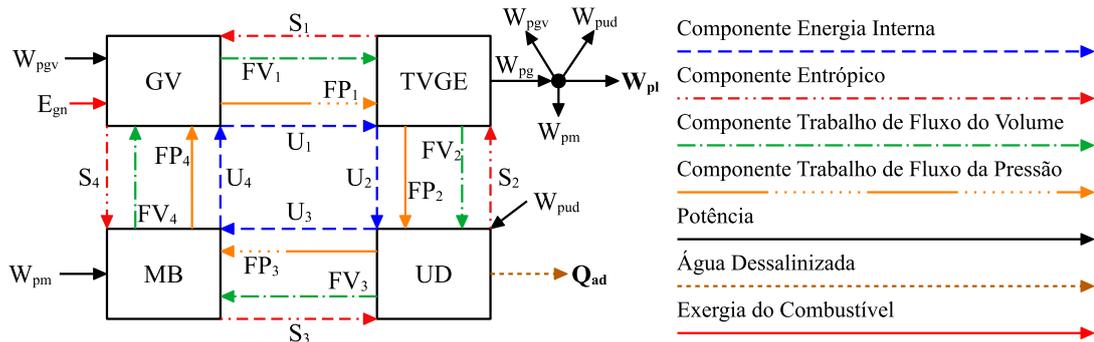
Fonte: Produzido pelo autor.

5.2.5.1 Diagrama Físico

A Fig. 42 mostra o diagrama físico da planta dual para a produção de energia elétrica e água dessalinizada aplicada no Modelo UFS+. Os subsistemas são definidos e representados conforme a estrutura produtiva Tab. 26.

Aplicando as Eqs. (4) e (25) no diagrama físico obtêm-se as equações de balanço de custo exergético para cada subsistema. As equações auxiliares baseiam-se no princípio do insumo e produto. O princípio do insumo atribui o mesmo custo para os fluxos de energia interna (U_1, U_2 e U_3), para os fluxos de trabalho de fluxo da pressão (FP_1, FP_2 e FP_3), para os fluxos de trabalho de fluxo do volume (FV_2, FV_3 e FV_4), para os fluxos de entropia (S_1, S_2, S_3 e S_4), enquanto o princípio do produto atribui o mesmo custo unitário para os fluxos da turbina a vapor ($FV_{2:1}, W_{pgv}, W_{pud}, W_{pm}, W_{gp}$ e W_{pl}), do gerador de vapor ($U_{1:4}, FP_{1:4}$ e $FV_{1:4}$), do motor e bomba ($U_{4:3}$ e $FP_{4:3}$) e dos fluxos $S_{2:3}$ e E_{UD} .

Figura 42 – Diagrama Físico da planta dual utilizando o Modelo UFS+.



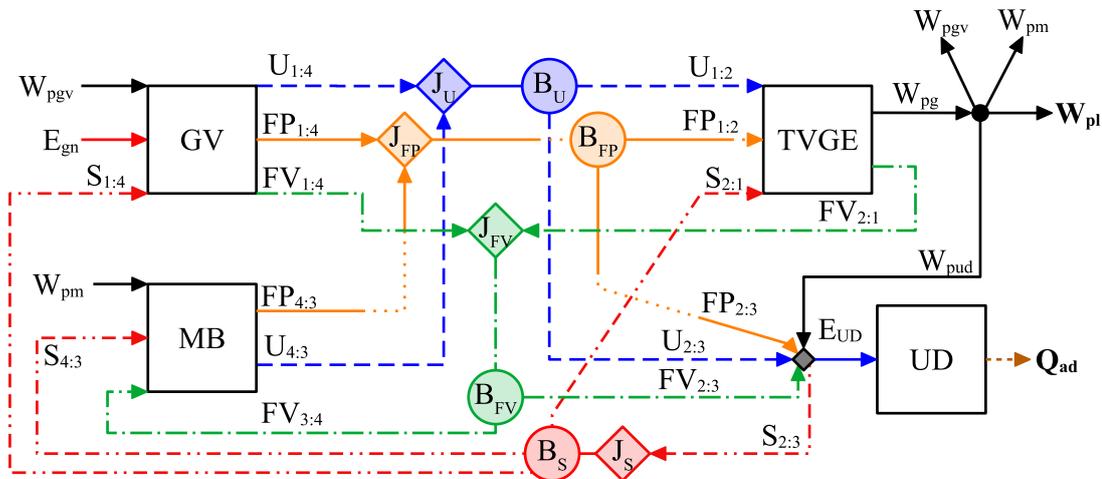
Fonte: Elaborada pelo autor.

A estrutura produtiva na elaboração das equações auxiliares é extremamente importante também no Modelo UFS+ aplicado no diagrama físico, pois, somente pelo diagrama não é possível identificar os fluxos produtivos. Neste caso foi necessária adição de equações para relacionar os custos dos fluxos físicos (S_2 e S_3 ; U_1 e U_4 ; U_3 e U_4 ; FP_1 e FP_4 ; FP_3 e FP_4 ; FV_1 e FP_4 ; FV_1 e FV_2) e produtivos ($S_{2:3}$; $U_{1:4}$; $U_{4:3}$; $FP_{1:4}$; $FP_{4:3}$; $FV_{1:4}$; $FV_{2:1}$). Ao visualizar o diagrama abrangente (Fig. 44), essas relações ficam mais evidentes.

5.2.5.2 Diagrama Produtivo

A Fig. 43 representa Modelo UFS+ aplicado no diagrama produtivo para a planta dual, o qual já demonstra o processo de formação de custo sem a necessidade de apresentar a estrutura produtiva. Cada retângulo é um subsistema, os losangos e círculos são os equipamentos fictícios chamados de junção (J) e bifurcação (B). Para cada unidade produtiva há setas de entrada e saída que representam insumo e produto.

Figura 43 – Diagrama produtivo da planta dual utilizando o Modelo UFS+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

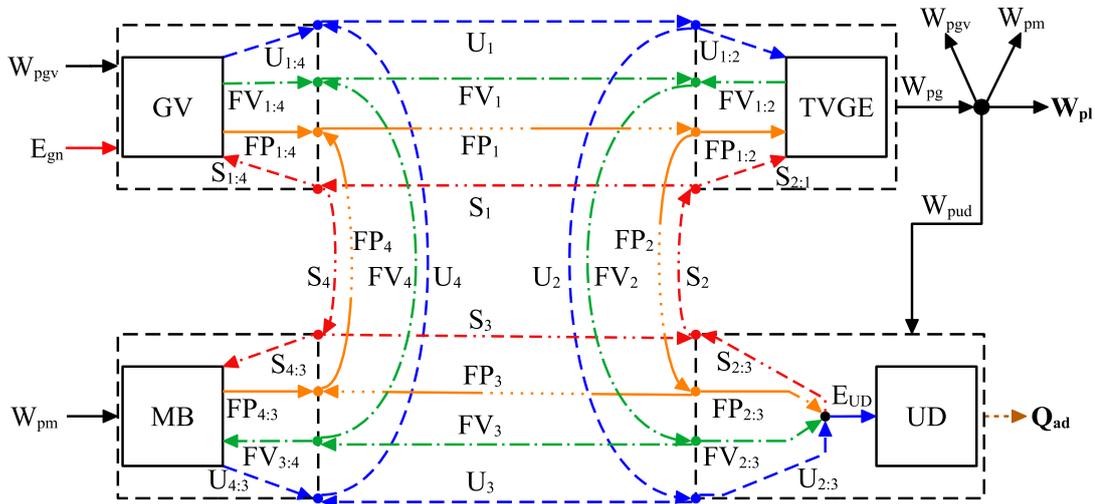
A alocação de custo exérgico é obtido pela aplicação de balanço de custo em cada unidade produtiva e equipamentos fictícios utilizando as Eqs. (4) e (25). As equações auxiliares

são obtidas quando os fluxos produtivos que saem da mesma unidade, isto é, apresentam o mesmo custo unitário. Assim, é atribuído o mesmo custo unitário na saída da bifurcação da energia interna (B_U) ($U_{1:2}$ e $U_{2:3}$), do trabalho de fluxo da pressão (B_{FP}) ($FP_{1:2}$ e $FP_{2:3}$), do trabalho de fluxo do volume (B_{FV}) ($FV_{2:3}$ e $FV_{3:4}$), bifurcação da entropia (B_S) ($S_{2:1}$, $S_{1:4}$ e $S_{4:3}$), na saída da unidade TVGE ($FV_{2:1}$, W_{pgv} , W_{pud} , W_{pm} , W_{gp} e W_{pl}), da unidade motor e bomba ($U_{4:3}$ e $FP_{4:3}$), na saída da unidade gerador de vapor ($U_{1:4}$, $FP_{1:4}$ e $FV_{1:4}$), e por fim nos fluxos $S_{2:3}$ e E_{UD} .

5.2.5.3 Diagrama Abrangente

O Modelo UFS+ aplicado no diagrama abrangente é apresentado na Fig. 44, baseado na estrutura produtiva (Tab. 26)

Figura 44 – Diagrama Abrangente da planta dual utilizando o Modelo UFS+.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os subsistemas do diagrama abrangente permitem formular duas equações de balanço de custo, visto que atuam tanto como unidade produtiva quanto componente. Aplicando as Eqs. (4) e (25) na Fig. 41 obtêm as equações para os componentes nas Eqs. (138) a (142), unidades produtivas nas Eqs. (143) a (147) e nós nas Eqs. (148) a (163).

- **Componente:**

$$\begin{aligned} \text{GV: } & -k_{gn}E_{gn} - k_{pgv}W_{pgv} + k_1^U U_1 - k_4^U U_4 + k_1^{FP} FP_1 - k_4^{FP} FP_4 \\ & + k_1^{FV} FV_1 - k_4^{FV} FV_4 + k_4^S S_4 - k_1^S S_1 = 0 \end{aligned} \quad (138)$$

$$\begin{aligned} \text{TVGE: } & +k_{pgv}W_{pgv} + k_{pud}W_{pud} + k_{pm}W_{pm} + k_{pl}W_{pl} + k_2^U U_2 - k_1^U U_1 \\ & + k_2^{FP} FP_2 - k_1^{FP} FP_1 + k_2^{FV} FV_2 - k_1^{FV} FV_1 + k_1^S S_1 - k_2^S S_2 = 0 \end{aligned} \quad (139)$$

$$\text{UD: } -k_{UD}E_{UD} + k_{ad}Q_{ad} = 0 \quad (140)$$

$$\begin{aligned} \text{Nó UD: } & -k_{pud} W_{pud} + k_{UD} E_{UD} + k_3^U U_3 - k_2^U U_2 + k_3^{FP} FP_3 - k_2^{FP} FP_2 \\ & + k_3^{FV} FV_3 - k_2^{FV} FV_2 + k_2^S S_2 - k_3^S S_3 = 0 \end{aligned} \quad (141)$$

$$\begin{aligned} \text{MB: } & -k_{pm} W_{pm} + k_4^U U_4 - k_3^U U_3 + k_4^{FP} FP_4 - k_3^{FP} FP_3 \\ & + k_4^{FV} FV_4 - k_3^{FV} FV_3 + k_3^S S_3 - k_4^S S_4 = 0 \end{aligned} \quad (142)$$

• **Unidade Produtiva:**

$$\begin{aligned} \text{GV: } & -k_{gn} E_{gn} - k_{pgv} W_{pgv} + k_{1:4}^U U_{1:4} + k_{1:4}^{FP} FP_{1:4} \\ & + k_{1:4}^{FV} FV_{1:4} - k_{1:4}^S S_{1:4} = 0 \end{aligned} \quad (143)$$

$$\begin{aligned} \text{TVGE: } & -k_{1:2}^U U_{1:2} - k_{1:2}^{FP} FP_{1:2} + k_{1:2}^{FV} FV_{1:2} - k_{1:2}^S S_{1:2} + k_{pgv} W_{pgv} \\ & + k_{pud} W_{pud} + k_{pm} W_{pm} + k_{pl} W_{pl} = 0 \end{aligned} \quad (144)$$

$$\text{UD: } -k_{UD} E_{UD} + k_{ad} Q_{ad} = 0 \quad (145)$$

$$\text{Nó UD: } -k_{2:3}^U U_{2:3} - k_{2:3}^{FP} FP_{2:3} - k_{2:3}^{FV} FV_{2:3} + k_{2:3}^S S_{2:3} + k_{UD} E_{UD} = 0 \quad (146)$$

$$\text{MB: } -k_{pm} W_{pm} + k_{4:3}^U U_{4:3} + k_{4:3}^{FP} FP_{4:3} - k_{3:4}^{FV} FV_{3:4} - k_{4:3}^S S_{4:3} = 0 \quad (147)$$

• **Nó da parcela Energia Interna:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^U U_4 + k_1^U U_1 - k_{1:4}^U U_{1:4} = 0 \quad (148)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^U U_1 + k_2^U U_2 + k_{1:2}^U U_{1:2} = 0 \quad (149)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^U U_2 + k_3^U U_3 + k_{2:3}^U U_{2:3} = 0 \quad (150)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^U U_3 + k_4^U U_4 - k_{4:3}^U U_{4:3} = 0 \quad (151)$$

• **Nó da parcela Trabalho de Fluxo da Pressão:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^{FP} FP_4 + k_1^{FP} FP_1 - k_{1:4}^{FP} FP_{1:4} = 0 \quad (152)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^{FP} FP_1 + k_2^{FP} FP_2 + k_{1:2}^{FP} FP_{1:2} = 0 \quad (153)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^{FP} FP_2 + k_3^{FP} FP_3 + k_{2:3}^{FP} FP_{2:3} = 0 \quad (154)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^{FP} FP_3 + k_4^{FP} FP_4 - k_{4:3}^{FP} FP_{4:3} = 0 \quad (155)$$

• **Nó da parcela Trabalho de Fluxo do Volume:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_4^{FV} FV_4 + k_1^{FV} FV_1 - k_{1:4}^{FV} FV_{1:4} = 0 \quad (156)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_1^{FV} FV_1 + k_2^{FV} FV_2 - k_{1:2}^{FV} FV_{1:2} = 0 \quad (157)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_2^{FV} FV_2 + k_3^{FV} FV_3 + k_{2:3}^{FV} FV_{2:3} = 0 \quad (158)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_3^{FV} FV_3 + k_4^{FV} FV_4 + k_{3:4}^{FV} FV_{3:4} = 0 \quad (159)$$

• **Nó da parcela Entrópica:**

$$\text{Nó 1 e 4: } -k_1^S S_1 + k_4^S S_4 + k_{1:4}^S S_{1:4} = 0 \quad (160)$$

$$\text{Nó 1 e 2: } -k_2^S S_2 + k_1^S S_1 + k_{1:2}^S S_{1:2} = 0 \quad (161)$$

$$\text{Nó 2 e 3: } -k_3^S S_3 + k_2^S S_2 - k_{2:3}^S S_{2:3} = 0 \quad (162)$$

$$\text{Nó 3 e 4: } -k_4^S S_4 + k_3^S S_3 + k_{4:3}^S S_{4:3} = 0 \quad (163)$$

A próxima etapa é a aplicação das regras de obtenção das equações auxiliares para completar o sistema de equações. Dessa forma, cada subsistema é analisado, obtendo as Eqs. (164) a (181).

• **Gerador de Vapor (GV):**

– Fluxo Externo Sem Informação:

$$k_{gn} = 1 \quad (164)$$

– Regra do Produto:

$$k_{1:4}^U - k_{1:4}^{FP} = 0 \quad (165)$$

$$k_{1:4}^{FP} - k_{1:4}^{FV} = 0 \quad (166)$$

– Regra do Insumo:

$$k_4^S - k_1^S = 0 \quad (167)$$

• **Turbina e Gerador (TVGE):**

– Regra do Produto:

$$k_{pg} - k_{1:2}^{FV} = 0 \quad (168)$$

$$k_{pg} - k_{pgv} = 0 \quad (169)$$

$$k_{pg} - k_{pud} = 0 \quad (170)$$

$$k_{pg} - k_{pm} = 0 \quad (171)$$

$$k_{pg} - k_{pl} = 0 \quad (172)$$

– Regra do Insumo

$$k_1^U - k_2^U = 0 \quad (173)$$

$$k_1^{FP} - k_2^{FP} = 0 \quad (174)$$

$$k_2^S - k_1^S = 0 \quad (175)$$

• **Unidade de Dessalinização (UD):**

– Regra do Produto

$$k_{2:3}^S - k_{UD} = 0 \quad (176)$$

– Regra do Insumo:

$$k_2^U - k_3^U = 0 \quad (177)$$

$$k_2^{FP} - k_3^{FP} = 0 \quad (178)$$

$$k_2^{FV} - k_3^{FV} = 0 \quad (179)$$

• **Motor e Bomba (MB):**

– Regra do Produto

$$k_{4:3}^U - k_{4:3}^{FP} = 0 \quad (180)$$

– Regra do Insumo

$$k_3^S - k_4^S = 0 \quad (181)$$

$$k_3^{FV} - k_4^{FV} = 0 \quad (182)$$

A Tab. 27 mostra o valor dos custos exergeticos unitários de cada fluxo do diagrama físico (DF), diagrama produtivo (DP) e o diagrama abrangente (DAB). O Modelo UFS+ apresentou resultados parecidos com o Modelo H&S e UFS.

Tabela 27 – Custo Exergético Unitário (k) dos Fluxos para o Modelo UFS+ da Planta Dual.

