

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Diagnóstico Termoeconômico de uma
Central de Cogeração do Setor Siderúrgico
utilizando o Modelo H&S**

Tarley Rezende Secchin

Vitória, Junho de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Diagnóstico Termoeconômico de uma
Central de Cogeração do Setor Siderúrgico
utilizando o Modelo H&S**

Autor: Tarley Rezende Secchin

Orientador: Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos

Vitória, Junho de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Diagnóstico Termoeconômico de uma
Central de Cogeração do Setor Siderúrgico
utilizando o Modelo H&S**

Autor: Tarley Rezende Secchin

Orientador: Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Ciências Mecânicas

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Vitória, Junho de 2015

E.S - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Diagnóstico Termoeconômico de uma
Central de Cogeração do Setor Siderúrgico
utilizando o Modelo H&S**

Autor: **Tarley Rezende Secchin**

Orientador: **Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos**

Composição da banca examinadora:

Prof. Dr. José Carlos Escobar Palacio – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. João Luiz Marcon Donatelli – DEM/UFES

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos – DEM/UFES

Dedicatória

Aos meus familiares, amigos e colegas de trabalho que estiveram comigo durante este trabalho.

Agradecimentos

A Deus, sempre em primeiro lugar, por ter me protegido e guiado durante toda essa caminhada e por ter me permitido chegar ao fim de mais este desafio.

A minha esposa Ranielly, por toda compreensão e paciência durante o tempo investido nesta dissertação.

Ao meu filho Arthur, pela minha ausência nos momentos investidos nesta dissertação e por me proporcionar momentos de plena alegria em meio a este grande desafio.

Aos meus pais, irmã e demais familiares que sempre me apoiaram para a conclusão deste trabalho.

Aos professores e amigos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, principalmente ao meu Orientador, José Joaquim, por toda dedicação, orientações e por sua disponibilidade que foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, que sempre estiveram comigo me apoiando e dando o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos meus gestores Jorge Luiz Mattos Bittencourt, José Leal Neto e Fabricio Victor de Assis que entendendo a importância e o tamanho deste desafio, me apoiaram para a conclusão do mesmo.

A ArcelorMittal Tubarão pelo apoio incondicional para a sua conclusão.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma participaram desta etapa, mesmo que porventura, sequer notaram que contribuíram.

“O único lugar que o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”

Albert Einstein

Resumo

SECCHIN, T. R. (2015), *Diagnóstico Termoeconômico de uma Central de Cogeração do Setor Siderúrgico utilizando o Modelo H&S*, Vitória, 199p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.

O Diagnóstico é a arte de descobrir e entender sinais de Malfunções e quantificar seus efeitos. No caso do Diagnóstico Termoeconômico, o efeito da Malfunção é quantificado em termos de recursos adicionais consumidos para obter a mesma produção, ambos em qualidade e quantidade. Este trabalho possui como objetivo a realização de Diagnóstico Termoeconômico de uma Central de Cogeração do setor Siderúrgico utilizando o modelo H&S. Adicionalmente, os resultados obtidos com a utilização do modelo H&S são comparados com os resultados obtidos com a utilização dos modelos E e E&S para verificar as vantagens na aplicação do modelo H&S no desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos. Trata-se de uma central de cogeração operando em ciclo Rankine, com três aquecedores regenerativos de alimentação fechados e um aberto, cuja função é atender as demandas de energia mecânica (ar comprimido), energia elétrica e energia térmica (vapor de processo) da usina. O Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do estudo de caso desta dissertação foi realizado através do Modelo Termoeconômico H&S com o intuito de determinar as Malfunções do ciclo, verificando assim as anomalias presentes nos componentes do sistema e a contribuição de cada equipamento no consumo adicional de insumos. Os resultados obtidos foram analisados considerando aspectos gerais da Termodinâmica, Termoeconomia e da Cogeração que permitiram o cálculo de eficiências, destruições de exergia nos equipamentos e indicadores de desempenho da planta. O modelo Termoeconômico utilizado ainda não tinha sido aplicado em Diagnósticos Termoeconômicos em plantas reais e de maior complexidade, e portanto este trabalho apresenta metodologia e análise da aplicação deste modelo no Diagnóstico Termoeconômico.

Palavras-chave

Diagnóstico Termoeconômico, Modelo H&S, Termoeconomia, Cogeração, Setor Siderúrgico.

Abstract

SECCHIN, T. R. (2015), *Thermoeconomic Diagnosis of a Cogeneration Plant inside the Steel Plant using the H&S Model*, Vitória, 199p. M.Sc. Dissertation – Technological Center, Federal University of Espírito Santo.

The Diagnosis is the analysis that allows to discover and understand signals of malfunction and quantify its effects. In Thermoeconomic Diagnosis, the effect of malfunction is quantified in terms of additional resources consumed in order to get the same production in both quality and quantity. This work aims to make a Thermoeconomic Diagnosis of a cogeneration plant inside a Steel Plant using the H&S model. Additionally, the results obtained using the H&S model are compared with the results obtained with the use of models E and E&S to verify the advantages in applying the H&S model in the development of Thermoeconomic Diagnosis. It's a cogeneration plant operating on rankine cycle, with three closed feed water heaters and one open feed water heater, whose function is to attend the demands of mechanical energy (compressed air), electrical and thermal energy (process steam). The Thermoeconomic Diagnosis of the thermal system of this work was applied using H&S model in order to determine the anomalies in the system's components and the contribution of every equipment in additional input consumption. The results were analyzed considering general aspects of Thermodynamics, Thermoeconomy and cogeneration that allowed calculating the efficiencies, exergy destruction in equipment and performance indicators of the plant. The Thermoeconomic model used hadn't been applied in Thermoeconomic Diagnosis in real plants with more complexity, hence this paper presents the methodology and analysis of this models application in Thermoeconomic Diagnosis.

Key-words

Thermoeconomic Diagnosis, H&S Model, Thermoeconomy, Cogeneration, Steel Plant.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
SIMBOLOGIA.....	xiv
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Termoeconomia	3
1.2 Motivação.....	7
1.3 Objetivos e Alcance da Dissertação.....	14
1.4 Estrutura da Dissertação.....	15
CAPÍTULO 2	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO.....	17
2.1 Análise Quantitativa de Causalidade	17
2.2 Temperatura de Dissipação	19
2.3 Termocaracterização	20
2.4 Técnicas de Inteligência Artificial.....	22
2.4.1 Redes Neurais	23
2.4.2 Lógica Fuzzy	24
2.4.3 Filtro de Kalman.....	25
2.4.4 Rede Bayesian.....	25
2.4.5 Algoritmos Genéticos.....	26
2.5 Reconciliação.....	27
2.6 Termoeconômico.....	28
CAPÍTULO 3	
DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO	33
3.1 Conceitos Gerais do Diagnóstico Termoeconômico	33
3.2 Aplicação do Diagnostico Termoeconômico para um caso simples.....	40
3.2.1 Diagnóstico Termoeconômico considerando redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV) (Anomalia 1).....	43
3.2.1.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 1)	44
3.2.1.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 1).....	53
3.2.1.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 1).....	54
3.2.2 Diagnóstico Termoeconômico considerando redução de 10% da eficiência isentrópica da Turbina a vapor (TV) (Anomalia 2).....	54
3.2.2.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 2)	57

3.2.2.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 2).....	58
3.2.2.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 2).....	60
3.2.3 Diagnóstico Termoeconômico considerando redução de 10% da eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B) (Anomalia 3)	63
3.2.3.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 3)	65
3.2.3.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 3).....	67
3.2.3.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 3).....	69
3.2.4 Diagnóstico Termoeconômico considerando aumento de 10% da pressão de vácuo do condensador (C) (Anomalia 4).....	71
3.2.4.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 4)	73
3.2.4.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 4).....	75
3.2.4.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 4).....	76
3.2.5 Diagnóstico Termoeconômico considerando as anomalias 1, 2, 3 e 4 juntas (Anomalia 5).....	78
3.2.5.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 5)	81
3.2.5.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 5).....	83
3.2.5.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 5).....	84
CAPÍTULO 4	
DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO DA PLANTA DO ESTUDO DE CASO.....	87
4.1 Estrutura Física	93
4.2 Estrutura Produtiva.....	95
4.2.1 Estrutura Produtiva do modelo E.....	95
4.2.2 Estrutura Produtiva do modelo E&S.....	99
4.2.3 Estrutura Produtiva do modelo H&S	103
4.3 Diagnóstico Termoeconômico da planta do estudo de caso.....	107
4.3.1 Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo E.....	107
4.3.2 Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo E&S.....	126
4.3.3 Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo H&S	129
CAPÍTULO 5	
DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	133
CAPÍTULO 6	
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	136
REFERÊNCIAS.....	138
APENDICÊ A	
RESULTADOS DAS ETAPAS DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO DO SISTEMA TÉRMICO DO EXEMPLO	146
APENDICÊ B	
RESULTADOS DAS ETAPAS DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO DO ESTUDO DE CASO.....	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Matriz de Energia Elétrica do Brasil.....	2
Figura 1.2: Estrutura Física do Ciclo Rankine de Potência.....	8
Figura 1.3: Estrutura Produtiva do Ciclo Rankine de Potência usando Exergia Total (Modelo E)	8
Figura 1.4: Estrutura Produtiva do Ciclo Rankine usando Exergia Total e Neguentropia (Modelo E&S)	10
Figura 1.5: Estrutura Produtiva do Ciclo Rankine usando Entalpia e Neguentropia (Modelo H&S)	13
Figura 2.1: Variação do parâmetro θ para um componente com e sem anomalia	19
Figura 2.2: Representação da variação de entalpia e entropia em um equipamento genérico....	21
Figura 2.3: Representação do estado de referência em função da variação de entropia,	22
Figura 3.1: Estrutura física de um ciclo Brayton de cogeração	34
Figura 3.2: Representação de junção (esquerda) e bifurcação (direita).	35
Figura 3.3: Estrutura produtiva de um ciclo Brayton de cogeração.....	35
Figura 3.4: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1).....	52
Figura 3.5: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1).....	53
Figura 3.6: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2).....	58
Figura 3.7: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2).....	58
Figura 3.8: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2).....	60
Figura 3.9: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2).....	60
Figura 3.10: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2).....	61
Figura 3.11: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)	62
Figura 3.12: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)	66
Figura 3.13: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3).....	67
Figura 3.14: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)	68
Figura 3.15: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3).....	69
Figura 3.16: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3).....	70
Figura 3.17: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)	70
Figura 3.18: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)	74

Figura 3.19: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4).....	75
Figura 3.20: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)	76
Figura 3.21: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4).....	76
Figura 3.22: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4).....	77
Figura 3.23: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)	77
Figura 3.24: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)	81
Figura 3.25: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5).....	82
Figura 3.26: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)	83
Figura 3.27: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5).....	84
Figura 3.28: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5).....	85
Figura 3.29: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)	85
Figura 4.1: Etapas básicas para se construir um modelo de simulação no thermoflex®	87
Figura 4.2: Simulação no thermoflex® da central de cogeração siderúrgica.....	89
Figura 4.3: Estrutura Física da planta do estudo de caso	94
Figura 4.4: Estrutura Produtiva da central de cogeração segundo o Modelo E.....	96
Figura 4.5: Estrutura Produtiva da central de cogeração segundo o Modelo E&S.....	101
Figura 4.6: Estrutura Produtiva da central de cogeração segundo o Modelo H&S	104
Figura 4.7: Aumento do consumo do combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	125
Figura 4.8: Análise do consumo adicional de combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	125
Figura 4.9: Aumento do consumo do combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S).....	128
Figura 4.10: Análise do consumo adicional de combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S).....	128
Figura 4.11: Aumento do consumo do combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)	132
Figura 4.12: Análise do consumo adicional de combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S).....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência (condição de referência)	40
Tabela 3.2: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência (condição de referência)	41
Tabela 3.3: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência (condição de Referência)	41
Tabela 3.4: Valores de eficiência dos equipamentos (condição de Referência)	41
Tabela 3.5: Etapas para realização do Diagnóstico Termoeconômico	43
Tabela 3.6: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 1)	44
Tabela 3.7: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 1)	45
Tabela 3.8: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 1)	46
Tabela 3.9: Matriz F-P para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E	46
Tabela 3.10: Matriz F-P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	46
Tabela 3.11: Matriz KP para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E	47
Tabela 3.12: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	47
Tabela 3.13: Matriz unitária U_D do Ciclo Rankine de potência para o modelo E	48
Tabela 3.14: Matriz do operador produto $ P\rangle$ para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E	48
Tabela 3.15: Matriz do operador produto $ P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	48
Tabela 3.16: Matriz do operador de irreversibilidade $ I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	49
Tabela 3.17: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 1) para o exemplo utilizando o modelo E	49
Tabela 3.18: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	50
Tabela 3.19: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	50
Tabela 3.20: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	51
Tabela 3.21: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)	51
Tabela 3.22: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)	53

Tabela 3.23: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)	54
Tabela 3.24: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 2).....	55
Tabela 3.25: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 2)	55
Tabela 3.26: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 2)	56
Tabela 3.27: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2).....	57
Tabela 3.28: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2).....	59
Tabela 3.29: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)	61
Tabela 3.30: Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 2	62
Tabela 3.31: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 3).....	63
Tabela 3.32: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 3)	64
Tabela 3.33: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 3)	65
Tabela 3.34: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3).....	66
Tabela 3.35: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3).....	68
Tabela 3.36: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)	69
Tabela 3.37: Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 3	71
Tabela 3.38: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 4).....	71
Tabela 3.39: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 4)	72
Tabela 3.40: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 4)	73
Tabela 3.41: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (anomalia 4).....	74
Tabela 3.42: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4).....	75
Tabela 3.43: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)	77
Tabela 3.44: Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 4	78
Tabela 3.45: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 5).....	79
Tabela 3.46: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 5)	79
Tabela 3.47: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 5)	80