Fluxo	Valor (kW)	k (kW/kW)		
		DF	DP	DAB
U_1	8.662,65	3,257		3,257
U_2	7.825,52	3,257		3,257
U_3	470,04	3,257		3,257
U_4	475,30	3,286		3,286
FP_1	808,48	3,282		3,282
FP_2	291,63	3,282		3,282
FP_3	$1,6245 \cdot 10^{-5}$	3,282		3,282
FP_4	8,11	5,895		5,895
FV_1	33,83	3,256		3,256
FV_2	299,14	4,290		4,290
FV_3	$4,6075 \cdot 10^{-3}$	4,290		4,290
FV_4	$4,3290 \cdot 10^{-3}$	4,290		4,290
S_1	6.094,51	3,325		3,325
S_2	6.517,25	3,325		3,325
S_3	444,30	3,325		3,325
S_4	449,00	3,325		3,325
$U_{1:2}$	837,13		3,257	3,257
$U_{2:3}$	7.355,47		3,257	3,257
$U_{4:3}$	5,26	5,895	5,895	5,895
$U_{1:4}$	8.187,34	3,255	3,255	3,255
$FP_{1:2}$	516,85		3,282	3,282
$FP_{2:3}$	291,63		3,282	3,282
$FP_{4:3}$	8,11	5,895	5,895	5,895
$FP_{1:4}$	800,37	3,255	3,255	3,255
$FV_{2:1}$	265,32	4,421	4,421	4,421
$FV_{2:3}$	299,14		4,290	4,290
$FV_{3:4}$	$2,7848 \cdot 10^{-4}$		4,290	4,290
$FV_{1:4}$	33,82	3,255	3,255	3,255
$S_{2:1}$	422,74		3,325	3,325
$S_{2:3}$	6072,95	3,325	3,325	3,325
$S_{4:3}$	4,70		3,325	3,325
$S_{1:4}$	5645,51		3,325	3,325
E_{gn}	10.480,31	1,000	1,000	1,000
Q_{ad}	*100,00	**68,928	**68,92	**68,928
W_{pg}	1.052,91	4,421	4,421	4,421
W_{pgv}	27,21	4,421	4,421	4,421
W_{el}	811,40	4,421	4,421	4,421
W_{pud}	200,00	4,421	4,421	4,421
W_{pm}	14,30	4,421	4,421	4,421
E_{UD}	2.073,30	3,325	3,325	3,325

Nota: * (m^3/h); ** (kWh/m^3)

Fonte: Produzido pelo autor.

5.3 Análise Comparativa

A Tab. 28 apresenta os resultados das metodologias termoeconômicas aplicadas (E, E^{TEM}, H&S, UFS e UFS+) nos diagramas físico (DF), produtivo (DP) e abrangente (DAB). Além disso, mostra o número de equações, equações auxiliares e o número de fluxos envolvidos na análise.

Quanto ao número de equações depende do diagrama utilizado, no caso do diagrama físico refere-se a quantidade de componentes, diagrama produtivo a quantidade de unidades produtivas e fictícias, enquanto no diagrama abrangente refere-se ao número de componentes ou unidades produtivas e nós.

Tabela 28 – Resultados do custo exerético unitário dos produtos e da complexidade entre os diagramas e as metodologias termoeconômicas aplicadas a planta dual.

Modelo	Custo Unitário Exerético		Diagrama	Complexidade do Modelo		
	Q_{ad} (kWh/m^3)	W_{pl} (kW/kW)		nº de Equações	Equações Auxiliares	Fluxos
E	68,093	4,524	DF	4	7	11
			DP	5	6	11
			DAB	8	7	15
E ^{TEM}	67,959	4,541	DF	4	13	17
			DP	6	9	15
			DAB	12	11	23
H&S	67,291	4,623	DF	5	12	17
			DP	7	9	16
			DAB	12	11	23
UFS	67,270	4,626	DF	5	20	25
			DP	8	12	20
			DAB	16	16	32
UFS+	68,928	4,421	DF	5	26	31
			DP	9	15	24
			DAB	21	19	40

Nota: Diagrama Físico (DF); Diagrama Produtivo (DP); Diagrama Abrangente (DAB)

Fonte: Produzido pelo autor.

A Tab. 28 mostra que, para este caso, independentemente do diagrama, os custos exeréticos unitários dos produtos foram iguais para o mesmo modelo termoeconômico, assim como para os fluxos internos. Haja vista que a planta selecionada não apresenta resíduo, equipamentos dissipativos, queima suplementar ou outros meios dos quais podem interferir na elaboração do processo de formação de custo.

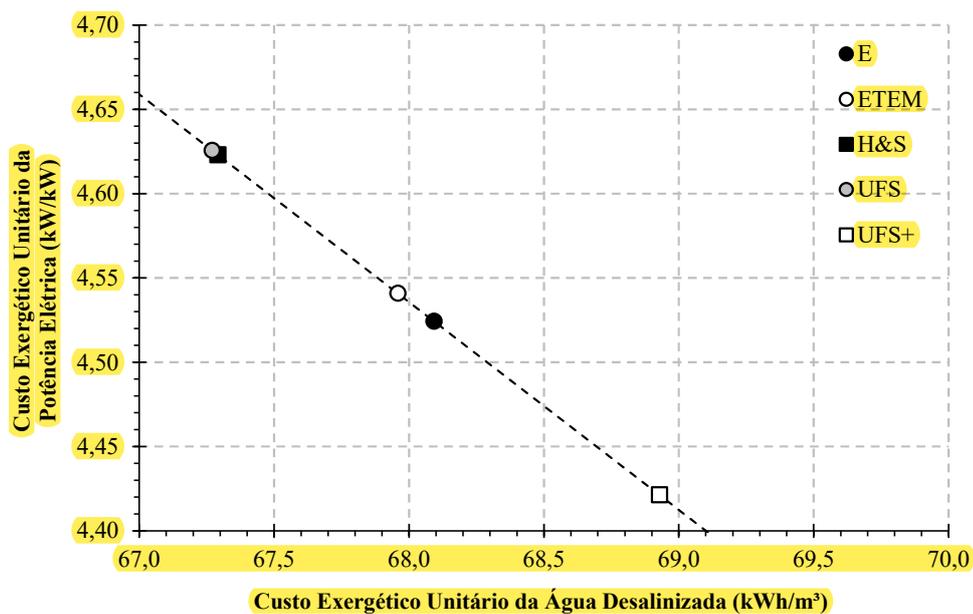
O Modelo UFS+ obteve o maior custo exerético unitário da água doce ($68,928 kWh/m^3$) e o menor valor de custo para a potência elétrica ($4,421 kW/kW$). Na outra extremidade encontra-

se o Modelo UFS com o menor custo unitário da água doce ($67,270 \text{ kWh/m}^3$) e o maior custo da potência elétrica ($4,626 \text{ kW/kW}$). Em porcentagem, o Modelo UFS em relação ao UFS+ reduziu em 2,4% o custo da água doce e aumenta em 4,6% o custo da potência.

É sabido que quanto maior for a desagregação da exergia, melhores e mais precisos são os resultados. Entretanto, há um aumento significativo da quantidade de fluxos e equações a serem elaboradas e analisadas, ou seja, aumento da complexidade da elaboração do processo de formação de custo. Quantificando, há uma redução média de 30% na quantidade de fluxos analisados pelos diagramas convencionais quando se compara com o diagrama abrangente ou um aumento médio de 44% ao analisar pelo diagrama abrangente em relação aos convencionais. Apesar do diagrama abrangente apresentar maior complexidade, este diagrama permite obter tanto os custos dos fluxos físicos quanto dos fluxos produtivos com apenas um único diagrama.

A Fig. 45 representa a reta solução da planta estudada. Esta reta compara os custos exergéticos unitário dos produtos finais, vazão de água doce (Q_{ad}) e potência elétrica (W_{pl}), obtidos por diferentes modelos termoeconômicos e diagramas.

Figura 45 – Reta solução do custo exergético unitário das metodologias aplicadas a planta dual.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 45 mostra visualmente os resultados apresentados na Tab. 28. O Modelo UFS+ sobrecarrega o custo da água doce, enquanto os Modelos H&S e UFS a potência. Apesar do gráfico aparentar uma grande diferença entre os extremos, os custos exergéticos unitários dos produtos apresentam uma variação de no máximo 5%. Esse resultado foi obtido, em virtude da planta não apresentar equipamentos dissipativos, tratamento de resíduo ou outros fatores que poderiam impactar o processo de formação de custo.

A aplicação dos Modelos Termoeconômicos H&S, UFS e UFS+ no diagrama físico expôs a necessidade da definição da estrutura produtiva para identificar a aplicação das regras de

obtenção das equações auxiliares. Visto que alguns componentes apresentavam mais de um produto, sendo indispensável a elaboração de equação extra para relacionar os fluxos físicos com o fluxo produtivo. Em relação à complexidade da aplicação desses modelos no diagrama físico, a Tab. 28 mostra que com o aumento da desagregação da exergia física, também há incremento da quantidade de equações auxiliares, justamente para relacionar os fluxos físicos e produtivos.

As modificações realizadas no diagrama apresentado por Lazzaretto e Macor (1995), a saber, a substituição dos equipamentos fictícios por nós e sua fixação na fronteira do componente, permitiram ao diagrama abrangente mostra claramente os componentes com as interconexões por meio dos fluxos físicos, como também as unidades produtivas com os fluxos produtivos formando os insumos e produtos daquele subsistema. Além disso, estas modificações permitiram uma melhor exibição dos *loops* das magnitudes termodinâmicas, deixando claro como cada magnitude se comporta.

Portanto, o diagrama abrangente demonstrou ser uma alternativa válida em relação aos diagramas convencionais, pois remove os equipamentos fictícios do diagrama produtivo, utiliza dos fluxos físicos presentes no diagrama físicos para realizar as interconexões dos subsistemas e calcula os custos dos fluxos físicos e produtivos. No entanto, há um custo da sua utilização, o aumento da complexidade devido à quantidade de fluxos a serem analisados.

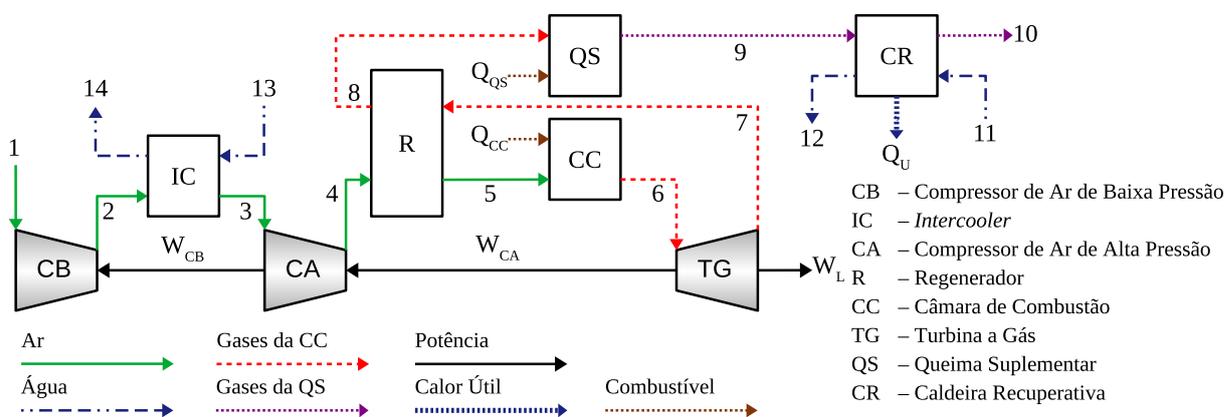
6 ESTUDO DE CASO III: RESÍDUO E DESAGREGAÇÃO LOCALIZADA

Neste capítulo será abordado a arbitrariedade das interconexões, resíduo e desagregação localizada. O sistema selecionado foi utilizado por Barone et al. (2021) e será aplicado no diagrama produtivo e abrangente com os modelos termoeconômicos E e H&S.

6.1 Descrição do Sistema

A Fig. 46 apresenta o sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa, *intercooler* e queima suplementar. O sistema contém oito subsistemas: compressor de ar de baixa pressão (CB), *intercooler* (IC), compressor de alta pressão (CA), regenerador (R), câmara de combustão (CC), turbina a gás (TG), queima suplementar (QS) e caldeira recuperativa (CR).

Figura 46 – Estrutura física do sistema de cogeração com queima suplementar.



Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

A turbina a gás (TG) produz 5.478 kW de potência mecânica, dos quais 1.032 kW é utilizada pelo compressor de ar de baixa pressão (CB), 1.066 kW pelo compressor de ar de alta pressão (CA) e 3.380 kW é referente a potência líquida produzida (W_L). O consumo de exergia na câmara de combustão (Q_{CC}) e queima suplementar (Q_{QS}) são de 5.348 kW e 333,6 kW, respectivamente. O calor útil possui o valor de 566,2 kW, em base exergética, o qual é obtido pela diferença de exergia entre os fluxos 11 (vapor saturado) e 12 (água de alimentação).

Os parâmetros físicos do sistema são apresentados na Tab. 29. As propriedades entalpia (H) e entropia (S) foram calculadas utilizando as Eqs. (183) e (184), respectivamente.

$$H = m (h - h_{ref} + \text{delta}) \quad (183)$$

$$S = m T_0 (s - s_{ref} + \text{delta}) \quad (184)$$

Onde h e s são as entalpias e entropia específicas, e o subscrito ref refere-se ao estado de referência. O termo constante é adicionado nas propriedades específicas para obter valores de propriedades positivas. A constante δ possui valor de 65,5 .

Tabela 29 – Parâmetros dos fluxos físicos do sistema de cogeração com queima suplementar.

Fluxos Físicos		m	T	P	Exergia	Entalpia	Entropia	Exergia
n°	Descrição	(kg/s)	(K)	(bar)	(kW)	(kW)	(kW)	Química (kW)
1	Ar	10,00	298,15	1,013	0,00	655,00	655,00	0,0
2	Ar	10,00	399,57	2,482	916,51	1688,04	771,53	0,0
3	Ar	10,00	308,15	2,433	756,69	757,28	0,59	0,0
4	Ar	10,00	412,79	5,960	1.707,57	1.823,71	116,14	0,0
5	Ar	10,00	915,00	5,811	4.562,03	7.245,82	2.683,79	0,0
6	Gases CC	10,13	1.435,51	5,666	9.512,98	14.004,29	4.491,31	109,9
7	Gases CC	10,13	996,98	1,051	3.901,96	8.525,82	4.623,86	109,9
8	Gases CC	10,13	526,13	1,030	645,34	3.103,71	2.458,38	109,9
9	Gases QS	10,15	586,67	1,010	940,06	3.782,93	2.842,87	124,6
10	Gases QS	10,15	435,37	1,013	260,03	2.126,68	1.866,65	124,6
11	Água	0,62	298,15	10,000	0,56	41,19	40,63	-
12	Vapor Saturado	0,62	453,03	10,000	507,38	1.697,44	1.190,06	-
13	Água	22,27	298,15	1,013	-	104,90	-	-
14	Água	22,27	308,15	1,013	-	146,70	-	-

Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

O modelo termodinâmico utilizado é o de combustão completa, com metano puro (CH_4) como combustível com poder calorífico inferior (PCI) de 50.023 kJ/kg. Os gases de combustão são compostos pelos mesmos elementos presentes no ar atmosférico. Ressalta-se que esta planta possui a câmara de combustão e a queima suplementar, que implica três diferentes fluidos de trabalho no ciclo e, conseqüentemente, três composições químicas distintas. A Tab. 30 mostra a composição química elementar dos fluxos de ar, gases após a câmara de combustão (Gases CC) e gases após a queima suplementar (Gases QS).

Tabela 30 – Composição química elementar de fluxos de ar e gases.

Elemento	Composição (%)		
	Ar	Gases CC	Gases QS
Nitrogênio (N_2)	76,624	74,814	74,652
Oxigênio (O_2)	20,557	15,348	14,881
Dióxido de Carbono (CO_2)	0,029	2,390	2,602
Água (H_2O)	1,877	6,556	6,975
Argônio (Ar)	0,913	0,891	0,890
Massa Molar (kg/kmol)	28,76	28,46	28,43

Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

6.2 Análise Termoeconômica

Para esta análise termoeconômica são utilizados os Modelos E e H&S aplicados no diagrama produtivo e abrangente. No diagrama produtivo há dois tipos de arranjos, com um ou dois pares de junção e bifurcação, de modo a avaliar a arbitrariedade desses equipamentos, além da interferência no processo de formação de custo. Enquanto no diagrama abrangente Modelo E há quatro arranjos, sendo aplicado o tratamento do equipamento dissipativo (*intercooler*) por meio dos fluxos físicos ou aplicação da desagregação localizada, dos quais terá duas formas de tratamento de resíduo cada um. E por fim o Modelo H&S aplicado no diagrama abrangente, que segundo a Fig. 20 é o mais adequado.

Em todas as avaliações, a temperatura e pressão de referência (estado morto) são 25°C ($298,15\text{ K}$) e $1,0132\text{ bar}$, respectivamente.

6.2.1 Diagrama Produtivo

O diagrama produtivo, também conhecido como diagrama funcional, representa graficamente o insumo e o produto de cada unidade presente na estrutura produtiva. Os componentes dos sistemas são representados por retângulos que são unidades reais ou subsistemas, além disso, o losango e os círculos são unidades fictícias denominadas junções (J) e bifurcações (B), respectivamente (SERRA, 1994).

6.2.1.1 Modelo E

Os fluxos produtivos utilizados neste diagrama interligam as unidades produtivas, e esses fluxos podem ser de energias (potência mecânica (W) ou exergia do calor útil (E_U)), ou pela variação da exergia dos fluxos materiais ($E_{i,j}$). Baseado no diagrama físico da Fig. 46 foi elaborada a estrutura produtiva para o Modelo E apresentada na Tab. 31.

Tabela 31 – Estrutura Produtiva do sistema com base no Modelo E.