Tabela 3.48: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (anomalia 5).....	81
Tabela 3.49: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5).....	82
Tabela 3.50: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5).....	83
Tabela 3.51: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5).....	84
Tabela 3.52: Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 5.....	86
Tabela 4.1: Características dos gases siderúrgicos.....	90
Tabela 4.2: Composição química do BFG.....	91
Tabela 4.3: Composição química do COG.....	91
Tabela 4.4: Composição química do LDG.....	92
Tabela 4.5: Valores de exergia dos fluxos físicos do sistema térmico do estudo de caso.....	98
Tabela 4.6: Valores de neguentropia dos fluxos físicos do sistema térmico do estudo de caso.....	102
Tabela 4.7: Valores de entalpia dos fluxos físicos do sistema térmico do estudo de caso.....	105
Tabela 4.8: Condição de queima dos combustíveis siderúrgicos.....	106
Tabela 4.9: Consumo elétrico auxiliar dos equipamentos nas condições de referência e de teste.....	106
Tabela 4.10: Condição de referência do sistema térmico do estudo de caso.....	108
Tabela 4.11: Condição de teste do sistema térmico do estudo de caso.....	109
Tabela 4.12: Matriz F-P para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	110
Tabela 4.13: Matriz F-P para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	111
Tabela 4.14: Matriz KP para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	112
Tabela 4.15: Matriz KP para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	113
Tabela 4.16: Matriz unitária U_D do estudo de caso (modelo E).....	114
Tabela 4.17: Matriz do operador produto $ P\rangle$ para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	116
Tabela 4.18: Matriz do operador produto $ P\rangle$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	117
Tabela 4.19: Matriz do operador de irreversibilidade $ I\rangle$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	118
Tabela 4.20: Tabela do consumo exergético unitário nas condições de referência e teste para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	119
Tabela 4.21: Matriz $\Delta(KP)$ para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	120
Tabela 4.22: Matriz das malfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	122
Tabela 4.23: Matriz das disfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	123
Tabela 4.24: Matriz do consumo adicional do combustível (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E).....	124
Tabela 4.25: Tabela do consumo exergético unitário nas condições de referência e teste para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S).....	126
Tabela 4.26: Matriz do consumo adicional do combustível (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S).....	127
Tabela 4.27: Tabela do consumo exergético unitário nas condições de referência e teste para o sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S).....	129

Tabela 4.28: Matriz do consumo adicional do combustível (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S).....	131
Tabela 5.1: Comparação do consumo exergético unitário e do consumo adicional dos equipamentos entre os modelos E, E&S e H&S	134

SIMBOLOGIA

Maiúsculas

E	Exergia total de um fluxo físico
F	Insumo
H	Entalpia total de um fluxo
I	Irreversibilidades
K	Consumo exergético
Q	Calor em base exergética
S	Neguentropia de um fluxo
T	Temperatura
P	Potência elétrica ou Produto
W	Potência Mecânica

Minúsculas

e	Exergia específica
h	Entalpia específica
k	Custo exergético unitário de um fluxo
m	Vazão mássica
p	Pressão
s	Entropia específica

Sobrescritos

E	Modelo Termoeconômico baseado na Exergia Total
$E\&S$	Modelo Termoeconômico baseado na Exergia Total e Neguentropia

<i>H&S</i>	Modelo Termoeconômico que usa a Neguentropia como parcela da Exergia
<i>I</i>	Induzida
<i>L</i>	Intriínseca

Subscritos

<i>0</i>	Oriundo do ou Direcionado ao Ambiente
<i>C</i>	Combustível, condensador
<i>dep</i>	Variável dependente
<i>design</i>	Projeto
<i>F</i>	Parcela Física
<i>i</i>	Fluxo físico ou equipamento qualquer
<i>indep</i>	Variável independente
<i>M</i>	Parcela Mecânica
<i>Q</i>	Parcela Química
<i>S</i>	Soprador
<i>T</i>	Parcela Térmica
<i>va</i>	Vapor de alta pressão
<i>vb</i>	Vapor de baixa pressão

Gregas

θ	Parâmetro interno
Δ	Variação
η	Eficiência ou rendimento do equipamento

Abreviaturas

<i>A</i>	Água de retorno do processo
<i>AQAP</i>	Aquecedor de alta pressão
<i>AQBP</i>	Aquecedor de baixa pressão
<i>AQIP</i>	Aquecedor de pressão intermediária

<i>B</i>	Bomba de alimentação
<i>BAC</i>	Bomba de alimentação de caldeira
<i>BC</i>	Bomba de condensado
<i>BE</i>	Bifurcação de exergia
<i>BFG</i>	Gás de alto forno
<i>BH</i>	Bifurcação de entalpia
<i>BP</i>	Bifurcação de potência elétrica
<i>BS</i>	Bifurcação de neguentropia
<i>BV</i>	Bifurcação de vapor
<i>BW</i>	Bifurcação de potência de eixo
<i>C</i>	Condensador
<i>CA</i>	Compressor de ar
<i>CALD</i>	Caldeira
<i>CC</i>	Câmara de combustão
<i>CDQ</i>	Coke Dry Quenching
<i>COG</i>	Gás de Coqueria
<i>CR</i>	Caldeira de recuperação
<i>D</i>	Desaerador
<i>DES</i>	Dessuperaquecedor
<i>DI</i>	Disfunção total causada pelo equipamento
<i>DF</i>	Disfunção total no equipamento
<i>G</i>	Gerador
<i>GE</i>	Gerador elétrico
<i>GN</i>	Gás Natural
<i>GV</i>	Gerador de vapor
<i>JE</i>	Junção de exergia
<i>JH</i>	Junção de entalpia
<i>JP</i>	Junção de potência elétrica
<i>JS</i>	Junção de neguentropia
<i>JV</i>	Junção de vapor
<i>JW</i>	Junção de potência de eixo
<i>LDG</i>	Gás de aciaria
<i>MFR</i>	Fração de vazão mássica
<i>MF</i>	Malfunção total do equipamento

<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>ROP</i>	Condição de referência do sistema térmico
<i>S</i>	Soprador
<i>S_{AF}</i>	Sopro para alto forno
<i>T1</i>	Estágios da Turbina antes da 1° extração
<i>T2</i>	Estágios da Turbina entre a 1° extração e a 2° extração
<i>T3</i>	Estágios da Turbina entre a 2° extração e a 3° extração
<i>T4</i>	Estágios da Turbina entre a 3° extração e a 4° extração
<i>T5</i>	Estágios da Turbina entre a 4° extração e o gás exausto
<i>Td</i>	Temperatura de dissipação
<i>TG</i>	Turbina a gás
<i>TGS</i>	Grupo turbo-gerador
<i>TOP</i>	Condição de teste do sistema térmico
<i>TRT</i>	Turbina de recuperação de gás de topo
<i>TV</i>	Turbina a vapor
<i>V</i>	Vazão de vapor para o processo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A necessidade energética do homem está em constante evolução e cada vez mais evidente principalmente em função das necessidades mais complexas do setor industrial. A evolução na utilização da energia demandou várias transformações tecnológicas, principalmente com a contribuição da engenharia para desenvolvimento de novas tecnologias e criação de dispositivos mecânicos complexos, sendo estes empregados no aproveitamento das energias primárias, como o petróleo, carvão mineral, gás natural, nuclear, hidráulica, eólica, dentre tantas outras fontes existentes e atualmente aproveitadas.

A maior necessidade por energia tornou-se mais evidente após a Revolução Industrial onde o trabalho puramente manual dos trabalhadores foram gradativamente substituídos por máquinas que tinham maior capacidade de produção, visto que a produção de forma braçal e manual tinha sua capacidade limitada e não mais atendia a crescente demanda dos consumidores. Esse avanço, aliado ao advento da Segunda Guerra Mundial, contribuiu de maneira significativa para o desenvolvimento dos processos de conversão térmica.

Em função deste constante aumento da demanda de energia, a previsão de demanda energética global em 2040 está prevista ser em torno de 30% maior que a demanda do ano de 2010. Esse aumento é principalmente influenciado devido ao desenvolvimento econômico dos países e aumento do número e da qualidade de vida das pessoas. A geração de eletricidade continuará sendo o maior responsável pela demanda energética, com mais de 40% do consumo global das fontes primárias de energia, cuja matriz continuará sendo composta, em torno de 80%, por óleo, gás e carvão (Tillerson, 2012). Por outro lado, a combustão de combustíveis fósseis tem o maior peso quanto à influência do homem sobre o clima, sobretudo devido à emissão de CO₂ (Tanaka, 2009). Entretanto, a demanda e o impacto ambiental só não serão maiores devido aos ganhos em eficiência por meio de tecnologias e de boas práticas de economia energética (Tillerson, 2012).

No Brasil, aliado a previsão de aumento de consumo de energia elétrica nos próximos anos devido ao desenvolvimento econômico do país e aumento da qualidade de vida da população, é vivenciado um momento de instabilidade e baixa previsibilidade no setor energético brasileiro, onde os altos preços de energia e a baixa previsibilidade de garantia em seu fornecimento devido

a riscos constantes de racionamento de energia, principalmente em função da alta dependência da energia hidráulica em sua matriz de energia (Figura 1.1.), reforçam a necessidade da otimização do consumo de energia para a competitividade e sobrevivência das empresas.

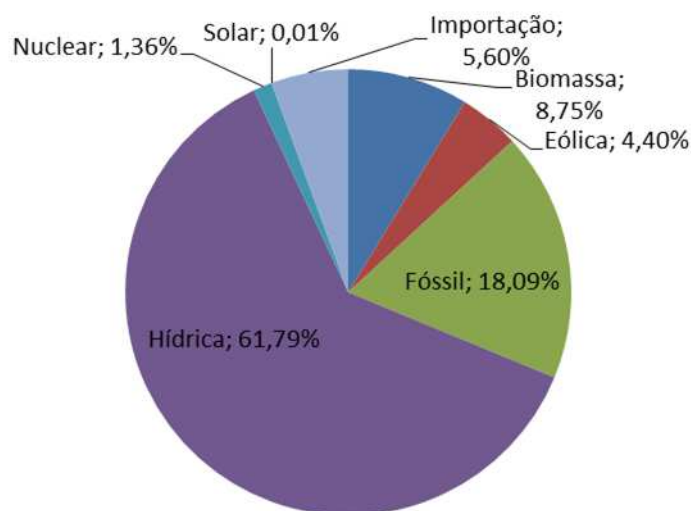


Figura 1.1: *Matriz de Energia Elétrica do Brasil*

Fonte: ANEEL/MME (2015).

Logo, visto a importância da energia elétrica para o setor produtivo e o impacto de seu consumo no custo final dos produtos, pode-se destacar como um importante fator de competitividade as empresas que possuem geração própria de energia elétrica, pois além de contribuírem para o aumento da sua competitividade e independência do setor elétrico nacional, também auxiliam de maneira direta a redução de demanda de energia do sistema elétrico nacional.

Visto a importância da energia tanto para a sobrevivência do ser humano, satisfação das suas necessidades quanto para o desenvolvimento da sociedade, é fundamental buscar alternativas de consumos sustentáveis e otimização dos processos, reduzindo a demanda dos recursos naturais do nosso planeta, que se tornam cada dia mais escassos.

O Diagnóstico Termoeconômico é uma ferramenta importante para avaliação das degradações de exergia em sistemas térmicos, e neste cenário apresenta a possibilidade de identificação das anomalias presentes nos mesmos e informa quais são os equipamentos responsáveis pelas malfunções no ciclo, sendo assim uma excelente fonte de dados para tomadas

de decisões em futuras intervenções de manutenção a fim de eliminar as malfunções existentes nestes equipamentos, contribuindo desta forma para o aumento da eficiência global do sistema, reduzindo a demanda por insumos necessários para um mesmo nível de produção da planta.

1.1 Termoeconomia

Uma análise econômica pode calcular o custo do combustível, do investimento necessário da instalação, do custo operacional e do custo de manutenção de toda a unidade, porém não pode fornecer meios de avaliar os subsistemas do sistema térmico de forma a prover informações de qual maneira estes custos são distribuídos entre eles. Por outro lado, uma avaliação termodinâmica calcula as eficiências dos subsistemas e localiza e quantifica as irreversibilidades e suas malfunções, porém não é capaz de elucidar qual a contribuição de cada subsistema no resultado geral do sistema térmico.

Como o próprio nome pressupõe, esta disciplina busca aliar conceitos da termodinâmica juntamente com economia para avaliar qualitativamente e quantitativamente produtos de um sistema térmico baseados nos fluxos e custos gerais tanto do processo em si como dos equipamentos (Belisario, 2012)

Talvez o primeiro obstáculo com o qual se depare aquele que se dedica ao estudo da Termoeconomia seja a definição precisa do objeto de estudo. Divergências entre enfoques, surgidos já no início de sua curta história, se refletem nas definições fornecidas por alguns dos principais pesquisadores (Cerqueira, 1999).

Termoeconomia é o ramo da engenharia que combina a análise exergética e princípios econômicos visando prover ao projetista ou operador de sistemas informação não disponível através das análises termodinâmica e econômica convencionais mas cruciais para o projeto e operação econômica de um sistema (Bejan et al., 1996).

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

Desta forma, a Termoeconomia é uma disciplina utilizada para avaliações de sistemas térmicos, que ao longo dos anos está sendo cada vez mais utilizada para avaliação de eficiência exergética. Ela visa conciliar a termodinâmica com os conceitos da economia para avaliar a formação do custo exergético dos fluxos de sistemas térmicos.

De acordo com Escobar (2010), a aplicação conjunta de conceitos termodinâmicos e econômicos constitui na atualidade uma valiosa ferramenta na procura do conhecimento do processo de formação de custos num sistema produtivo. A Termoeconomia tem sido desenvolvida como uma valiosa ferramenta para a utilização eficiente de recursos energéticos, tendo em conta que a mesma permite a determinação das eficiências e perdas exergéticas em cada um dos volumes de controle de um sistema, assim como a detecção das ineficiências e cálculo de seu custo econômico na operação.

O florescimento da Termoeconomia aconteceu nos anos 80, quando surgiram novas metodologias com novos conceitos, nomenclaturas, definições e aplicações (Valero et al., 1994a). Foi durante este período que surgiu o termo Exergoeconomia, proposto por Tsatsaronis em 1985, para designar a técnica que combina o conceito de exergia (uma propriedade energética) com o conceito de custo (uma propriedade econômica, originalmente) na análise de sistemas térmicos. A exergia e a neguentropia são as magnitudes mais usadas em Termoeconomia, mas pode-se também usar a entalpia e a entropia (Valero et al., 2006). Neste caso, a Exergoeconomia pode ser considerada como uma vertente da Termoeconomia.