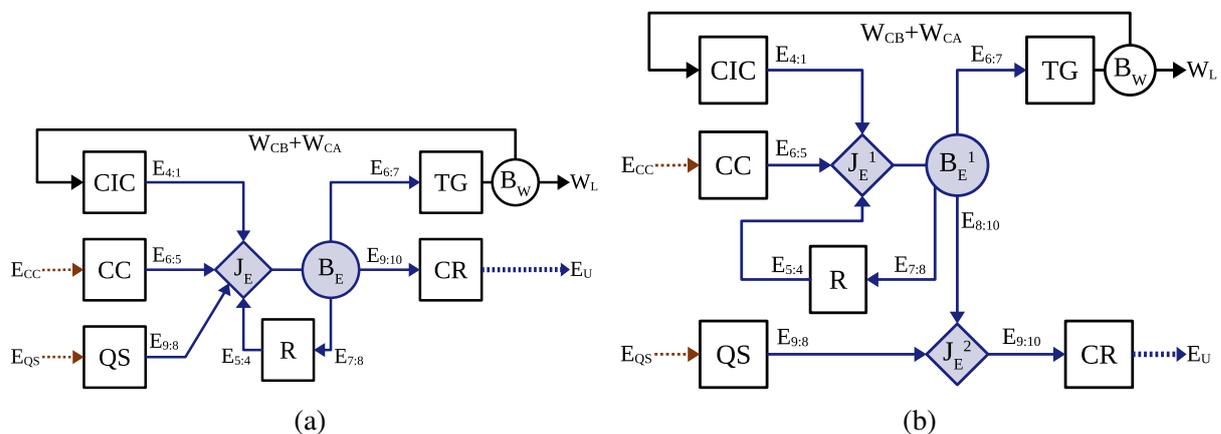
Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
CB	W_{CB}	W_{CB}	$(E_2 - E_1)$	$E_{2:1}$
CA	W_{CA}	W_{CA}	$(E_4 - E_3)$	$E_{4:3}$
CIC	$W_{CB} + W_{CA}$	$W_{CB} + W_{CA}$	$(E_4 - E_1)$	$E_{4:1}$
R	$(E_7 - E_8)$	$E_{7:8}$	$(E_5 - E_4)$	$E_{5:4}$
CC	E_{CC}	E_{CC}	$(E_6 - E_5)$	$E_{6:5}$
TG	$(E_6 - E_5)$	$E_{6:7}$	$W_{CB} + W_{CA}$ $+W_L$	$W_{CB} + W_{CA}$ $+W_L$
QS	E_{QS}	E_{QS}	$(E_9 - E_8)$	$E_{9:8}$
CR	$(E_9 - E_{10})$	$E_{9:10}$	E_U	E_U

Fonte: Produzido pelo autor.

Os diagramas produtivos, apresentados nas Figs. 47 e 48, foram produzidos baseando-se na estrutura produtiva. Os diagramas utilizam os fluxos de exergia total para definir insumo e produto dos subsistemas produtivos. Nesse caso, o *intercooler* é um equipamento dissipativo, em que o Modelo E não consegue definir claramente o seu produto, ou seja, a variação específica da exergia total entre os estados 2 e 3, apresenta valor negativo.

Assim, para este equipamento, a exergia ($E_{2;3}$) é considerada insumo, não sendo possível quantificar ou definir o produto (ou a função) do *intercooler* em termos de exergia total (SANTOS et al., 2009a). Portanto, não pode ser isolado no diagrama produtivo. Como alternativa, o *intercooler* é arbitrariamente unido aos compressores de ar de baixa e alta pressão, formando um subsistema denominado CIC, para definir sua finalidade produtiva.

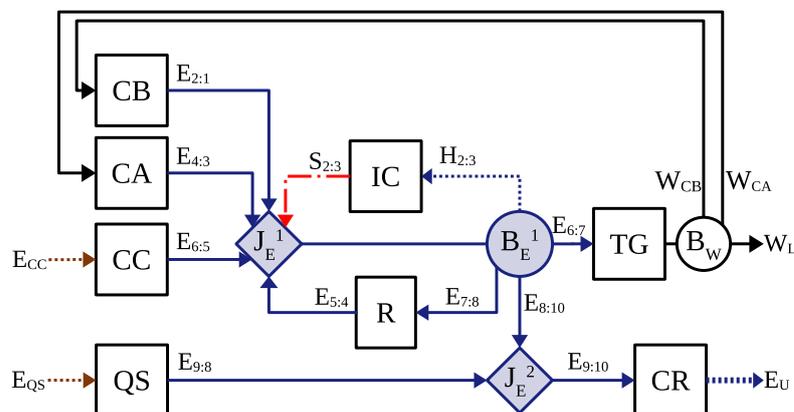
Figura 47 – Diagrama produtivo para o sistema utilizando o Modelo E: (a) Arranjo 1 e (b) Arranjo 2.



Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

Para evitar a perda de informação do processo de formação de custo devido à união de subsistemas, na Fig. 48 é aplicada a desagregação localizada no *intercooler*, permitindo o isolamento dos subsistemas CB, CA e IC.

Figura 48 – Diagrama produtivo para o sistema utilizando o Modelo E com desagregação localizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As unidades fictícias (junções e bifurcações) podem envolver arbitrariedades quando não consideram a interconexão dos subsistemas utilizando os fluxos físicos existentes no sistema, conforme mostrado na Fig. 47. As interconexões podem ser arbitrárias, dependendo da preferência e interpretação do analista (MODESTO; NEBRA, 2006; AVELLAR et al., 2018a).

No arranjo 1, mostrado na Fig. 47a, a exergia extra adicionada pela queima suplementar é alocada à potência e ao calor útil, e não há diferenciação no tratamento entre as combustões, ou seja, apresenta apenas um par de unidades fictícias (J_E e B_E) que recebe todo o produto dos subsistemas que aumentam a exergia do fluido de trabalho (CIC, CC, R e QS) e o distribui como insumo para os subsistemas que reduzem a exergia do fluido de trabalho.

No arranjo 2, mostrado na Fig. 47b, a nova junção (J_E^2) recebe a exergia extra adicionada pela queima suplementar, como também a exergia ($E_{8:10}$) da bifurcação (B_E^1). Essa estrutura garante que a queima suplementar aloque a exergia extra apenas para o calor útil, enquanto a exergia adicionada pela câmara de combustão é distribuída proporcionalmente à potência e ao calor útil.

Na Fig. 48 é escolhido o arranjo 2 como base, pois, o custo da queima suplementar é alocado apenas para o subsistema que utiliza a exergia extra, portanto, este caso é mais coerente. A diferença está na desagregação localizada da exergia física aplicada no componente dissipativo por meio do Modelo H&S para isolá-lo. Além disso, o processo de formação de custos torna-se mais preciso com a desagregação do subsistema CIC. Assim, o insumo do *intercooler* é o fluxo produtivo de entalpia ($H_{2:3}$) proveniente da bifurcação (B_E^1) e o produto é o fluxo produtivo de entropia ($S_{2:3}$) que retorna à junção (J_E^1).

Em todas as Figs. 47 a 48, o custo do resíduo é implícito e proporcionalmente alocado ao consumo de exergia na unidade produtiva que produz os produtos finais.

6.2.1.2 Modelo H&S

Ao desagregar a exergia física, é possível obter uma melhor precisão dos resultados na análise termoeconômica. No entanto, há um aumento da complexidade (ARENA; BORCHIellini, 1999; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006). Desta forma, para decompor o subsistema CIC e assim obter o produto e insumo do *intercooler* (equipamento dissipativo), é necessário pelo menos desagregar a exergia física em seus componentes entálpicos e entrópicos. O Modelo H&S (SANTOS; NASCIMENTO; LORA, 2006; SANTOS et al., 2008) foi a primeira metodologia termoeconômica capaz de definir insumo e produto, além de isolar o equipamento dissipativo (condensador) no diagrama produtivo sem inconsistências.

Para tanto, o Modelo H&S aproveita a elegância da ideia de fluxo negentrópico (FRANGOPOULOS, 1983; FRANGOPOULOS, 1987), adotando-o como componente entrópico da exergia, utilizado em conjunto com o componente entálpico, conforme definição de exergia, Eq. (185). Além disso, segundo o Modelo H&S, a exergia química ($E_{i:j}^{CH}$) é mostrada no diagrama produtivo,

explicitamente.

$$E_{i:j} = H_{i:j} - S_{i:j} + E_{i:j}^{CH} = (m_i h_i - m_j h_j) - T_0 (m_i s_i - m_j s_j) + (m_i e_i^{CH} - m_j e_j^{CH}) \quad (185)$$

Assim como a exergia total ($E_{i:j}$), o componente entálpico ($H_{i:j}$), o componente entrópico ($S_{i:j}$) e a exergia química ($E_{i:j}^{CH}$) são variações dos componentes entálpicos, entrópicos e químicos da exergia entre estados físicos i e j, respectivamente.

No Modelo H&S, existe um dispositivo denominado ambiente (AMB), que tem a função de dissipar os resíduos existentes (fluxo 10), fazendo assim a alocação dos custos dos resíduos de forma explícita. Do ambiente, o componente entrópico é distribuído para aquelas unidades que aumentam a entropia do fluido de trabalho. A exergia química causada pelo processo de combustão na câmara de combustão ($E_{6:5}^{CH}$) e na queima suplementar ($E_{9:8}^{CH}$) também são dissipadas no ambiente.

As Figs. 49a e 49b foram elaboradas baseando na estrutura produtiva da Tab. 32. Estas figuras representam os diagramas produtivos aplicados ao Modelo H&S no sistema estudado. Também é possível verificar que todas as unidades estão isoladas nos diagramas.

Tabela 32 – Estrutura Produtiva do sistema com base no Modelo H&S.

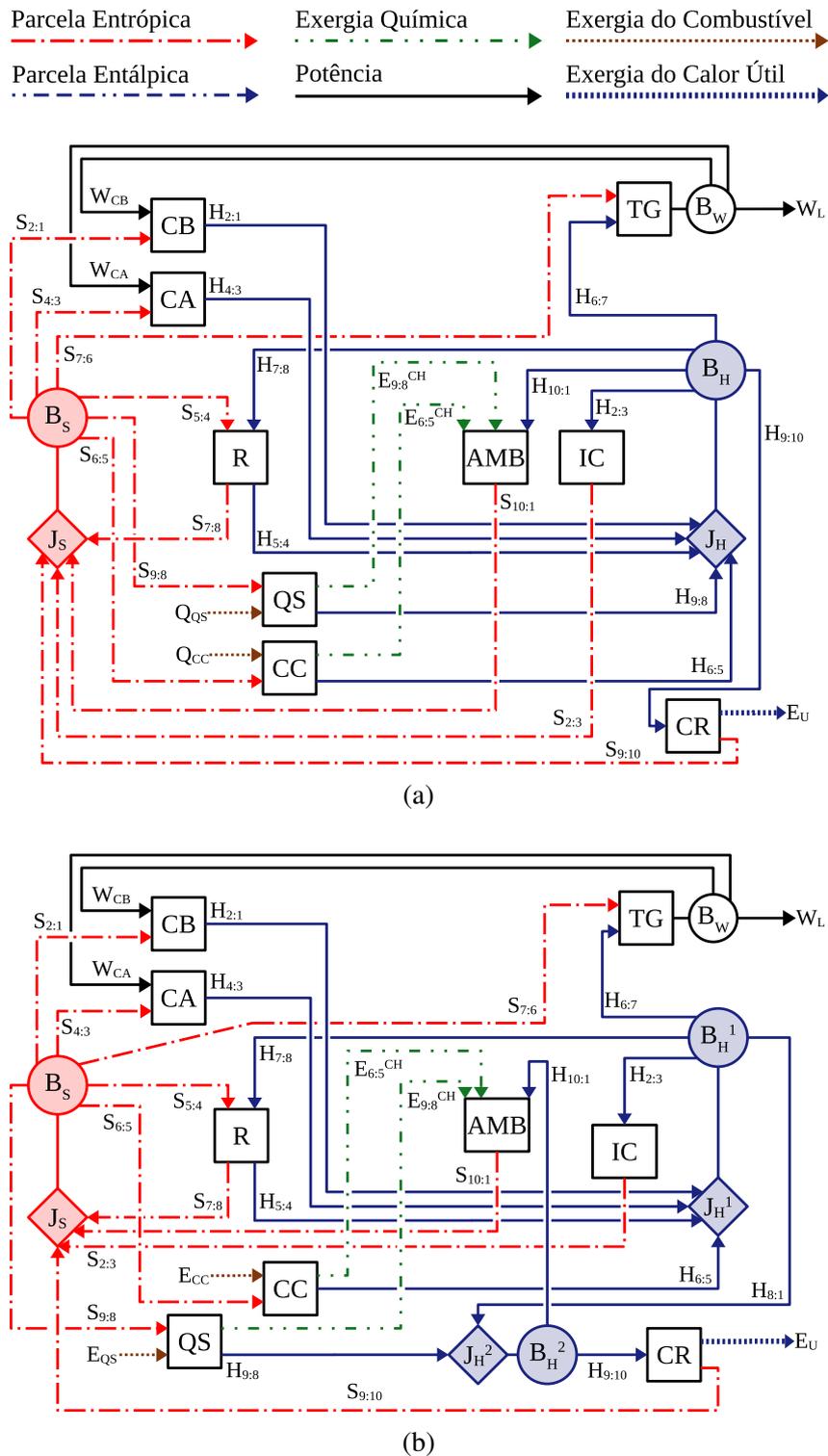
Subsistemas	Insumo		Produto	
	Físico	Produtivo	Físico	Produtivo
CB	$W_{CB} + (S_2 - S_1)$	$W_{CB} + S_{2:1}$	$(H_2 - H_1)$	$H_{2:1}$
IC	$(H_2 - H_3)$	$H_{2:3}$	$(S_2 - S_3)$	$S_{2:3}$
CA	$W_{CA} + (S_4 - S_3)$	$W_{CA} + S_{4:3}$	$(H_4 - H_3)$	$H_{4:3}$
R	$(H_7 - H_8) + (S_5 - S_4)$	$H_{7:8} + S_{5:4}$	$(H_5 - H_4) + (S_7 - S_8)$	$H_{5:4} + S_{7:8}$
CC	$E_{CC} + (S_6 - S_5)$	$E_{CC} + S_{6:5}$	$(H_6 - H_5) + (E_6^{CH} - E_5^{CH})$	$H_{6:5} + E_{6:5}^{CH}$
TG	$(H_6 - H_7) + (S_7 - S_6)$	$H_{6:7} + S_{7:6}$	$W_{CB} + W_{CA} + W_L$	$W_{CB} + W_{CA} + W_L$
QS	$E_{QS} + (S_9 - S_8)$	$E_{QS} + S_{9:8}$	$(H_9 - H_8) + (E_9^{CH} - E_8^{CH})$	$H_{9:8} + E_{9:8}^{CH}$
CR	$(H_9 - H_{10})$	$H_{9:10}$	$E_U + (S_9 - S_{10})$	$E_U + S_{9:10}$
AMB	$(H_{10} - H_1) + (E_6^{CH} - E_5^{CH}) + (E_9^{CH} - E_8^{CH})$	$H_{10:1} + E_{6:5}^{CH} + E_{9:8}^{CH}$	$S_{10} - S_1$	$S_{10:1}$

Fonte: Produzido pelo autor.

Como no Modelo E, o arranjo 1 na Fig. 49a possui apenas um par de unidades fictícias para entalpia não diferenciando os processos de combustão. Consequentemente, a junção e a bifurcação (J_H e B_H) recebem todos os fluxos que aumentam o componente entálpico e os distribuem para aqueles que o diminuem. Por outro lado, o arranjo 2 na Fig. 49b tem dois pares

de junções e bifurcações para o componente entálpico, permitindo alocar a entalpia adicionada na queima do suplemento apenas para aqueles que a utilizam, ou seja, o calor útil.

Figura 49 – Diagrama produtivo para o sistema utilizando o Modelo H&S: (a) Arranjo 1 e (b) Arranjo 2.



Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

6.2.2 Diagrama Abrangente

O diagrama abrangente é uma alternativa às arbitrariedades presentes no diagrama produtivo, visto que a principal característica é a utilização de fluxos físicos para as interconexões entre os subsistemas ao mesmo tempo, dando um significado físico aos fluxos produtivos, além de avaliar os custos unitários dos fluxos físicos e produtivos no mesmo diagrama (LAZZARETTO; MACOR, 1995; AVELLAR et al., 2018a; AVELLAR et al., 2018b; LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006).

Nos diagramas abrangentes das Figs. 50 a 52, não é possível desenvolver arranjos diferentes para interconectar os subsistemas devido ao uso de fluxos físicos. A representação do subsistema é estabelecida como: as linhas pontilhadas são os componentes e as linhas contínuas são as unidades produtivas.

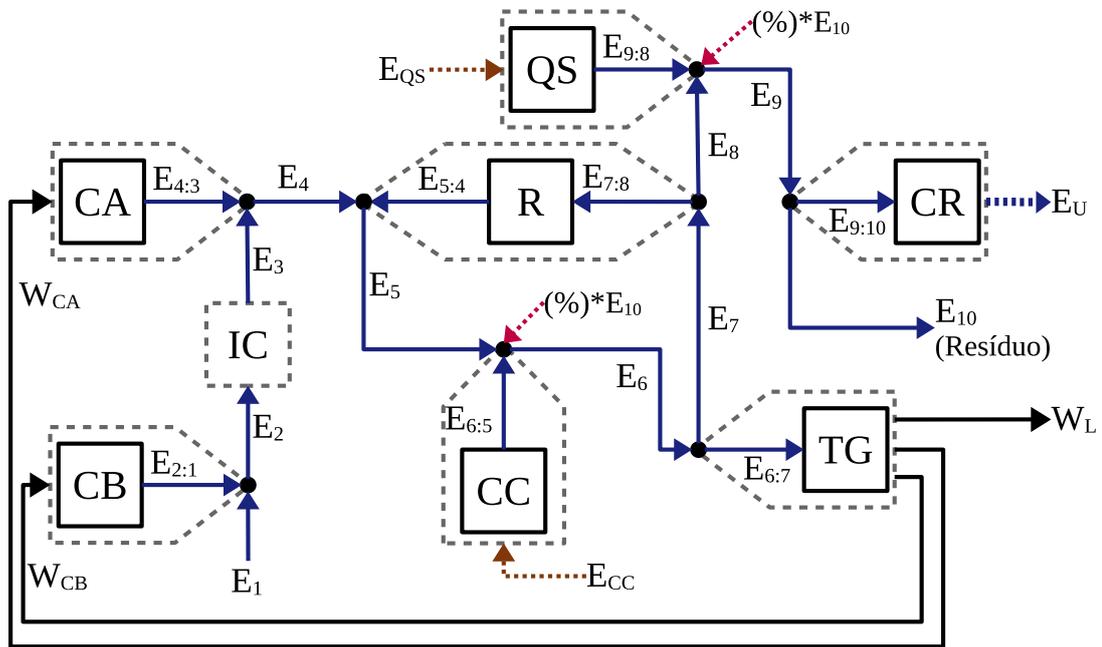
6.2.2.1 Modelo E

As Figs. 50a e 50b representam o diagrama abrangente do sistema de cogeração com uma turbina a gás regenerativa, *intercooler* e queima suplementar aplicada ao Modelo E com diferentes formas de alocação de custos de resíduos. É relevante observar que o *intercooler* (IC), um equipamento dissipativo, no Modelo E não define sua função. No entanto, esse foi tratado, ou seja, foi separado dos demais componentes por meio dos fluxos físicos de entrada e saída, mas estes fluxos não são considerados insumo e produto, respectivamente.

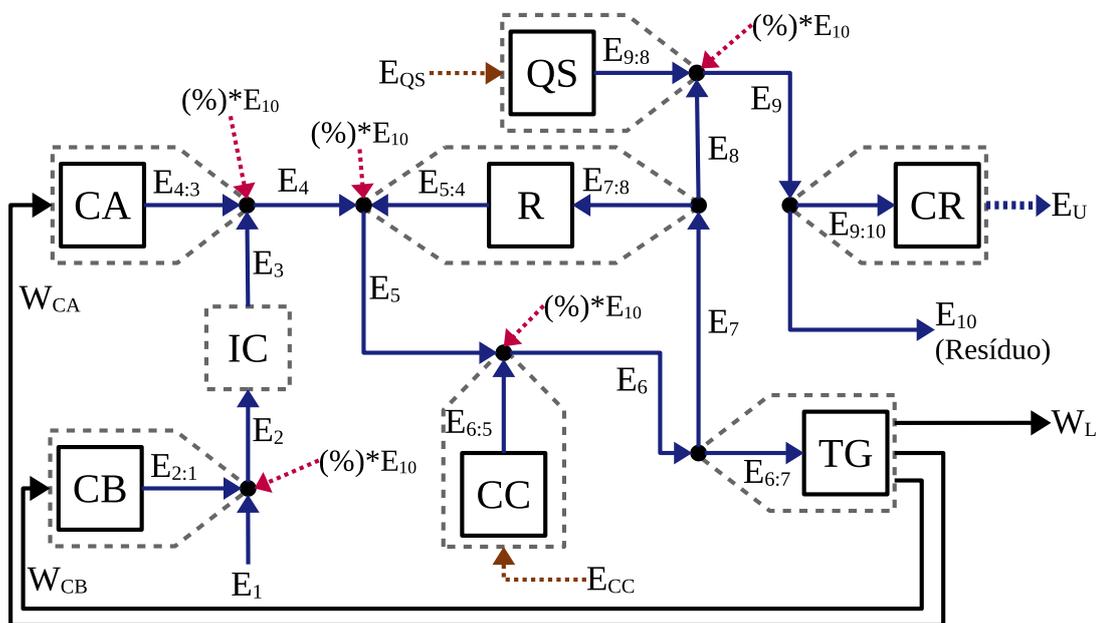
Para o diagrama abrangente da Fig. 50a, a alocação de custos de resíduos adotada é baseada em (LAZZARETTO; TSATSARONIS, 2006), que reinternaliza os custos dos resíduos para o componente que os gerou. Nesse caso, é distribuído proporcionalmente à sua entrada de exergia, ou seja, 94,13% para CC e 5,87% para QS.

Na Fig. 50b, a razão de alocação do custo do resíduo adotada é baseada em (TORRES; VALERO; PEREZ, 2007), cujo custo do resíduo é arbitrariamente alocado proporcionalmente ao aumento da exergia do fluido de trabalho no componente. No diagrama abrangente, o custo do resíduo é alocado diretamente no *loop* do fluxo físico (FARIA et al., 2020; FARIA et al., 2021), indicado pelas setas vermelhas. Neste caso, as taxas de distribuição de custo dos resíduos utilizados são: 9,19% para CB, 9,54% para CA, 28,64% para R, 49,67% para CC e 2,96% para QS.

Figura 50 – Diagrama abrangente para o sistema usando o Modelo E - Alocação de custos de resíduos em: (a) abordagem baseada em SPECO e (b) *Loop* interno de fluxos físicos.



(a)

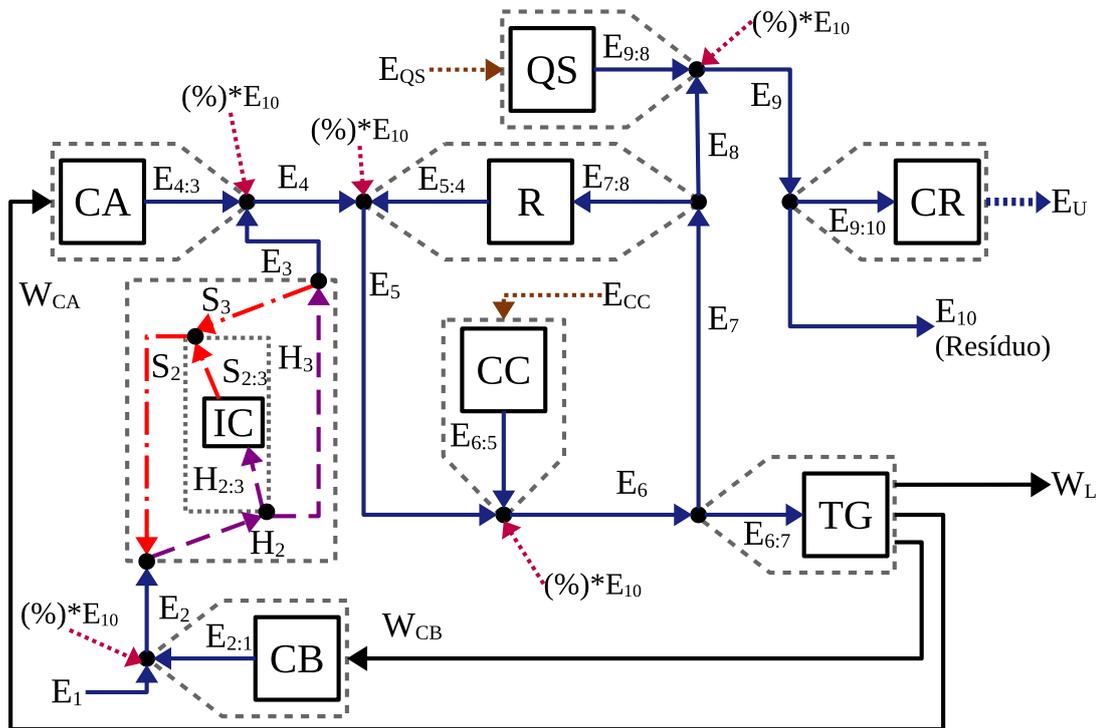


(b)

Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

Na Fig. 51, é aplicada a mesma alocação de custos de resíduos da Fig. 50b (*loop* interno do fluxo físico). A diferença é que a desagregação localizada da exergia física é aplicada no componente dissipativo por meio do Modelo H&S para isolá-lo. Assim, o fluxo de entrada e saída para o componente IC baseado no Modelo E é E_2 e E_3 , respectivamente. O insumo do *intercooler* é o fluxo produtivo de entalpia ($H_{2:3}$) e o produto é o fluxo produtivo de entropia ($S_{2:3}$).

Figura 51 – Diagrama abrangente para o sistema usando o Modelo E com alocação de custos de resíduos no *loop* interno de fluxos físicos e desagregação localização no *intercooler*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

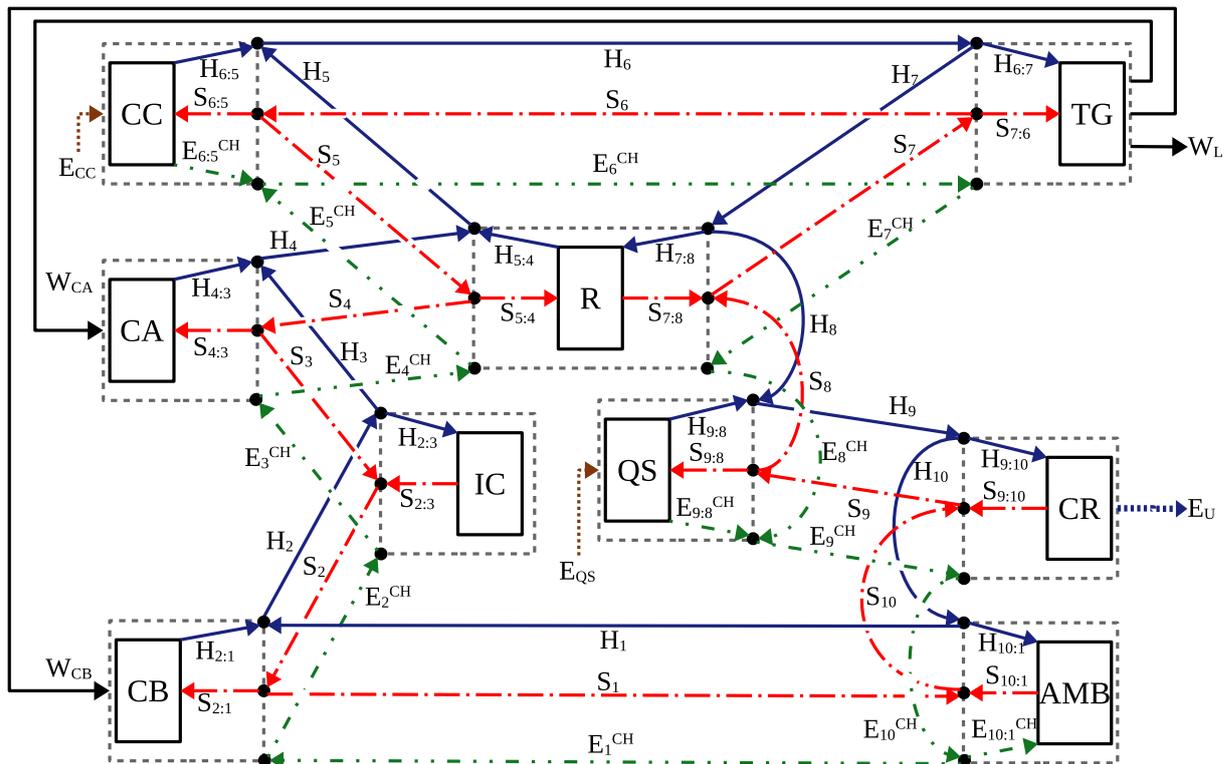
6.2.2.2 Modelo H&S

O sistema para o Modelo H&S no diagrama abrangente é mostrado na Fig. 52. Assim como no diagrama produtivo, o *intercooler* (equipamento dissipativo) é isolado definindo o produto e insumo através dos componentes entálpicos e entrópicos. O tratamento de resíduos é uma característica inerente ao Modelo de H&S que foi alocado de forma automática e sistemática por meio da definição de sua estrutura produtiva.

Ao contrário do diagrama produtivo, a exergia química apresenta um *loop* de fluxo físico no sistema, porém, apenas alguns equipamentos possuem fluxo produtivo. Assim, os fluxos produtivos são definidos apenas no CC, QS e AMB, nos demais equipamentos não há variação na exergia química.

Observando apenas os fluxos de exergia química, os fluxos E_1^{CH} a E_5^{CH} apresentam valor nulo, portanto, não há alteração na composição química em relação ao ar. O valor é o mesmo nos fluxos E_6^{CH} a E_8^{CH} , devido ao processo de combustão após a câmara de combustão, em que há uma modificação na composição em relação ao ar, ocasionando alteração na exergia química. A exergia química dos fluxos E_9^{CH} a E_{10}^{CH} são iguais, como resultado do novo processo de combustão na queima suplementar.

Figura 52 – Diagrama abrangente para o sistema usando o Modelo H&S.



Fonte: Adaptada de Barone et al. (2021).

A Tab. 33 mostra o custo exerético unitário do Modelo E nos diagramas produtivos e abrangentes. Esses custos exeréticos unitários foram obtidos aplicando o balanço de custo nos diagramas das Figs. 47 a 48 e as Figs. 50 a 51.

A diferença entre o arranjo 1 (um par de junção e bifurcação) e arranjo 2 (dois pares de junção e bifurcação) revela uma ligeira diferença no custo exerético unitário para fluxos internos. Embora, o arranjo 2 aloque a exergia extra da queima suplementar de forma racional, como já explicado.

A Tab. 34 mostra o custo exerético unitário do Modelo H&S em diagramas produtivos e abrangentes. Esses custos exerético unitários foram obtidos pela aplicação do balanço de custo nos diagramas nas Figs. 49 e 52.

Tabela 33 – Custo Exergético Unitário (k) para o Modelo E do sistema de queima suplementar.

Fluxo	Diagrama Produtivo (kJ/kJ)			Diagrama Abrangente (kJ/kJ)		
	Arranjo		Desagregação Localizada da Exergia	Abordagem Baseada no SPECO	Loop Interno	Desagregação Localizada da Exergia
	1	2				
E_1	-	-	-	0,000	0,000	0,000
E_2	-	-	-	1,593	1,629	1,629
E_3	-	-	-	1,929	1,973	1,973
E_4	-	-	-	1,738	1,778	1,778
E_5	-	-	-	1,636	1,674	1,674
$E_6 = E_7 = E_8$	-	-	-	1,381	1,383	1,383
$E_9 = E_{10}$	-	-	-	1,324	1,315	1,315
$E_{2:1}$	-	-	1,603	1,593	1,595	1,595
$E_{4:1}$	1,727	1,749	-	-	-	-
$E_{4:3}$	-	-	1,597	1,586	1,588	1,588
$E_{5:4}$	1,565	1,586	1,586	1,576	1,578	1,578
$E_{6:5}$	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
$E_{6:7} = E_{7:8}$	1,372	1,390	1,390	1,381	1,383	1,383
$E_{9:8}$	1,132	1,132	1,132	1,132	1,132	1,132
$E_{8:10}$	-	1,390	1,390	-	-	-
$E_{9:10}$	1,372	1,279	1,279	1,324	1,315	1,315
$P_L = P_{CB} = P_{CA}$	1,405	1,424	1,424	1,414	1,416	1,416
E_U	1,647	1,536	1,536	1,591	1,579	1,579
$H_2 = H_3$	-	-	-	-	-	1,974
S_2	-	-	-	-	-	2,383
S_3	-	-	-	-	-	2,429
$H_{2:3}$	-	-	1,390	-	-	1,974
$S_{2:3}$	-	-	1,678	-	-	2,383

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 34 – Custo Exergético Unitário (k) para o Modelo H&S do sistema de queima suplementar.

Fluxo	Diagrama Produtivo (kJ/kJ)		Diagrama Abrangente (kJ/kJ)
	Arranjo 1	Arranjo 2	
H_1	-	-	1,398
$H_2 = H_3$	-	-	1,545
H_4	-	-	1,581
H_5	-	-	1,557
$H_6 = H_7 = H_8$	-	-	1,390
$H_9 = H_{10}$	-	-	1,398
$S_1 = S_2$	-	-	1,865
$S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7$	-	-	1,641
$S_8 = S_9$	-	-	1,723
S_{10}	-	-	1,839
$H_{2:1}$	1,612	1,612	1,638
$H_{2:3}$	1,391	1,392	1,545
$H_{4:3}$	1,606	1,606	1,607
$H_{5:4}$	1,542	1,542	1,549
$H_{6:5}$	1,205	1,204	1,211
$H_{6:7} = H_{7:8}$	1,391	1,392	1,390
$H_{9:8}$	1,378	1,377	1,436
$H_{9:10} = H_{10:1}$	1,391	1,389	1,398
$H_{8:1}$	-	1,392	-
$S_{2:1}$	1,618	1,617	1,865
$S_{2:3}$	1,680	1,681	1,865
$S_{4:3} = S_{5:4} = S_{6:5} = S_{7:6}$	1,618	1,617	1,641
$S_{7:8}$	1,542	1,542	1,549
$S_{9:8}$	1,618	1,617	1,723
$S_{9:10}$	1,494	1,491	1,501
$S_{10:1}$	1,816	1,813	1,825
$W_L = W_{CB} = W_{CA}$	1,431	1,431	1,429
E_U	1,494	1,491	1,501
$E_{6:5}^{CH}$	1,205	1,204	1,211
$E_{9:8}^{CH}$	1,378	1,377	1,436
$E_{10:1}^{CH}$	-	-	1,237
$E_6^{CH} = E_7^{CH} = E_8^{CH}$	-	-	1,211
$E_9^{CH} = E_{10}^{CH}$	-	-	1,237

Fonte: Produzido pelo autor.

6.3 Análise Comparativa

Para o sistema de cogeração com turbina a gás regenerativa, *intercooler* e queima suplementar, dois modelos termoeconômicos E e H&S foram aplicados nos diagramas produtivos e abrangentes. Devido à arbitrariedade da construção do diagrama produtivo, foi possível elaborar dois diagramas com diferentes alocações de custos devido ao calor adicional da queima suplementar. Em relação ao diagrama abrangente, para o Modelo E, dois critérios de alocação do custo dos resíduos foram utilizados.