De acordo com Cerqueira (1999) embora restrita aos meios acadêmicos, a Termoeconomia tem sido aplicada a problemas práticos, como centrais de cogeração de refinaria (Frangopoulos et al., 1996), de polo petroquímico (Torres e Nebra, 1997), de usinas de açúcar e álcool (Robles Vertiola e Oliveira Júnior, 1995; Barreda del Campo et al., 1998) e de indústria de celulose (Luz Silveira e Horta Nogueira, 1992). Sistemas avançados de geração de energia têm sido estudados, como a análise de sistemas de biomassa (Walter e Llagostera, 1995) e de sistemas empregando combustão em leito fluidizado (Schwarz et al., 1997). Análises termoeconômicas de sistemas de cogeração empregando turbinas a gás foram apresentadas (Guarinello et al., 1998). Análise de ciclos de turbina a gás úmidas (Gallo, 1997) também tem sido realizadas, empregando diferentes metodologias (Krause e Tsatsaronis, 1997; Gallo et al., 1997). Não apenas análises voltadas para projeto, mas também para a operação e manutenção tem sido propostas. Trabalhos voltados para a análise/ Diagnóstico *on-line* da operação (Valero et al., 1996) e a manutenção (Carvalho e Horta Nogueira, 1996) de centrais de cogeração de potência são exemplos. Das poucas

aplicações em outras indústrias, pode-se citar o estudo comparativo de processos de produção de cimento (Silva e Nebra, 1996).

Além destes, é possível destacar e citar outros trabalhos acadêmicos onde é aplicada a Termoeconomia na análise e de problemas:

- Uche (2000) realizou uma análise termoeconômica em uma central Termelétrica a vapor e em uma unidade de dessalinização, incluindo alocação de custo, diagnóstico e otimização da planta.
- Santos (2005) procedeu uma avaliação exergoeconômica das tecnologias para a produção combinada de eletricidade e água dessalinizada. Para isso, realizou avaliação das principais tecnologias usadas para a produção combinada de eletricidade e água dessalinizada em pequena escala industrial. As plantas de cogeração foram avaliadas com base nos custos da água e da eletricidade obtidos aplicando o método da exergoeconomia na alocação de custos. Os resultados obtidos pelo método da exergoeconomia foram comparados com os obtidos pelo método da equivalência elétrica que valoriza o calor útil pelo seu potencial de geração termelétrica, ou seja, pela sua potência elétrica fictícia.
- Silva (2009) aplicou duas das metodologias mais divulgadas na literatura: a termoeconômica e o método da reconciliação. Ambas foram aplicadas em um ciclo fictício com a finalidade de comparar os métodos e escolher o mais eficiente. O método da reconciliação foi escolhido como mais eficiente e posteriormente foi utilizado em um sistema elaborado para execução do diagnóstico termodinâmico em uma planta real.
- Escobar (2010) realizou uma análise termodinâmica integral de uma planta de cogeração acoplada a um sistema de destilação, numa destilaria autônoma. Propôs uma avaliação simultânea de dois sistemas acoplados considerando os parâmetros que intervêm na operação de cada um, utilizando como ferramenta uma metodologia exergoeconômica que permita melhorar a utilização energética na planta.
- Belisario (2012) realizou a avaliação termoeconômica através de alocação de custos utilizando três modelos termoeconômicos (Modelo E, Modelo E&S e Modelo H&S) além de suas variantes para formulação das equações auxiliares (critérios subproduto e multiproduto) com o intuito de determinar o custo exergético dos produtos finais

da planta. Dentre os modelos aplicados, o Modelo H&S se mostrou o mais satisfatório para avaliação de centrais de cogeração de indústrias siderúrgicas.

- Lourenço (2012) apresentou uma abordagem termoeconômica alternativa cuja aplicação em ciclos de refrigeração isola equipamentos dissipativos, como condensadores e válvulas, na estrutura produtiva. A abordagem, chamada de Modelo UFS, é baseada no conceito de desagregação da exergia física, no caso, em três componentes, termo de energia interna, termo de trabalho de fluxo e termo entrópico. Também foi realizado o balanço de exergia e comparado com a diferença entre insumo e produto para cada unidade física dos ciclos, além da avaliação das razões produto-insumo. Os resultados mostraram que os custos exergéticos unitários nunca são menores que a unidade e que as razões produto-insumo nunca são maiores que 100%.
- Faria (2014) avaliou as diferentes metodologias de desagregação da exergia física para a modelagem termoeconômica, tendo em conta alguns aspectos como vantagens, restrições, inconsistências, melhoria na precisão dos resultados, aumento da complexidade e do esforço computacional e o tratamento dos resíduos e equipamentos dissipativos para a total desagregação do sistema térmico. Para isso, as diferentes metodologias e níveis de desagregação da exergia física foram aplicados na alocação de custos para os produtos finais (potência líquida e calor útil) em diferentes plantas de cogeração considerando como fluido de trabalho tanto o gás ideal bem como o fluido real.
- Ribeiro (2014) desenvolveu um sistema de informação para o monitoramento e diagnóstico de desempenho termodinâmico em uma central termelétrica equipada com motores de combustão interna.

A Termoeconomia possui três grandes campos de atuação: (i) alocação de custos (ii) diagnóstico e (iii) otimização. Todos esses campos têm em comum o fato de utilizarem o processo de formação de custos como base para a análise de sistemas térmicos.

Como visto, a Termoeconomia tem sido aplicada em análises de vários sistemas de cogeração tanto na alocação do consumo dos combustíveis ou dos custos de produção, como na otimização e diagnóstico de sistemas térmicos. Este trabalho possui foco na aplicação do Diagnóstico Termoeconômico na avaliação de sistemas térmicos e na comparação dos resultados

encontrados entre três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S), analisado suas vantagens e desvantagens.

1.2 Motivação

O problema TADEUS (Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy Utility Systems), iniciado em 2001, apresentava como objetivo integrar as experiências acumuladas por um grupo de pesquisadores utilizando o Diagnóstico Termoeconômico e aplicar procedimentos de diferentes grupos de pesquisa na análise do Diagnóstico Termoeconômico para detecção de anomalias e ineficiências de sistemas energéticos, estabelecer conceitos comuns e nomenclaturas, realizar comparações entre resultados e evidenciar as principais características de cada abordagem.

Entretanto, apesar do trabalho TADEUS apresentar significativo avanço na unificação das metodologias de Diagnóstico Termoeconômico, algumas questões ainda estavam em aberto, principalmente a questão dos equipamentos dissipativos que, somente em termos de exergia não determinava um produto para tais equipamentos e resíduos. Uma das formas de resolver essa questão é utilizar a variação da propriedade entropia multiplicada pela negativa da temperatura de referência. A este termo, dá-se o nome de “neguentropia”, o que permite definir um produto para equipamentos dissipativos e isolá-los na estrutura produtiva. Muitos autores concordam que o primeiro a propor este termo foi Frangopoulos (1983).