Em relação ao equipamento dissipativo (*intercooler*), o diagrama produtivo utilizando o Modelo E precisou unir arbitrariamente o *intercooler* com os compressores de ar, criando o subsistema CIC. Este novo sistema pode determinar o insumo e o produto. Por outro lado, nos diagramas abrangentes, o *intercooler* era tratado por fluxos físicos, que permitiam separar os compressores de ar. Uma alternativa para isolar o equipamento dissipativo foi a desagregação localizada da exergia física. Esta metodologia aplicada nos diagramas produtivos e abrangentes do Modelo E permitiu definir o insumo e produto do *intercooler* sem aumentar a complexidade quando comparado à aplicação do Modelo H&S em todo o sistema.

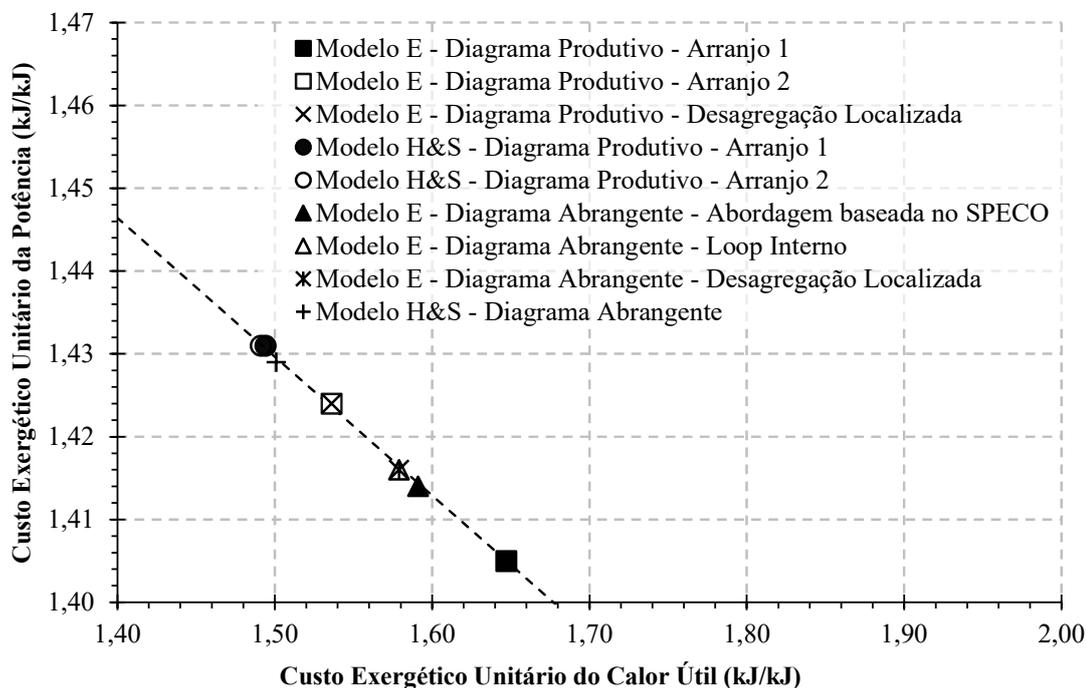
De acordo com Araújo et al. (2020), independente do procedimento de alocação de custos, o resultado do custo unitário dos produtos sempre formará uma linha reta com a solução definida pela Eq. (186) para este trabalho. Esta equação mostra que existe uma correlação entre o custo exergético unitário da energia e o custo exergético unitário do calor. A Fig. 53 mostra a linha reta com os resultados obtidos pelos diferentes métodos de alocação de custos para um mesmo sistema.

$$k_W = -\frac{E_U}{W_L} k_{E_U} + \frac{(E_{CC} + E_{QS})}{W_L} k_F \quad (186)$$

Todos os pontos da Fig. 53 presentes na reta solução são pares ordenados de custos unitários de calor e energia obtidos. A Tab. 35 resume os resultados dos custos unitários exergéticos de produtos de diferentes abordagens para alocação de custos.

O arranjo 1 do diagrama produtivo do Modelo E obteve o maior custo exergético unitário de calor (1,647 kJ/kJ) e, conseqüentemente, o menor valor de potência (1,405 kJ/kJ). Do outro lado está o arranjo 2 do diagrama produtivo do Modelo H&S que obteve o menor valor para o custo exergético unitário do calor (1,491 kJ/kJ) e o maior valor para a potência (1,431 kJ/kJ).

Figura 53 – Resultados obtidos pelos diferentes métodos de alocação de custos para o mesmo sistema na reta solução.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 35 – Custo exergético unitário (k) do calor e potência - Modelo E e H&S.

Modelo	Diagrama		k (kJ/kJ)		Quantidade de Fluxos
			Calor	Potência	
E	Produtivo	Arranjo 1 (Um par de JB)	1,647	1,405	11
E	Produtivo	Arranjo 2 (Dois pares de JB)	1,536	1,424	12
E	Produtivo	Desagregação Localizada	1,536	1,424	15
H&S	Produtivo	Arranjo 1 (Um par de JB)	1,494	1,431	26
H&S	Produtivo	Arranjo 2 (Dois pares de JB)	1,491	1,431	27
E	Abrangente	Abordagem baseada no SPECO	1,591	1,414	22
E	Abrangente	Loop Interno	1,579	1,416	22
E	Abrangente	Desagregação Localizada	1,579	1,416	28
H&S	Abrangente	-	1,501	1,429	57

Fonte: Produzido pelo autor.

A Fig. 53 também destaca um comportamento distinto entre o modelo termoeconômico E e H&S, ou seja, o Modelo E sobrecarrega o custo exergético unitário do calor, enquanto o Modelo H&S, a potência. Isso é explicado pelo isolamento dos equipamentos dissipativo no Modelo H&S, bem como pelos diferentes procedimentos de alocação de resíduos para cada modelo termoeconômico. No Modelo E com diagrama produtivo, a alocação do custo dos resíduos é realizada de forma implícita e proporcional à potência e ao calor, ou seja, o custo dos resíduos é alocado proporcionalmente às entradas da turbina a gás e da caldeira de recuperação. No

modelo H&S, é alocado aos subsistemas que aumentam a entropia do fluido de trabalho. Assim, entre os equipamentos que reduzem a entropia está a caldeira de recuperação, não recebendo, conseqüentemente, nenhuma alocação de custo de resíduo, que resulta na diminuição do custo unitário do calor.

Em relação à desagregação localizada da exergia física, no Modelo E, o custo exergético unitário do produto e os fluxos internos foram os mesmos no diagrama produtivo no arranjo 2 e desagregação localizada da exergia, e também no diagrama abrangente com *loop* interno e desagregação localizada da exergia (ver Tabs. 33 e 34). Já os fluxos produtivos $H_{2:3}$ e $S_{2:3}$ diferiram quando comparados ao Modelo H&S aplicado no diagrama abrangente e com pequena diferença no diagrama de produtivo. Ainda em relação ao Modelo E, a desagregação localizada permitiu definir insumo e produto do *intercooler* (equipamento dissipativo) além de reduzir em cerca de 50% a quantidade de fluxos, quando comparado ao Modelo H&S, ou seja, foi possível definir a função do equipamento dissipativo sem aumentar complexidade, através da desagregação localizada da exergia física.

Analisando apenas os diagramas produtivos, observa-se a influência dos componentes fictícios na alocação dos custos. Quando o diagrama produtivo apresenta apenas um par de junção e bifurcação (arranjo 1), independente do modelo termoeconômico, o calor é sempre penalizado, visto que o custo unitário da bifurcação possui um valor maior em relação ao custo unitário do produto da queima suplementar. Sendo o caso mais coerente com dois pares de junções e bifurcações (arranjo 2). Afinal, os custos da queima suplementar são alocados apenas aos equipamentos que utilizaram a energia extra, no caso, a caldeira de recuperação. O custo da caldeira de recuperação é composto pelo custo do produto de queima suplementar e pelo custo do fluxo produtivo proveniente da bifurcação (B_E^1 ou B_H^1). Como o custo exergético unitário da queima suplementar é inferior ao do fluxo produtivo, isso resulta na redução do custo unitário do calor e, conseqüentemente, no aumento do custo unitário da potência.

Comparando os diferentes arranjos do diagrama produtivo aplicado no Modelo E, os custos exergéticos unitários dos produtos obtidos por este modelo apresentaram a maior variação, 1,33% e 7,29% para potência e calor, respectivamente. Esses valores são obtidos em relação ao menor valor dos custos exergéticos unitários dos arranjos do diagrama produtivo aplicado no Modelo E. A mesma comparação foi feita para o Modelo H&S, que apresentou valores de 0,12% e 0,67%.

Ao comparar diferentes diagramas, o Modelo de H&S no diagrama abrangente apresentou uma redução no custo exergético unitário da potência (0,119%) e um aumento no custo unitário do calor (0,67%), em relação ao obtido pelo arranjo 2 do diagrama produtivo. Essa diferença se deve principalmente à interconexão do subsistema, e não à alocação de custos dos resíduos. Ao contrário do Modelo H&S, o Modelo E apresentou uma variação significativa nos procedimentos de alocação de custos entre os diagramas. Essa diferença ocorre porque o processo de formação de custos entre os diagramas se diferem, ou seja, o diagrama abrangente respeita as interconexões dos subsistemas apresentados no diagrama físico, enquanto o diagrama produtivo

utiliza fluxos produtivos, que podem não ter significado físico, além das junções e arbitrariedade das bifurcações (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

O Modelo de H&S é uma metodologia desenvolvida para realizar o tratamento de resíduos sem a utilização de outras metodologias, haja vista que o tratamento de resíduos é estabelecido no próprio modelo por meio da estrutura produtiva. Além disso, é independente do diagrama escolhido. Esse comportamento é evidenciado pela variação bastante baixa dos resultados obtidos pelo modelo. Para o Modelo E no diagrama abrangente, houve a necessidade de usar metodologias separadas para realizar o tratamento de resíduos. A metodologia de *loop* interno acaba sobrecarregando a potência, pois, o custo do resíduo é distribuído para os equipamentos que aumentam a exergia. Por outro lado, na abordagem baseada no SPECO, o calor é sobrecarregado, e os resíduos são alocados apenas para aqueles que o geram, neste caso, a câmara de combustão e a queima suplementar. No entanto, esses resultados apresentaram menor variação do que o diagrama produtivo.

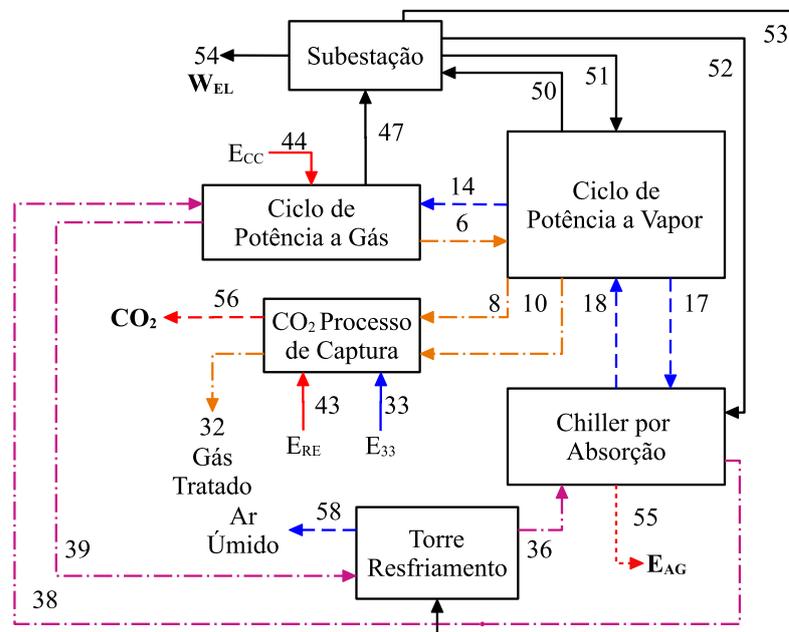
7 ESTUDO DE CASO IV: SISTEMATIZAÇÃO GENERALIZADA

O objetivo deste capítulo é mostrar a sistematização proporcionada pelo diagrama abrangente com a eliminação das arbitrariedades referente as interconexões, equipamentos dissipativos, tratamento de resíduo e a complexidade que a desagregação da exergia física proporciona.

7.1 Descrição do Sistema

A construção do sistema estudado neste capítulo se deu a partir da união de vários arranjos, de forma a verificar os fatores que interferem no processo de formação de custo em sistemas complexos, sendo esse um sistema combinado de cogeração com *chiller* por absorção, processo de captura de CO_2 e torre de resfriamento. Na Fig. 54, o sistema é subdividido em cinco partes: ciclo de potência a gás, ciclo de potência a vapor, *chiller* por absorção, processo de captura de CO_2 e torre de resfriamento.

Figura 54 – Estrutura física simplificada do sistema combinado de cogeração com *chiller* por absorção, processo de captura de CO_2 e torre de resfriamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A estrutura física apresentada na Fig. 55 mostra o detalhamento dos subsistemas que o compõem. Ao todo são 25 equipamentos, são eles: compressor de ar de baixa pressão (CB), *intercooler* (IC), compressor de ar de alta pressão (CA), câmara de combustão (CC), turbina a gás (TG), gerador da turbina a gás (GTG), subestação (SUB), regenerador 1 (R1), turbina a vapor de alta pressão (TVA), regenerador 2 (R2), turbina a vapor de alta pressão (TVB), gerador das

as potências mecânicas produzidas pela turbina de alta pressão (TVA) e baixa pressão (TVB) e potência elétrica do gerador das turbinas a vapor (GTV).

O *chiller* por absorção tem como produto principal a exergia da água gelada (E_{AG}) (fluxo 55). Enquanto o sistema de processo de captura de CO₂ (CO2.PC) possui o fluxo de CO₂ como produto (fluxo 56) e resíduo o gás tratado (fluxo 32). Além desses fluxos, o sistema CO2.PC ainda apresenta o fluxo 31 de monoetanolamina (MEA) para captura do CO₂, o fluxo 33 de água para mistura com o MEA, além do **resfriamento** dos fluxos internos e a exergia fornecida ao refeedor (*reboiler*) (E_{RE}).

A água da torre de resfriamento (TR) passa pelos equipamentos, absorvedor (AB), condensador (CD) e *intercooler* (IC). Outros fluxos da torre de resfriamento são: fluxo de ar úmido (fluxo 58)(resíduo), fluxo de ar (57) e água de reposição (40).

Por fim, a subestação (SUB), a qual reúne as potências elétricas dos geradores (W_{GTG} e W_{GTV}), produzindo a potência elétrica líquida W_{EL} e fornecendo energia para o acionamento das bombas (W_{B1} , W_{B2} e W_{B3}).

7.2 Análise Termoeconômica

Em uma primeira análise na Fig. 54 percebe-se que o sistema é baseado em três sistemas menores, de ciclo de potência a gás, de ciclo de potência a vapor e um de *chiller* por absorção, os quais apresentam interligações entre esses por meio dos fluxos. Sendo assim, o diagrama produtivo pode apresentar arbitrariedade na quantidade das unidades fictícias, conforme já discutido no estudo de caso do capítulo 4. Ainda na mesma figura, nota-se que o sistema apresenta resíduos, gás tratado (fluxo 32) e ar úmido (fluxo 58), que no caso do diagrama abrangente no Modelo E e diagrama físico necessitam adotar um critério de proporcionalidade para realizar o tratamento do resíduo, já discutido no capítulo 5.

De acordo com o fluxograma da Fig. 20, o modelo termoeconômico com menor complexidade, sem arbitrariedade de interconexão entre os subsistemas e com tratamento de resíduo, considerando que as válvulas de expansão não operam com gás ideal, são o diagrama abrangente com Modelo UFS ou diagrama abrangente com Modelo H&S com desagregação localizada UFS. Por uma questão de conferência do fluxograma desenvolvido, será utilizado o Modelo E, H&S, UFS e UFS+.

A Fig. 56 mostra o diagrama abrangente do sistema aplicado ao Modelo E. Somente pela utilização do diagrama abrangente verifica-se a sistematização das interligações entre os subsistemas, dado que esse é fidedigno as conexões dos subsistemas por meio dos fluxos físicos presentes no diagrama físico. Outro aspecto que corrobora é o fato dos equipamentos dissipativos (torre de resfriamento e válvulas de expansões) estarem tratados no diagrama, isto é, estes dispositivos não estão unidos aos equipamentos produtivos para definir insumo e produto, apenas

7.2.1 Compressores e Bombas

A função dos compressores de ar e bombas é a elevação da pressão do fluido de trabalho. Assim, fazem parte desse grupo o compressor de ar de baixa pressão (CB), compressor de ar de alta pressão (CA), bomba 1 (B1), bomba 2 (B2) e bomba 3 (B3).

A Fig. 57 mostra o insumo e produto deste grupo para os Modelos E, H&S, UFS e UFS+. Ainda na figura, é notório o aumento da quantidade de fluxo com a desagregação da exergia física, que neste caso, há aumento de cinco vezes a quantidade de fluxos físicos e quatro vezes de fluxos produtivos.

Independentemente de compressor ou bomba, os Modelos H&S e UFS possuem como insumo a potência de acionamento e a entropia. Além desses fluxos, o Modelo UFS+ possui também como insumo o trabalho de fluxo do volume (FV). Em nenhum dos equipamentos há variação da exergia química (CH).

7.2.2 Trocadores de Calor

Este grupo é composto somente por trocadores de calor. Fazem parte desse grupo o *intercooler* (IC), regenerador 1 (R1), regenerador 2 (R2), condensador (CD) e trocador de calor (TC).

Os insumos e produtos deste grupo são representados na Fig. 58 nos Modelos Termoeconômicos E, H&S, UFS e UFS+. Assim como no grupo dos compressores e bombas, não há variação da exergia química.

7.2.3 Turbinas

Fazem parte desse grupo a turbina a gás (TG), turbina a vapor de alta pressão (TVA) e turbina a vapor de baixa pressão (TVB). As turbinas têm como propósito a produção de potência mecânica, representados neste caso pelas potências (W_{CA} , W_{CB} , W_{TG} , W_{TVA} e W_{TVB}). Salvo no Modelo UFS+, a parcela de trabalho de fluxo do volume (FV) também é produto.

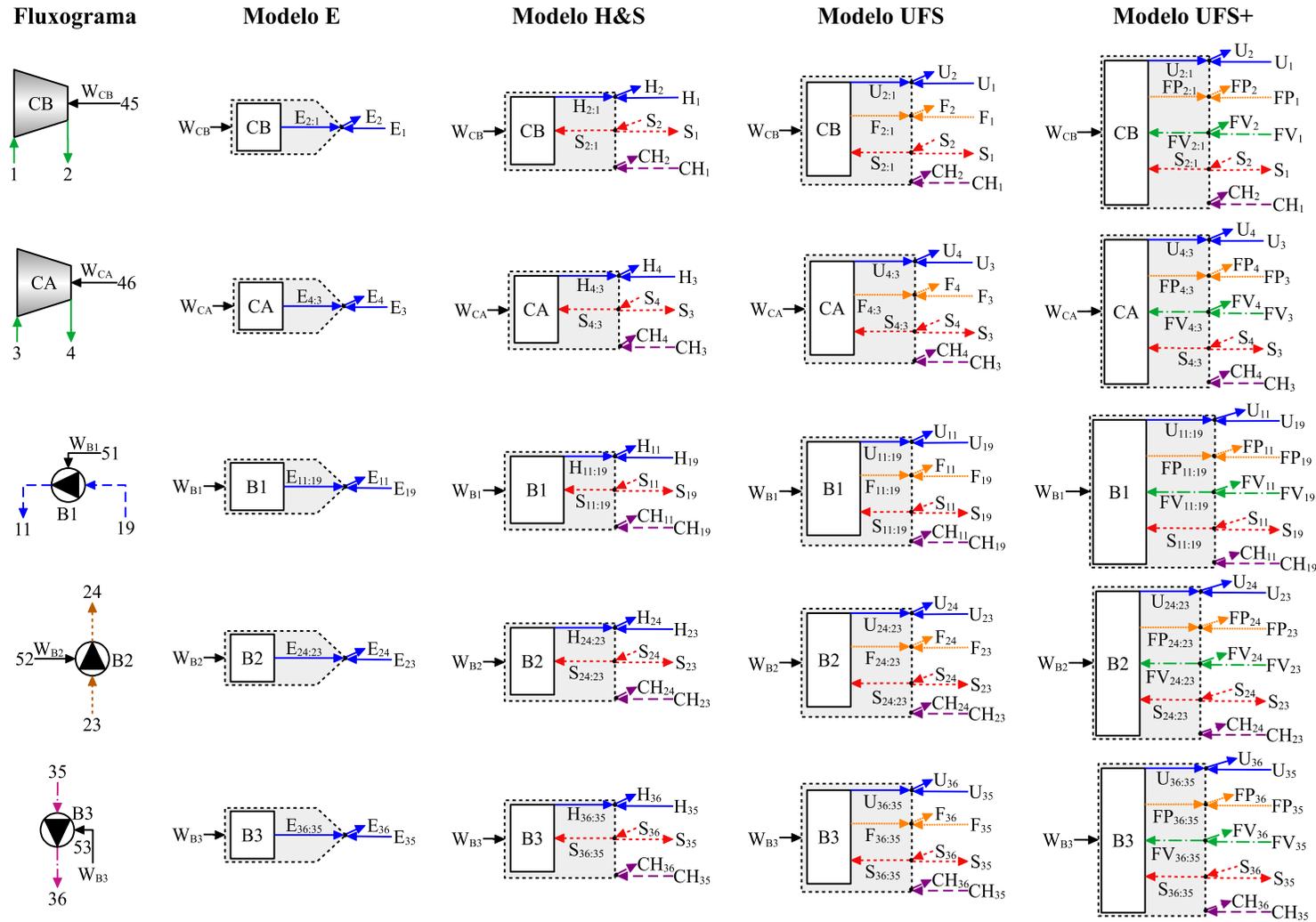
A Fig. 59 mostra o insumo e produto deste grupo para os Modelos E, H&S, UFS e UFS+.

7.2.4 Válvulas de Expansão

Este grupo é formado pelas válvulas de expansão V1 e V2. Como já discutido em capítulos anteriores, o Modelo E e H&S não definem o insumo e produto das válvulas. Contudo, no diagrama abrangente esses equipamentos são tratados, permanecendo separados dos equipamentos produtivos por meio dos fluxos físicos. Somente nos Modelos UFS e UFS+ são definidos os insumos e produtos desses.

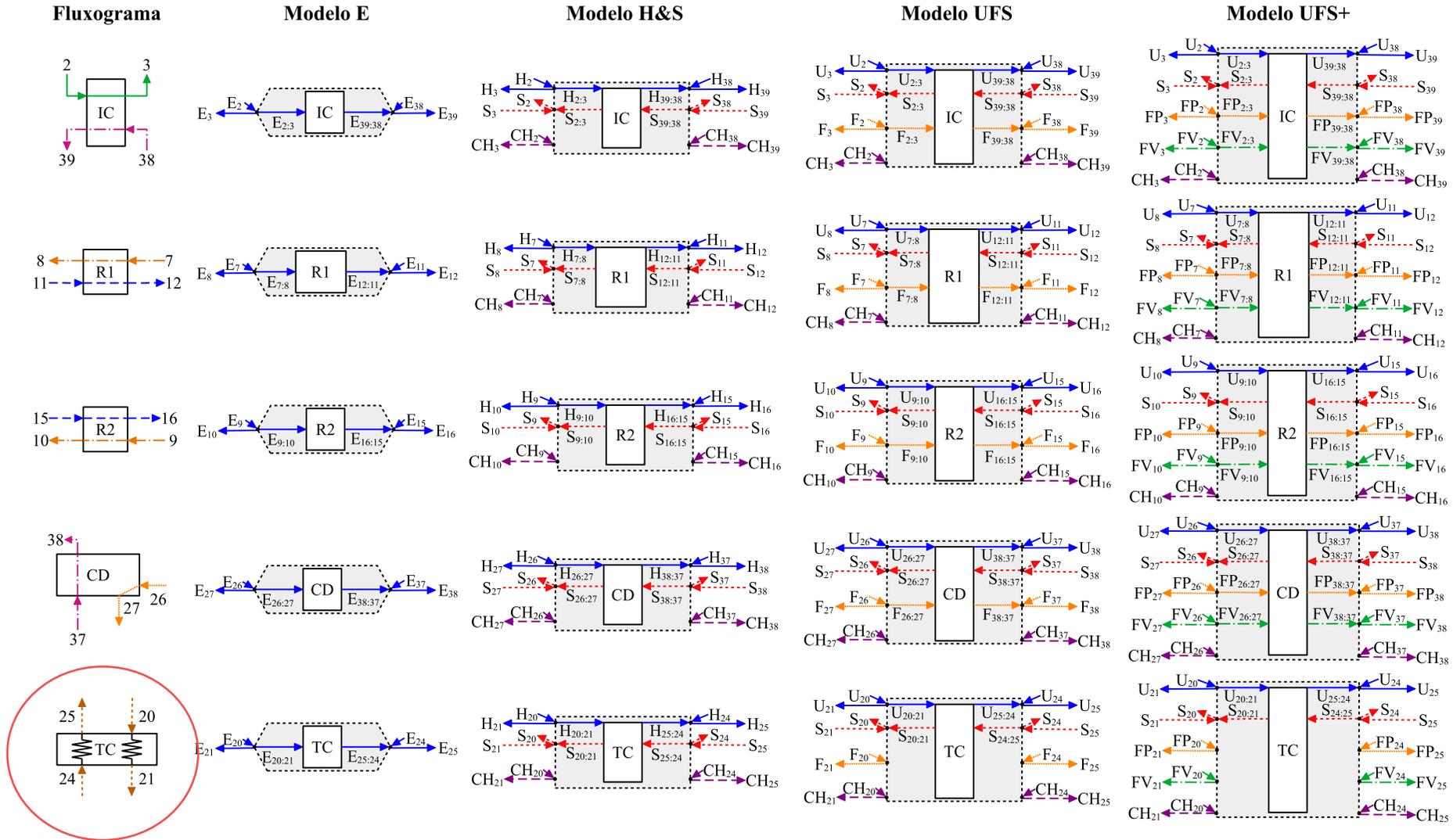
A Fig. 60 apresenta os subsistemas com os fluxos físicos nos Modelos E e H&S, como também os fluxos físicos e produtivos para os Modelos UFS e UFS+.

Figura 57 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente dos compressores e bombas.



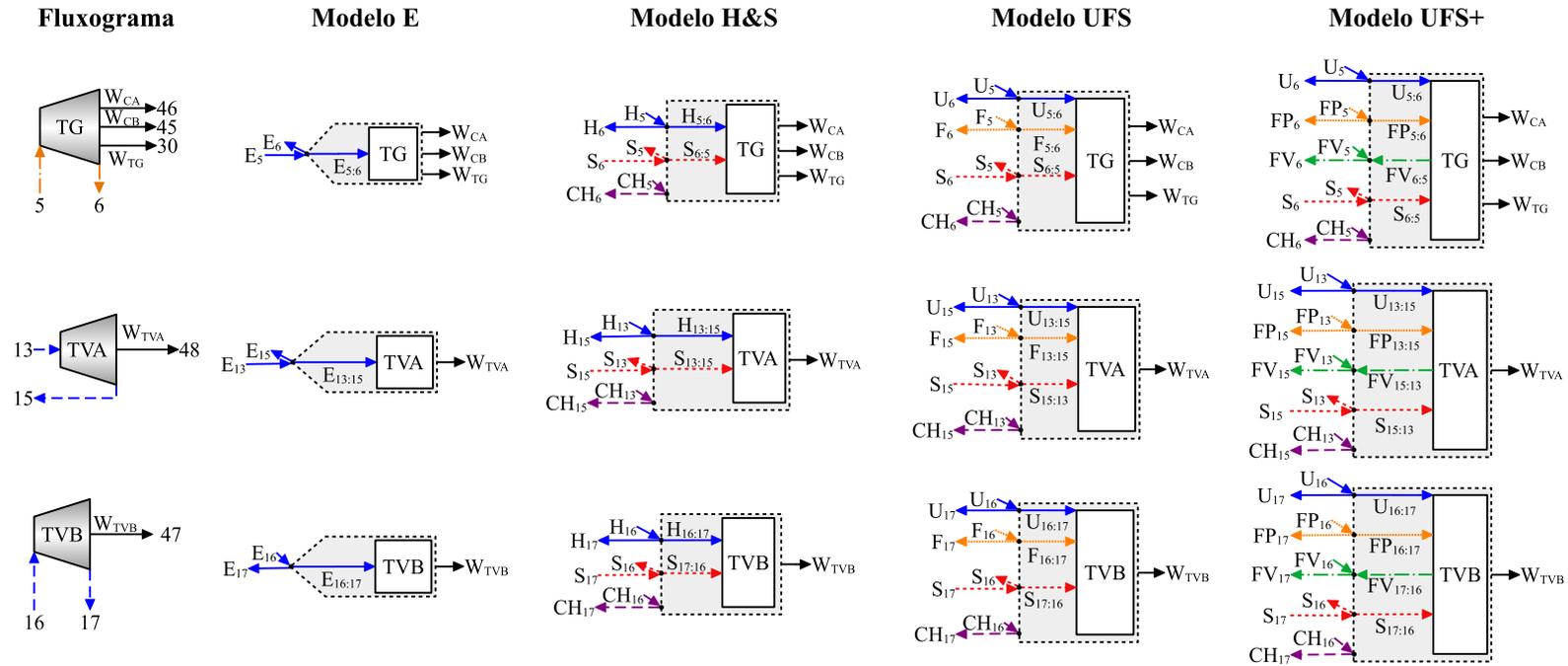
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente dos trocadores de calor.



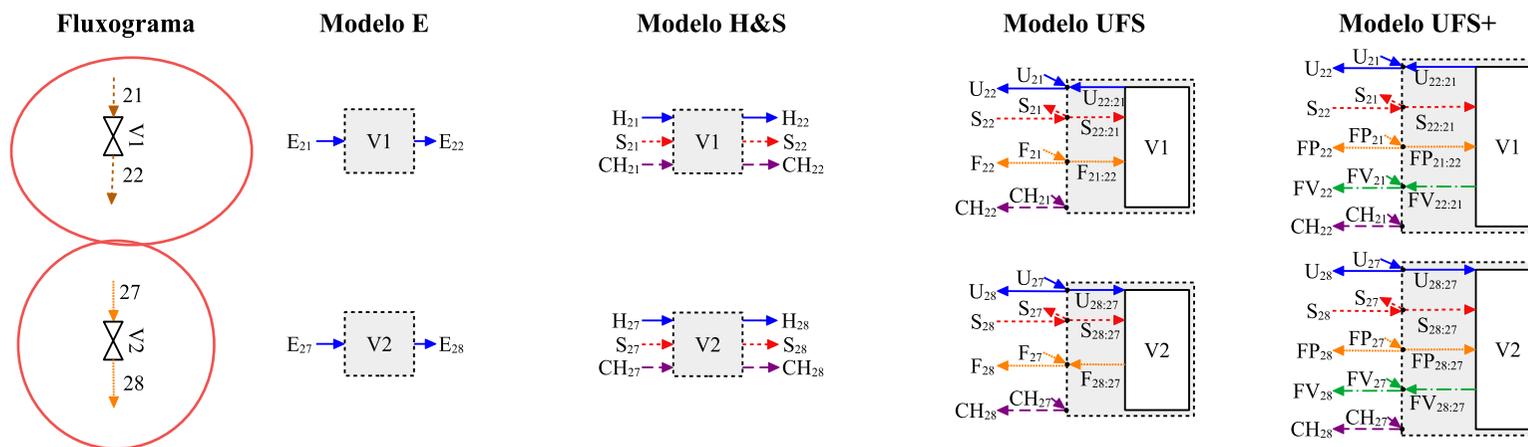
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente das turbinas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente das válvulas de expansão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

7.2.5 Equipamentos com Misturas

Este grupo é formado por equipamentos que ocorrem a mistura de fluxos em diferentes condições. Os dispositivos incluídos neste grupo são: câmara de combustão (CC), mistura (M), gerador (GE) e absorvedor (AB).

Os equipamentos deste grupo apresentam mistura de fluxos físicos, os quais trocam massa e exergia. Quando dois fluxos de potenciais exergéticos diferentes se misturam, um terceiro fluxo é formado com potencial exergético intermediário. No capítulo 2 foi discutido e definido por meio das Eqs. (6) e (7) como representar e calcular o fluxo de exergia nesta situação de misturas.

O dispositivo Mistura (M) não é um equipamento produtivo, logo é representado apenas pelos fluxos físicos. Diferentemente do diagrama abrangente, no diagrama produtivo esse dispositivo deve ser unido à outro equipamento produtivo.

A Fig. 61 apresenta os subsistemas com os fluxos físicos e produtivos para os Modelos E, H&S, UFS e UFS+.

7.2.6 Equipamentos Diversos

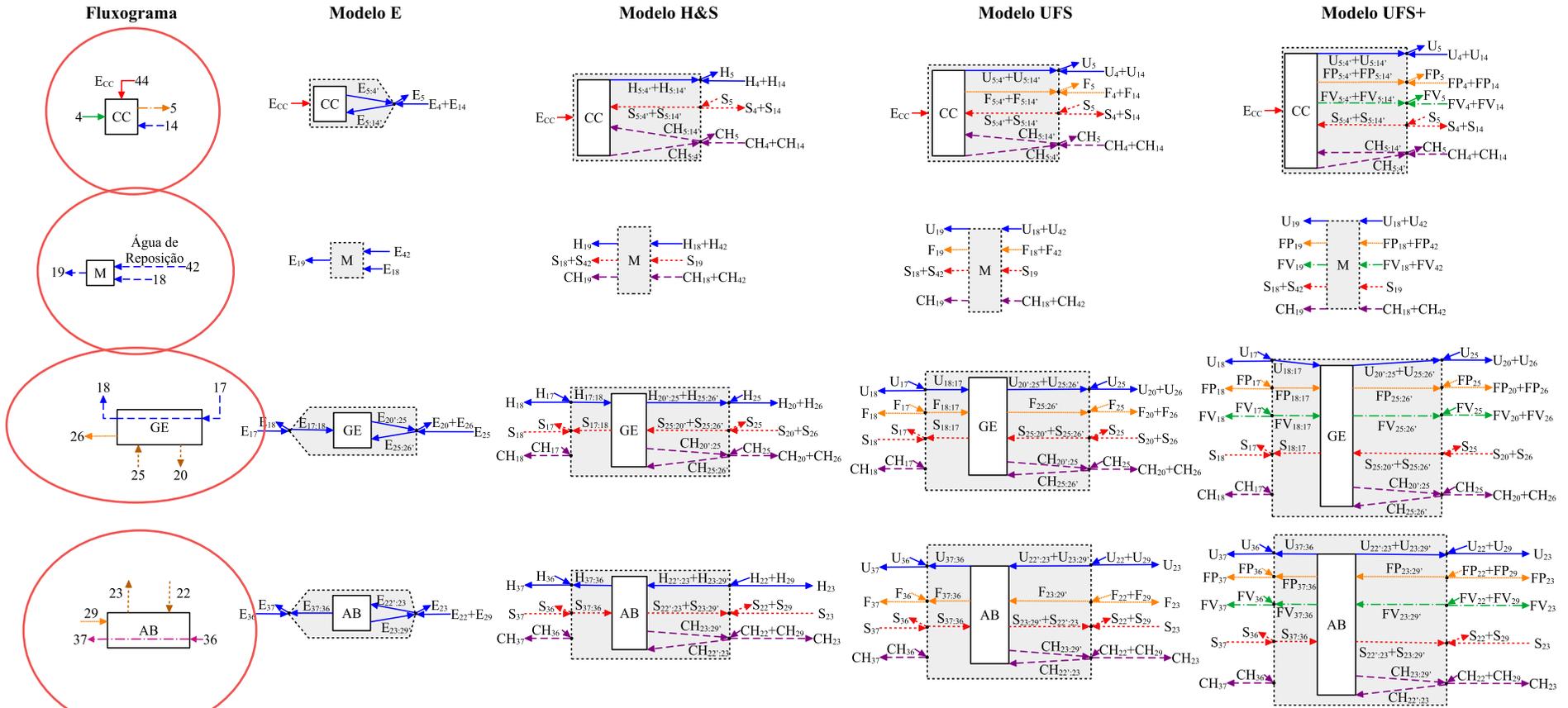
Este grupo é formado por equipamentos diversos que não foram incluídos em outros grupos. Os dispositivos presentes neste grupo são: evaporador (EV), ambiente (AMB), torre de resfriamento (TR) e processo e captura de CO₂ (CO2.PC). A Fig. 62 apresenta os subsistemas com os fluxos físicos e produtivos para os Modelos E, H&S, UFS e UFS+.