Para apresentar a utilização da neguentropia e a importância do modelo H&S proposto por Santos (2009) para análise Termoeconômica dos equipamentos dissipativos e do sistema térmico, será analisado as diferenças entre as magnitudes termodinâmicas utilizadas na Termoeconomia dos modelos Termoeconômicos E, E&S e o H&S.

Na Figura 1.2 é apresentada a estrutura física de um ciclo Rankine de potência com os seus cinco equipamentos principais: bomba de alimentação (B), gerador de vapor (GV), turbina a vapor (TV), condensador (C) e gerador elétrico (GE).

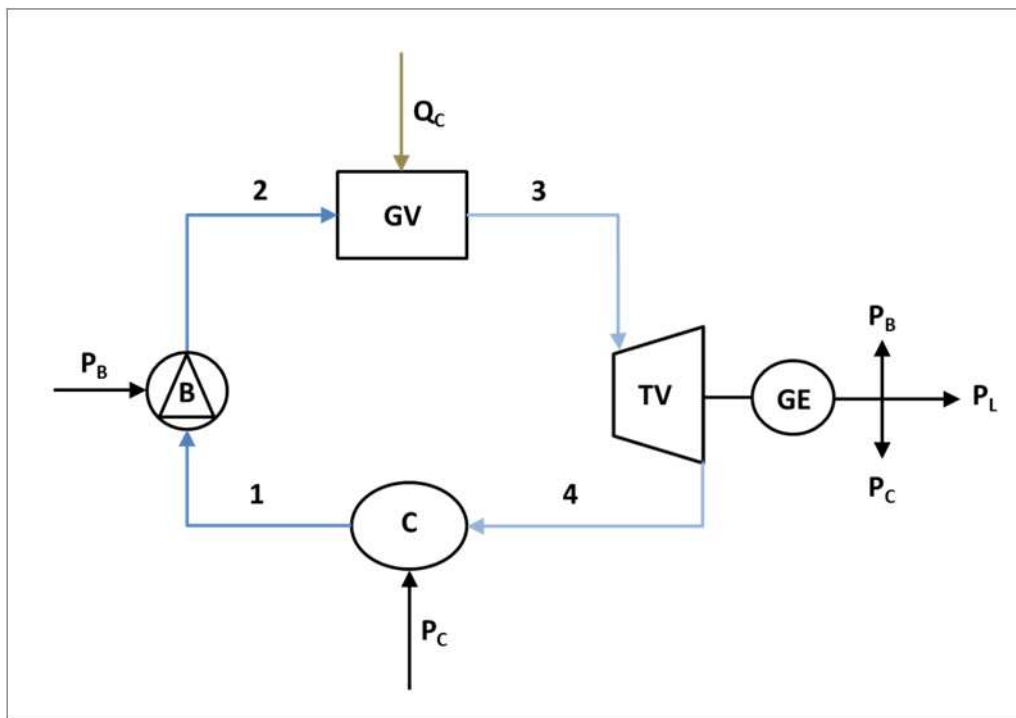


Figura 1.1: Estrutura Física do Ciclo Rankine de Potência

A Figura 1.3 mostra o diagrama produtivo do ciclo Rankine de potência usando fluxos de exergia total (Modelo E). A planta está representada com apenas três unidades produtivas reais, porque o condensador se juntou ao turbogerador a vapor para formar um único subsistema.

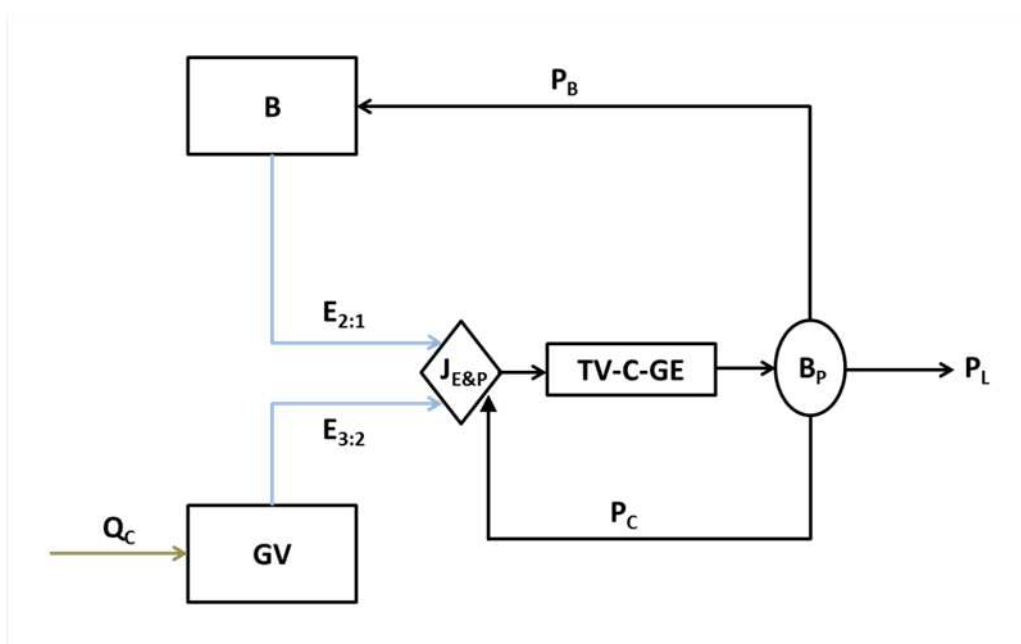


Figura 1.2: Estrutura Produtiva do Ciclo Rankine de Potência usando Exergia Total (Modelo E)

A ideia de juntar o condensador à turbina a vapor, formando uma única unidade produtiva, é uma característica da Teoria Estrutural do Custo Exergético (Serra, 1994). A justificativa vem de sistemas de cogeração com turbina a vapor de extração e condensação, onde parte do vapor é extraída num estágio intermediário da turbina para ser entregue ao processo, e a outra parte continua a sua expansão na turbina de baixa pressão. Quando isto acontece, o vapor que vai para o processo volta condensado. Por outro lado, o vapor que vai para a turbina a vapor não sai totalmente condensado. Por isso, considera-se que a função do condensador é auxiliar a turbina a condensar totalmente este vapor, daí, o condensador é um componente auxiliar da turbina a vapor de baixa pressão. De outra forma, não seria possível quantificar nem definir o produto (ou função) do condensador em termos de exergia total. Portanto, com a utilização do modelo E na análise Termoeconômica de sistemas térmicos, verifica-se dificuldade no tratamento dos equipamentos dissipativos em função da não definição de produtos para estes equipamentos.

A ideia da introdução da neguentropia em termoeconomia partiu da Análise Funcional Termoeconômica, em 1983. Inicialmente a neguentropia era usada para definir o produto do condensador num ciclo Rankine de potência (Frangopoulos, 1987), permitindo assim alocar o custo deste equipamento dissipativo. Esta ideia foi adotada pela Teoria Estrutural do Custo Exergético (Lozano et al., 1993, 1996), que estendeu este conceito para a alocação do custo dos resíduos em sistemas de cogeração com turbina a gás (Lozano e Valero, 1993). Estas duas metodologias consideram a neguentropia como um fluxo fictício que é usado juntamente com os fluxos de exergia total ou parcial na definição da estrutura produtiva.