O Modelo E não apresenta o dispositivo ambiente (AMB). Desta forma, para o tratamento dos resíduos (fluxo 32 e 58) necessita-se da adoção dos critérios de proporcionalidade. Diferentemente, os Modelos H&S, UFS e UFS+ possuem este dispositivo, sendo o produto do ambiente a entropia, enquanto o insumo são as outras parcelas dos respectivos modelos.

A torre de resfriamento (TR) é um equipamento dissipativo para o Modelo E, além de possuir o fluxo 58 como resíduo. Somente a partir do Modelo H&S que este equipamento define insumo e produto.

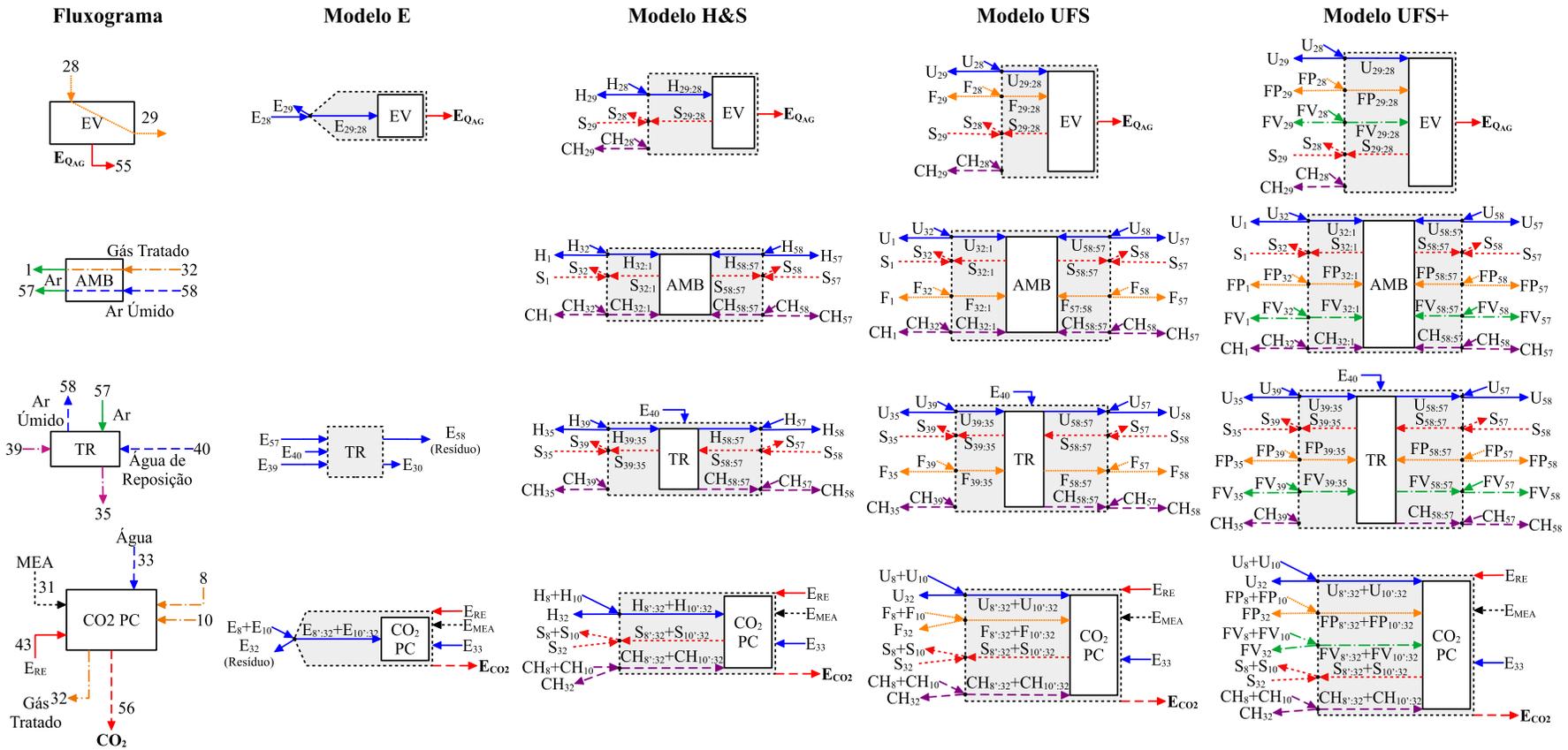
A partir do sistema presente no Carranza Sánchez e Oliveira (2015) foi fechado um volume de controle no Processo e Captura de CO₂ (CO2.PC) para obter os fluxos utilizados nesse processo. Assim, o subsistema elaborado possui como resíduo o fluxo 32 (gás tratado). Os insumos são as exergias do MEA (fluxo 31), da água (fluxo 33), do calor do refeedor (fluxo 43) e os fluxos produtivos dos fluxos 8, 10 e 32. A partir do Modelo H&S o fluxo produtivo da exergia química entre os fluxos de gases (8, 10 e 32) também são considerados insumos. No Modelo E somente o fluxo de CO₂ é considerado produto, enquanto nos Modelos H&S, UFS e UFS+ a entropia também é produto.

Figura 61 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente de equipamentos que envolvam misturas de fluxos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 62 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente de equipamentos diversos.

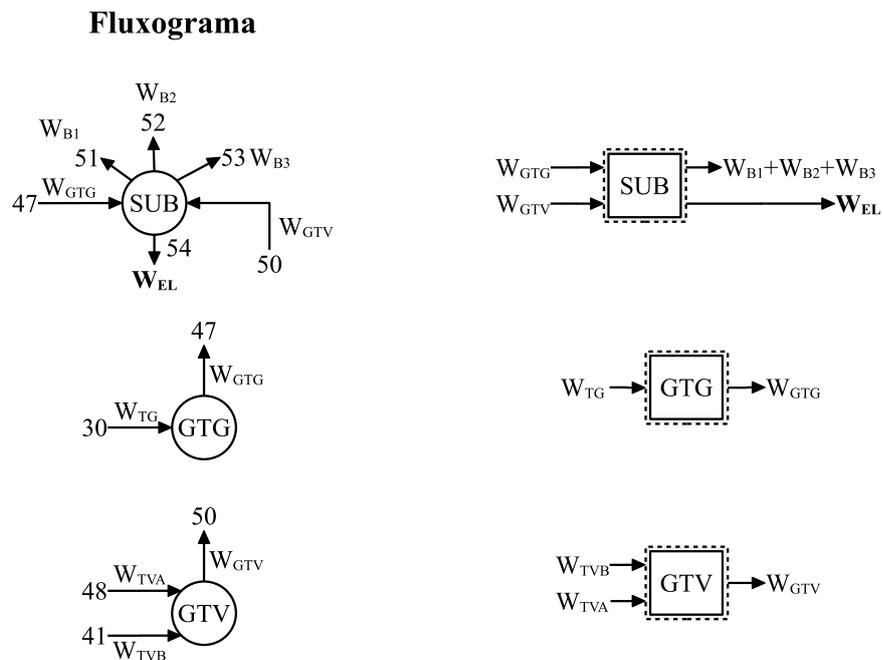


Fonte: Elaborada pelo autor.

7.2.7 Geradores e Subestação

Este grupo é formado por gerador da turbina a gás (GTG), gerador das turbinas a vapor (GTV) e subestação (SUB). Os subsistemas presentes na Fig. 63 possuem apenas fluxos de potências.

Figura 63 – Representação dos subsistemas no diagrama abrangente dos geradores e subestação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

7.3 Análise Comparativa

Por meio do sistema combinado de cogeração com *chiller* por absorção, processo de captura de CO₂ e torre de resfriamento foi mostrado a sistematização proporcionada pelo diagrama abrangente e desagregação da exergia.

Ao observar as figuras dos subsistemas, verificou que os equipamentos dissipativos presentes não foram unidos aos equipamentos produtivos, sendo esses tratados por meio dos fluxos físicos. Dessa maneira, uma sistematização das interconexões dos subsistemas foi alcançada respeitando as ligações existentes na estrutura física, além de remover a arbitrariedade referente as unidades fictícias (junção e bifurcação). No entanto, não foram todos os equipamentos a definirem insumo e produto.

Em relação ao tratamento de resíduo, o Modelo E no diagrama abrangente não permitiu a sistematização do diagrama abrangente, visto que é necessário a escolha de um critério de proporcionalidade para alocar o custo do resíduo. Entretanto, a partir do Modelo H&S, por meio do dispositivo ambiente (AMB), permitiu alocar o custo do resíduo de forma sistemática,

primeiro pela parcela entrópica e em um segundo momento pela parcela entálpica ou demais parcelas dos Modelos UFS e UFS+.

A desagregação da exergia física permitiu o isolamento de equipamentos dissipativos, bem como o tratamento do resíduo. Em contrapartida, foi observado o aumento da complexidade para elaboração dos diagramas como também as equações de balanço de custo, devido ao aumento considerável de fluxos a serem analisados. A Tab. 36 mostra o número de fluxos contidos nos diagramas e equações auxiliares.

Tabela 36 – Números de fluxos e equações auxiliares existentes no diagrama abrangente para cada modelo termoeconômico.

	Modelo Termoeconômico			
	E	H&S	UFS	UFS+
Fluxo Físico	36	108	144	180
Fluxo Produtivo	31	81	122	159
Outros Fluxos	18	18	18	18
Total de Fluxo	85	207	284	357
Equação Auxiliar (Insumo)	13	46	66	93
Equação Auxiliar (Produto)	12	37	55	72
Equação Auxiliar (Outras Regras)	4	4	4	4
Total de Equações Auxiliares	29	87	125	169

Fonte: Produzido pelo autor.

O significado de outros fluxos refere-se aqueles que não foram classificados como fluxos físicos ou produtivos, ou seja, fluxos de potência, exergia do calor, fluxo de CO₂, dentre outros.

A Tab. 36 deixa claro o crescimento da complexidade em relação à desagregação da exergia física. Ao comparar o Modelo UFS+ com o Modelo E, há um aumento de cerca de quatro e seis vezes no número de fluxos e equações auxiliares, respectivamente.

Em suma, o sistema estudado possui 25 equipamentos que envolve equipamentos dissipativos, presença de resíduos, além de misturas de fluidos. Como observado ao longo do capítulo, somente pela utilização do diagrama abrangente há aumento do número de fluxos a serem analisados em relação aos diagramas convencionais. Contudo, o diagrama abrangente mostrou a sistematização das interconexões entre os subsistemas, como também a desagregação da exergia auxilia na sistematização por permitir o isolamento dos equipamentos dissipativos e o tratamento do resíduo. Salvo o Modelo E, devido à presença de resíduo, a qual é necessário a escolha de um critério de proporcionalidade.

8 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma proposta de sistematização do processo de formação de custo na análise termoeconômica por meio do diagrama abrangente e desagregação da exergia física. Alguns pontos limitantes que influenciam a sistematização foram avaliados como o tratamento dos equipamentos dissipativos e resíduos, interconexões dos subsistemas e as unidades fictícias do diagrama produtivo.

O Estudo de Caso I (Capítulo 4), mostrou a arbitrariedade existente nas junções e bifurcações do diagrama produtivo, que dependendo do sistema estudado pode se elaborar diferentes arranjos, isto é, diferentes processos de formação de custo.

Desta forma, uma etapa importante na definição do processo de formação dos custos de um sistema é a definição do insumo e produto, bem como as interligações entre os equipamentos. Em relação à primeiro item foi adotado a metodologia já existente, a qual define por meio da variação de exergia específica ou de suas parcelas específicas. Para solucionar a arbitrariedade das interconexões entre os subsistemas foi selecionado o diagrama abrangente, que possui a característica de utilizar os fluxos físicos para interligar os subsistemas, mostrando também os fluxos produtivos, além de permitir o cálculo dos custos unitários de ambos. De posse dessas informações foi formalizado a representação do subsistema do diagrama abrangente, o qual mostra de forma clara e gráfica o componente com os fluxos físicos e a unidade produtiva com os fluxos produtivos (insumo e produto).

Para exemplo de aplicação do diagrama abrangente, o Estudo de Caso II (capítulo 5) adotou um sistema dual para produção de energia elétrica e água dessalinizada. Além do diagrama abrangente foi utilizado o diagrama físico e produtivo para comparação, assim como a utilização da exergia total e os modelos de desagregação da exergia física ($E^T E^M$, H&S, UFS e UFS+).

A utilização do diagrama abrangente permitiu realizar as interconexões entre os subsistemas conforme apresentado no diagrama físico, por consequência a eliminação das arbitrariedades relacionadas as unidades fictícias, enquanto impõe um significado físico para os fluxos produtivos. Em relação à desagregação da exergia física, os Modelos H&S, UFS e UFS+ foram desenvolvidos inicialmente para serem representados em diagramas produtivos e a aplicação destes modelos no diagrama físico mostrou a necessidade da estrutura produtiva. Somente assim foi possível identificar as equações auxiliares e as equações de balanço de custos necessárias para o sistema de equações.

O Estudo de Caso III (Capítulo 6) avaliou a sistematização do diagrama abrangente e da desagregação da exergia na presença de equipamentos dissipativos e resíduo. O sistema de queima suplementar possuía duas queimas de combustível como um equipamento dissipativo. Foi verificado que o diagrama abrangente apresenta outra vantagem na utilização dos fluxos

físicos, a sistematização do tratamento dos equipamentos dissipativos sem arbitrariedades. Esses não necessitaram da união com outro equipamento produtivo, os quais se mantiveram separados por meio dos fluxos físicos, porém, sem a definição de insumo e produto. Somente com a desagregação da exergia física foi possível o isolamento do equipamento dissipativo, isto é, definição do insumo e produto.

Além do isolamento dos equipamentos dissipativos, a desagregação da exergia também fornece meios para a alocação do custo dos resíduos. Como visto nos Estudo de Casos III e IV, o Modelo E no diagrama abrangente necessita da escolha de um critério de proporcionalidade para alocar o custo do resíduo, ou seja, não é um processo sistemático. Diferentemente do Modelo H&S e suas extensões (UFS e UFS+) o custo dos resíduos é sistematicamente alocado devido à existência do dispositivo meio ambiente (AMB), em sistemas abertos. Desta forma, o custo dos resíduos é alocado a todas as unidades e/ou componentes remanescentes, primeiro e diretamente por meio dos fluxos da parcela entrópica e posteriormente pelos fluxos das parcelas entálpicas, no caso do Modelo H&S.

Como visto, a desagregação da exergia física foi uma solução para alguns limitantes da termoeconomia, tratamento dos equipamentos dissipativos e resíduos. Em contrapartida, a própria desagregação da exergia eleva o número de fluxos a serem analisados no processo de formação de custo, por exemplo, o Modelo E possui apenas 1 fluxo de exergia total, passa para 3, 4 e 5 fluxos nos Modelos H&S, UFS e UFS+, respectivamente, considerando a existência da exergia química. Para evitar esse aumento da complexidade na elaboração do processo de formação de custo foi elaborada a técnica chamada de desagregação localizada. Devido aos subsistemas do diagrama abrangente serem formado por componentes e unidades produtivas com seus respectivos fluxos, foi formalizado um subsistema que ocorre a desagregação da exergia física internamente ao componente. Assim, definiu-se insumo e produto de um equipamento dissipativo sem a necessidade de desagregar todo sistema, porém, há perda de precisão na alocação de custo.

O Estudo de Caso IV (Capítulo 7) foi elaborado para verificar os fatores que interferem no processo de formação de custo em sistemas complexos. Para isso, foi criado um sistema que era composto por ciclos de potência, refrigeração e um processo de captura de CO₂. Entre estes ciclos e processos havia a troca de massa e energia. O diagrama abrangente sistematizou as interconexões entre os subsistemas, bem como manteve separado os equipamentos dissipativos sem a necessidade de união. A aplicação da desagregação da exergia além de definir insumo e produto, permitiu o tratamento dos resíduos de forma sistemática sem a necessidade de escolha do critério de proporcionalidade.