A Figura 1.4 mostra a estrutura produtiva do ciclo Rankine de potência usando fluxos produtivos de exergia total e de neguentropia. Este processo produtivo considera que ao produzir exergia, a bomba (B) e o gerador de vapor (GV) aumentam a entropia do fluido de trabalho. O turbogerador (TV-GE) também aumenta a entropia do fluido de trabalho. Todo este aumento de entropia impede que toda a exergia produzida pela bomba e pelo gerador de vapor seja convertida em trabalho no turbogerador. A existência e a função do condensador (C) são justificadas pela necessidade de produzir neguentropia para cancelar o aumento de entropia por estes equipamentos. Por isso, este produto do condensador (a neguentropia) é alocado para os equipamentos que aumentam a entropia do fluido de trabalho.

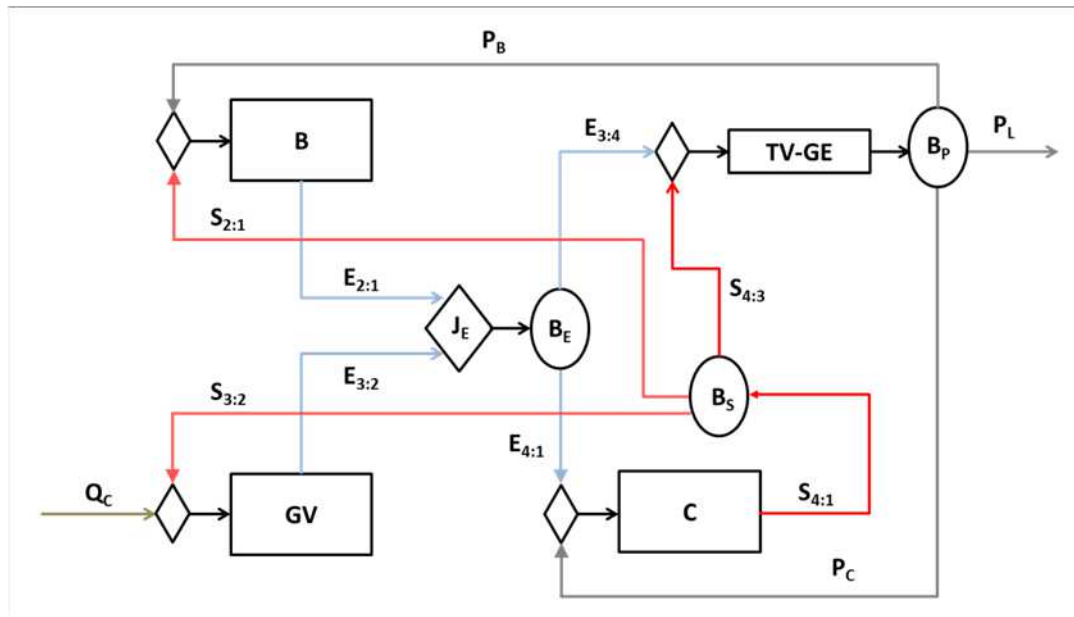


Figura 1.3: Estrutura Produtiva do Ciclo Rankine usando Exergia Total e Neguentropia (Modelo E&S)

A utilização da neguentropia como fluxo fictício juntamente com a exergia, aqui chamada de Modelo E&S, foi sistematicamente aplicada aos mais diversos tipos de sistemas que possuem em sua composição equipamentos dissipativos. Entretanto, Santos e seus colaboradores (Santos et al, 2006, 2008a, 2008b) mostraram que a utilização destes dois fluxos em conjunto violava aspectos da segunda lei da termodinâmica por definir, por vezes, equipamentos com produto maior que insumo.

Alguns autores dizem que a neguentropia é um fluxo fictício (Torres et al., 1996), porque durante muitos anos ela vem sendo usada juntamente com a exergia. Este procedimento tem a vantagem de poder isolar os equipamentos dissipativos na definição da estrutura produtiva, além de permitir explicitamente dar um tratamento aos resíduos. Porém, a utilização da exergia juntamente com a neguentropia (modelo E&S) apresentam algumas inconsistências. Uma das inconsistências, quando se usa a neguentropia juntamente com a exergia, é o fato de alguns equipamentos terem produto muito maior que o insumo, o que significa eficiência maior que 100% (Santos, 2009). Esta faixa de eficiência não é aceitável do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica. Além disso, pode ser facilmente demonstrado que desta forma seria impossível definir a estrutura produtiva de um ciclo a vapor ideal (reversível), porque neste caso o condensador teria um produto diferente de zero (a neguentropia) e o seu insumo (a exergia) seria nulo, já que não haveria exergia dissipada. Por outro lado, o uso da neguentropia juntamente com a exergia exige a aplicação das arbitrariedades citadas para atribuição de custos aos fluxos de

neguentropia sob pena de obter resultados incoerentes que podem contradizer a reconhecida e estabelecida vantagem energética da cogeração relativa à produção separada de potência e calor (Santos et al., 2006).

Porém, conforme apresentado por Santos et al. (2008a, 2008b), usando-se a exergia e a neguentropia (modelo E&S), os componentes que fornecem exergia para o sistema e já tem a entropia abatida do seu produto exergético são também penalizados no insumo, uma vez que a neguentropia é adicionada a este.

Por definição, a exergia de um fluxo é o trabalho máximo que se pode gerar se o mesmo passar por um processo reversível desde o estado que se encontra até o estado de equilíbrio com o meio ambiente (Santos, 2009). Sendo assim, o cálculo da exergia de um fluxo passa necessariamente pelo estabelecimento do ambiente de referência, que segundo Lozano e Valero (1986), deve ser as condições do ambiente local, nomeadamente a temperatura ambiente (T_0) e a pressão atmosférica (p_0). Desprezando os efeitos cinéticos e potenciais gravitacionais, a exergia de um fluxo (E) é obtida, conforme a Equação 1.1, a partir das suas parcelas: química (E_Q) e física (E_F). A parcela física é a soma da parcela mecânica (E_M) com a térmica (E_T), conforme mostra a Equação 1.2. A parcela química depende da composição química do fluxo relativamente ao ambiente de referência. A parcela térmica e a parcela mecânica dependem da temperatura e da pressão do fluxo, relativamente à temperatura e pressão de referência, respectivamente.

$$E = E^Q + E^F \quad (1.1)$$

$$E^F = E^M + E^T \quad (1.2)$$

No ciclo a vapor, durante o cálculo da exergia dos fluxos de água e/ou vapor, a parcela química é desprezível já que água e o vapor não entram em reações químicas e, portanto, a sua composição química não é alterada. Dada a pressão e a temperatura do fluxo, se obtém a entalpia (h) e a entropia (s) do fluxo. Se o fluxo for uma mistura bifásica (água mais vapor), é necessário conhecer as proporções de cada fase (o título). Conhecendo a temperatura e a pressão de referência se obtém também a entalpia (h_0) e a entropia (s_0) de referência. Tendo as entalpias e as entropias, a exergia total do fluxo pode ser calculada usando a Equação 1.3, onde m é a vazão mássica do fluxo, e^F a exergia específica e T_0 a temperatura de referência.

$$E = E^F = m \cdot e^F = m \cdot [(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)] \quad (1.3)$$