Portanto, os estudos de casos mostraram que a escolha do diagrama e do modelo de desagregação de exergia são importantes para determinação do processo de formação de custos dos produtos, pois, podem tornar o processo sistemático, além de proporcionar redução da arbitrariedade ou da interferência do analista. Nesse sentido, o diagrama abrangente com o

Modelo H&S ou suas extensões (UFS e UFS+) são as melhores soluções, visto que tornou o processo de formação de custo sistemático, eliminou a arbitrariedade das interligações, isolou os equipamentos dissipativos, e alocou o custo dos resíduos sem a necessidade de metodologias adicionais. No caso do Modelo E aplicado no diagrama abrangente é recomendado somente quando o sistema não possuir equipamento dissipativo e/ou resíduos. Para reduzir a complexidade gerada pelo próprio diagrama e pela desagregação da exergia, a técnica de desagregação localiza é a melhor alternativa, porém, perde precisão na alocação de custo.

Como sugestões de trabalho futuros:

- Desenvolver uma ferramenta computacional baseado no diagrama abrangente e na desagregação de exergia que permite analisar o custo exergético e monetário de qualquer sistema.
- Realizar análise termoeconômica com custos monetários e custos ambientais.
- Avaliar o diagrama abrangente na otimização e diagnóstico.

REFERÊNCIAS

- ABUSOGLU, A.; KANOGLU, M. Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 9, p. 2295–2308, jan 2009. ISSN 13640321.
- AGAZZANI, A.; MASSARDO, A. F. A Tool for Thermo-economic Analysis and Optimization of Gas, Steam, and Combined Plants. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 119, n. 4, p. 885, 1997. ISSN 07424795.
- AGUDELO, A.; VALERO, A.; TORRES, C. Allocation of waste cost in thermo-economic analysis. *Energy*, v. 45, n. 1, p. 634–643, sep 2012. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.034><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544212005646>>.
- ARAÚJO, L. R. de et al. On the effects of thermodynamic assumptions and thermo-economic approaches for optimization and cost allocation in a gas turbine cogeneration system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, n. 6, p. 323, jun 2020. ISSN 1678-5878.
- ARENA, A. P.; BORCHIELLINI, R. Application of different productive structures for thermo-economic diagnosis of a combined cycle power plant. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 38, n. 7, p. 601–612, jul 1999. ISSN 12900729. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0035315999800403>>.
- AVELLAR, L. M. de et al. A Comprehensive Thermo-economic Diagram Based on Both Subsystem Productive Purposes and Physical Connections. In: *ENCIT 2018 proceedings of the 7th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. Águas de Lindóia, SP: ABCM, 2018.
- AVELLAR, L. M. de et al. Comprehensive Thermo-economic Diagram for the Thermal System Cost Assessment using Physical and Productive Internal Flows. In: *ECOS 2018 Proceedings of the 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Guimarães: [s.n.], 2018.
- BARONE, M. A. et al. Arbitrariness and Waste Cost Treatment of a Cogeneration System with Intercooler and Supplementary Firing. In: *Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Taormina - Italy: [s.n.], 2021.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. *Thermal Design and Optimization*. New York: Wiley, 1996. 542 p. ISBN 978-0-471-58467-4. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Design+and+Optimization-p-9780471584674>>.
- Carranza Sánchez, Y. A.; OLIVEIRA, S. de. Exergy analysis of offshore primary petroleum processing plant with CO₂ capture. *Energy*, v. 88, p. 46–56, aug 2015. ISSN 03605442.
- CARVALHO, M. et al. Alocação em sistemas energéticos multiproduto: revisão e proposta de métodos. *LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida*, v. 4, p. e44660, jul 2020. ISSN 2527-0184. Disponível em: <<http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/4660>>.

CERQUEIRA, S. A. A. G. *Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas [in Portuguese]*. Tese (PhD Dissertation) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

CERQUEIRA, S. A. A. G.; NEBRA, S. A. Cost attribution methodologies in cogeneration systems. *Energy Conversion and Management*, v. 40, n. 15-16, p. 1587–1597, feb 1999. ISSN 01968904.

COLOMBO, D. C. *Melhoria na precisão dos resultados em termoeconomia devido à desagregação da exergia e construção racional do diagrama produtivo [MSc dissertation in portuguese]*. 204 p. Tese (MSc dissertation) — Federal University of Espírito Santo, 2016.

COLOMBO, D. C. et al. On the Physical Exergy Disaggregation Levels for the Isolation of Dissipative Components in the Thermoeconomic Productive Diagrams. In: *COBEM 2017 - 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. Curitiba: [s.n.], 2017.

DENISE, L.-M. H. et al. An Irreversibility-Based Criterion to Determine the Cost Formation of Residues in a Three-Pressure-Level Combined Cycle. *Entropy*, v. 22, n. 3, p. 299, mar 2020. ISSN 1099-4300. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1099-4300/22/3/299>>.

DINCER, I.; ROSEN, M. M. A. *Exergy : Energy, Environment and Sustainable Development*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 2013. 571 p. ISBN 9780080970899.

EL-SAYED, Y. M. *The thermoeconomics of energy conversions*. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2003. 264 p. ISBN 978-0-08-044270-9.

EL-SAYED, Y. M.; EVANS, R. B. Thermoeconomics and the Design of Heat Systems. *Journal of Engineering for Power*, v. 92, n. 1, p. 27–35, 1970. ISSN 0742-4795. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.3445296>>.

EL-SAYED, Y. M.; GAGGIOLI, R. A. A Critical Review of Second Law Costing Methods—I: Background and Algebraic Procedures. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 111, n. 1, p. 1, 1989. ISSN 01950738.

ERLACH, B.; SERRA, L.; VALERO, A. Structural theory as standard for thermoeconomics. *Energy Conversion and Management*, v. 40, n. 15-16, p. 1627–1649, jan 1999. ISSN 01968904.

FARIA, P. R. *Uma Avaliação das Metodologias de Desagregação da Exergia Física para a Modelagem Termoeconômica de Sistemas (dissertação de mestrado - engenharia mecânica)*. 157 p. Tese (Dissertação) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

FARIA, P. R. et al. *On the Allocation of Residues Cost using Conventional and Comprehensive Thermoeconomic Diagrams*. 2021. 134–149 p. Disponível em: <<https://dergipark.org.tr/en/doi/10.5541/ijot.878173>>.

FARIA, P. R. et al. On the Allocation of Residues Cost in Thermoeconomics using a Comprehensive Diagram. In: *ECOS 2020 proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Osaka, Japan: [s.n.], 2020. p. 2444–2456.

FRANGOPOULOS, C. A. *Thermoeconomic functional analysis: A method for Optimal Design or improvement of Complex Thermal Systems*. Tese (Doutorado) — Georgia Institute of Technology, 1983.

FRANGOPOULOS, C. A. Thermo-economic functional analysis and optimization. *Energy*, v. 12, n. 7, p. 563–571, jan 1987. ISSN 03605442.

FRANGOPOULOS, C. A. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 323–342, jan 1994. ISSN 03605442.

FRANGOPOULOS, C. A. *Methods of energy systems optimization, Department of Naval Architecture and Marine Engineering*. [S.l.]: National Technical University of Athens, 2003.

GAGGIOLI, R. A. (Ed.). *Thermodynamics: Second Law Analysis*. WASHINGTON, D. C.: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1980. v. 122. (ACS Symposium Series, v. 122). ISBN 0-8412-0541-8.

GAGGIOLI, R. A. (Ed.). *Efficiency and Costing: Second Law Analysis of Processes*. WASHINGTON, D.C.: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1983. v. 235. (ACS Symposium Series, v. 235). ISBN 0-8412-0811-5.

GAGGIOLI, R. A.; WEPFER, W. J. Exergy economics. *Energy*, v. 5, n. 8-9, p. 823–837, aug 1980. ISSN 03605442.

HERNANDES, T. A. D.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. E. A. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 8, n. 2, p. 241–252, mar 2014. ISSN 1932104X. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.1454>>.

HERNÁNDEZ, V. H. R. *Thermoeconomic Diagnosis of Large Industrial Boilers: Microscopic Representation of the Exergy Cost Theory*. 403 p. Tese (Doutorado) — Universidad de Zaragoza, 2005.

KOTAS, T. J. Exergy concepts for thermal plant. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 2, n. 3, p. 105–114, sep 1980. ISSN 0142727X.

KOTAS, T. J. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. 2nd. ed. [S.l.]: Elsevier, 1985. ISBN 9780408013505.

LAZZARETTO, A.; MACOR, A. Direct Calculation of Average and Marginal Costs From the Productive Structure of an Energy System. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 117, n. 3, p. 171–178, sep 1995. ISSN 0195-0738.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. On the Quest for Objective Equations in Exergy Costing. In: *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division*. [S.l.]: ASME, 1997. v. 37, p. 197–210.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, v. 31, n. 8-9, p. 1257–1289, jul 2006. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544205000630>>.

LOURENÇO, A. B. *Uma Nova Abordagem Termoeconômica para o Tratamento de Equipamentos Dissipativos [in Portuguese]*. Tese (MSc Thesis) — Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2012.

LOURENÇO, A. B. *Uma Abordagem Termoeconômica Sistemática para Modelagem de Ciclos Termodinâmicos [in Portuguese]*. 104 p. Tese (PhD Dissertation) — Federal University of ABC, Santo André, 2016.

LOURENÇO, A. B.; NEBRA, S. A.; SANTOS, J. J. C. S. Another Perspective on the Physical Exergy of a Flow. In: *ECOS 2014 proceedings of the 27th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Turku: [s.n.], 2014.

LOZANO, M.; VALERO, A. Theory of the exergetic cost. *Energy*, v. 18, n. 9, p. 939–960, sep 1993. ISSN 03605442.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems. *ASME, NEW YORK, NY,(USA)*, v. 30, p. 311–320, 1993.

LOZANO, M. A.; VALERO, A.; SERRA, L. M. Theory of Exergetic Cost and Thermoeconomic Optimization. In: SZARGUT, J. et al. (Ed.). *Energy Systems and Ecology*. Cracow, Poland: ENSEC '93: energy systems and ecology : proceedings of the international conference, 1993. v. 1, p. 339–350.

MODESTO, M.; NEBRA, S. Analysis of a repowering proposal to the power generation system of a steel mill plant through the exergetic cost method. *Energy*, v. 31, n. 15, p. 3261–3277, dec 2006. ISSN 03605442.

MOROSUK, T.; TSATSARONIS, G. Graphical models for splitting physical exergy. In: TSATSARONIS, G. et al. (Ed.). *ECOS 2005 proceedings of the 18th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems*. Trondheim, Norway: Tapir Academic Press, 2005. p. 377–384.

MOROSUK, T.; TSATSARONIS, G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. *Energy*, v. 33, n. 6, p. 890–907, jun 2008. ISSN 03605442.

OROZCO, D. J. R. et al. A new methodology of thermodynamic diagnosis, using the thermoeconomic method together with an artificial neural network (ANN): A case study of an externally fired gas turbine (EFGT). *Energy*, v. 123, p. 20–35, mar 2017. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054421631903X>>.

Pacheco Ibarra, J. et al. Hybrid Fuel Impact Reconciliation Method: An integral tool for thermoeconomic diagnosis. *Energy*, v. 35, n. 5, p. 2079–2087, may 2010. ISSN 03605442.

PAULUS, D.; TSATSARONIS, G.; MOROSUK, T. An Overview of Methods for Splitting Physical Exergy. In: RIVERO, R.; MONROY, L.; TSATSARONIS, G. (Ed.). *ECOS 2004 proceedings of the 17th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems*. Guanajuato, Mexico: Instituto Mexicano del Petróleo, 2004. p. 787–799.

SANTOS, J. J. C. S. *Aplicação da Neguentropia na Modelagem Termoeconômica de Sistemas [in Portuguese]*. 140 p. Tese (PhD Dissertation) — Federal University of Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0034940.pdf>>.

SANTOS, J. J. C. S. et al. A new and general methodology for calculating efficiency and cost in thermoeconomics. In: *ECOS 2010 proceedings of the 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. [S.l.: s.n.], 2010.

SANTOS, J. J. C. S.; NASCIMENTO, M. A. R.; LORA, E. E. S. On The Thermo-economic Modeling for Cost Allocation in a Dual-Purpose Power and Desalination Plant. In: *ECOS 2006 proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Creta: [s.n.], 2006. p. 441–448.

SANTOS, J. J. C. S. et al. On the Productive Structure for the Residues Cost Allocation in a Gas Turbine Cogeneration Plant. In: *ECOS 2008 - Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 2, p. 641–648. ISBN 978-83-922381-4-0.

SANTOS, J. J. C. S. et al. On the Negentropy Application in Thermo-economics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? *International Journal of Thermodynamics*, v. 12, n. 4, p. 163–176, 2009.

SANTOS, J. J. C. S. et al. On the treatment of dissipative components and residues in thermo-economic modeling. In: *ECOS 2009 proceedings of the 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil: [s.n.], 2009.

SANTOS, R. G. et al. On the Thermo-economic Diagnosis through the Localized Physical Exergy Disaggregation for Dissipative Component Isolation. In: *Proceedings of Ecos 2021 - The 34th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Taormina - Italy: [s.n.], 2021.

SANTOS, R. G. et al. On the localized physical exergy disaggregation for dissipative component isolation in thermo-economics. In: *Proceedings of ENCIT 2020: 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. (online): [s.n.], 2020.

SANTOS, R. G. et al. On the Localized Physical Exergy Disaggregation for Dissipative Component Isolation in Thermo-economics. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 19, n. 2, p. 63, dec 2020. ISSN 1676-1790. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/reterm/article/view/78618>>.

SERRA, L. M. *Optimización exergoeconómica de Sistemas Térmicos*. 213 p. Tese (PhD Dissertation) — Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994.

SEYYEDI, S. M.; AJAM, H.; FARAHAT, S. A new criterion for the allocation of residues cost in exergoeconomic analysis of energy systems. *Energy*, v. 35, n. 8, p. 3474–3482, aug 2010. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210002550>>.

SPAKOVSKY, M. R. von. *A practical generalized analysis approach to the optimal thermo-economic design and improvement of real-world thermal systems*. Tese (PhD Dissertation) — Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1986.

SPAKOVSKY, M. R. von. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 343–364, jan 1994. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0360544294901155>>.

SPAKOVSKY, M. R. von; EVANS, R. B. The Design and Performance Optimization of Thermal System Components. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 111, n. 4, p. 231, 1989. ISSN 01950738.

SPAKOVSKY, M. R. von; EVANS, R. B. The Design and Performance Optimization of Thermal Systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 112, n. 1, p. 86–93, jan 1990. ISSN 0742-4795.

- SZARGUT, J. International progress in second law analysis. *Energy*, v. 5, n. 8-9, p. 709–718, aug 1980. ISSN 03605442.
- TORRES, C. et al. The productive structure and thermoeconomic theories of system optimization. In: *ME'96: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAN'96)*. [S.l.: s.n.], 1996.
- TORRES, C.; VALERO, A. *Curso de Doctorado Termoeconomía, Dpto. Ingeniería Mecánica*. [S.l.]: Universidad de Zaragoza, 2000.
- TORRES, C.; VALERO, A. A new methodology to compute Exergy Cost Part I: The Flow-Process Table. In: *Proceedings of Ecos 2018 - The 31st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Guimarães, Portugal: [s.n.], 2018.
- TORRES, C.; VALERO, A. The Exergy Cost Theory Revisited. *Energies*, v. 14, n. 6, p. 1594, mar 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/6/1594>>.
- TORRES, C.; VALERO, A.; PEREZ, E. Guidelines to develop software for thermoeconomic analysis of energy systems. In: MIRANDOLA, A.; ARNAS, O.; LAZZARETTO, A. (Ed.). *ECOS 2007 proceedings of the 20th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Padova, Italy: [s.n.], 2007.
- TORRES, C. et al. On the cost formation process of the residues. *Energy*, v. 33, n. 2, p. 144–152, feb 2008. ISSN 03605442. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544207001089>>.
- TSATSARONIS, G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 19, n. 3, p. 227–257, jan 1993. ISSN 03601285.
- TSATSARONIS, G.; LIN, L. On exergy costing in exergoeconomics. In: TSATSARONIS, G. et al. (Ed.). *Proceedings of the ASME Aided Energy Systems Analysis*. New York: ASME, 1990. v. 21, p. 1–11.
- TSATSARONIS, G.; PISA, J. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems - application to the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 287–321, jan 1994. ISSN 03605442.
- TSATSARONIS, G.; WINHOLD, M. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants—I. A new general methodology. *Energy*, v. 10, n. 1, p. 69–80, jan 1985. ISSN 03605442.
- UCHE, J. *Thermoeconomic Analysis and Simulation of a Combined Power and Desalination Plant [thesis]*. Tese (Doutorado), Zaragoza, 2000.
- VALERO, A.; LOZANO, M. A.; MUNOZ, M. ASME Book. *A general theory of exergy saving: I. On the exergetic cost*. New York: Gaggioli, RA., 1986. v. 2-3. 1–22 p.
- VALERO, A. et al. Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 365–381, feb 1994.
- VALERO, A. et al. CGAM problem: Definition and conventional solution. *Energy*, v. 19, n. 3, p. 279–286, jan 1994. ISSN 03605442.

VALERO, A.; SERRA, L.; UCHE, J. Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part I: Theory. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 128, n. 1, p. 1–8, 2006. ISSN 0195-0738.

VALERO, A.; TORRES, C.; SERRA, L. A general theory of thermoeconomics: Part I - Structural analysis. In: VALERO, A. (Ed.). *ECOS 1992 - Proceedings of the International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Zaragoza: [s.n.], 1992. p. 137–145.

WANG, Y.; LIOR, N. Fuel allocation in a combined steam-injected gas turbine and thermal seawater desalination system. *Desalination*, v. 214, n. 1-3, p. 306–326, aug 2007. ISSN 00119164. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.001><http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011916407003712>>.