A Equação 1.3 não mostra claramente a separação entre a parcela térmica e a parcela mecânica da exergia física porque tanto a entalpia como a entropia dependem da pressão e da temperatura. Na Equação 1.4 as duas parcelas são apresentadas separadamente.

$$E^F = m \cdot [(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)] = m \cdot (h - h_0) - m \cdot T_0 \cdot (s - s_0) = E^H - E^S \quad (1.4)$$

$$H = E^H = m \cdot (h - h_0) \quad (1.5)$$

$$S = E^S = m \cdot T_0 \cdot (s - s_0) \quad (1.6)$$

Conforme abordado por Santos (2009), as duas parcelas facilmente separáveis na equação da exergia total da água e/ou vapor, Equação 1.4, são precisamente: a entálpica (H) dada pela Equação 1.5 e a neguentrópica (S) definida pela Equação 1.6. Combinando corretamente estas duas parcelas, se obtém o mesmo efeito da exergia com a vantagem de aproveitar os benefícios que o uso da neguentropia propicia na alocação do custo dos resíduos e dos equipamentos dissipativos. Desta forma, esta nova proposta metodológica (chamada de Modelo H&S) combina a primeira e a segunda lei da termodinâmica na modelagem termoeconômica de sistemas térmicos.

Desta forma, é possível evidenciar que para o modelo E&S a neguentropia já está presente na exergia total como parte da componente da exergia física conforme estrutura produtiva do exemplo da Figura 1.4. Portanto, o uso da neguentropia aliada à utilização da exergia (modelo E&S) para os componentes do sistema térmico que aumentam a entalpia do fluido de trabalho e já tem a entropia subtraída do seu produto exergético são também penalizados no insumo, visto que a neguentropia é adicionada a este como insumo.

Esta explicação é importante para mostrar que a neguentropia já está presente na exergia total. Como sua influência já está presente em exergia total o uso de neguentropia mais exergia total sobrecarrega os componentes onde a entropia aumenta e desonera os equipamentos em que ocorre diminuição da entropia. Isso significa que o uso de exergia total mais a neguentropia, implicará que os equipamentos que aumentam a exergia do sistema terão um produto exergia diminuídos (uma vez que seu produto diminui devido ao aumento de entropia) e um maior

consumo de insumo (uma vez que a neguentropia é adicionado a ele). Os equipamentos que consomem exergia do sistema terão duas grandes penalidades no consumo de combustível, um adicionado pelo aumento de entropia na exergia e outro pela neguentropia adicionado a ele. O oposto ocorre com os equipamentos que diminuem a entropia, tais como os condensadores, as recuperações de calor, etc.

Percebendo as falhas, Santos (2009) em sua tese de doutorado propôs uma nova abordagem na definição da estrutura produtiva de sistemas térmicos (Modelo H&S) que alia os benefícios da utilização da neguentropia em conjunto com fluxos de entalpia, e não mais exergia total. O autor mostra em sua tese que as inconsistências, limitações e arbitrariedades das metodologias que utilizavam o Modelo E&S foram resolvidas no Modelo H&S. Em outras palavras, o Modelo H&S desagrega a exergia física em suas parcelas entálpica e neguentrópica (ou parcela entrópica). A Figura 1.5 mostra a estrutura produtiva do ciclo Rankine de potência usando fluxos produtivos de entalpia total e de neguentropia (Modelo H&S).

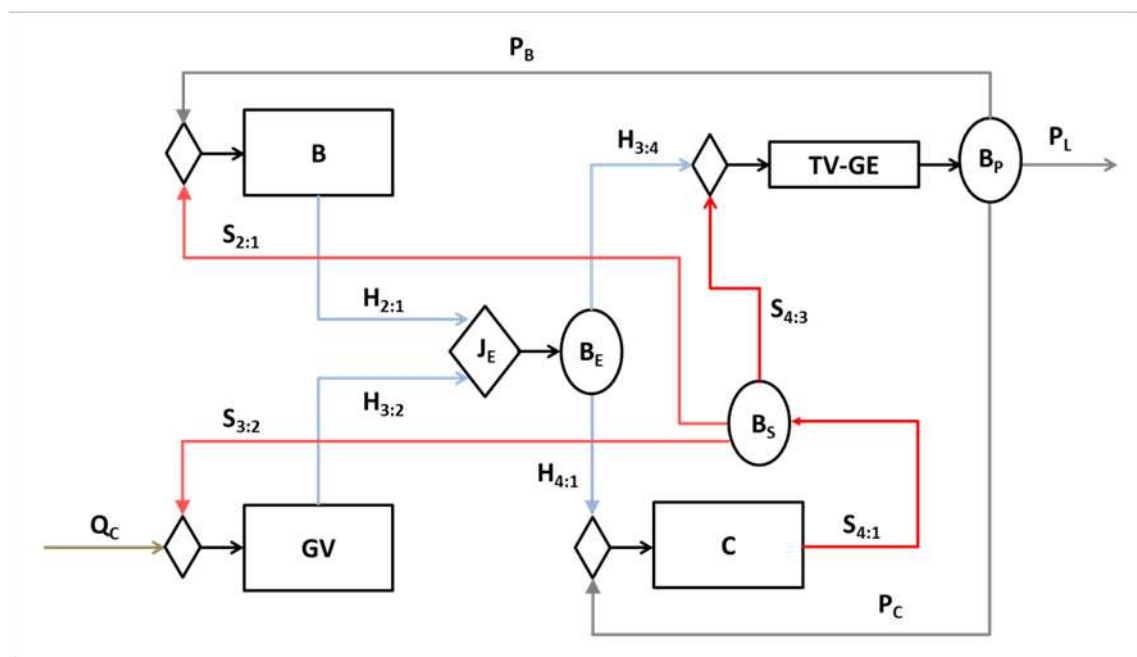


Figura 1.4: Estrutura Produtiva do Ciclo Rankine usando Entalpia e Neguentropia (Modelo H&S)

Logo, o desenvolvimento de Diagnóstico Termoeconômico de sistemas térmicos utilizando o modelo Termoeconômico H&S, facilitará o desenvolvimento e análise dos resultados, principalmente na verificação da real contribuição dos equipamentos dissipativos, visto a consideração da neguentropia como o produto destes equipamentos de forma separada e independente.

Verifica-se a utilização do Modelo H&S de forma sistêmica em estudos Termoeconômicos que envolvam alocação de custo. Porém, embora o modelo H&S apresente solução para a abordagem, alocação dos produtos e insumos dos equipamentos dissipativos em sistemas térmicos, sua utilização foi pouco explorada na realização de Diagnósticos Termoeconômicos em sistemas térmicos reais e complexos.

Desta forma, esta dissertação visa aplicar a metodologia do Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo H&S em um sistema térmico real e complexo de forma a verificar sua eficácia quando utilizado para realização de Diagnósticos Termoeconômicos comparando esses resultados com os resultados obtidos nos Diagnósticos Termoeconômicos utilizando os modelos Termoeconômicos E e E&S.

1.3 Objetivos e Alcance da Dissertação

Esta dissertação tem como objetivo principal, aplicar os conceitos e fundamentos do Diagnóstico Termoeconômico em um estudo de caso de uma Central de Cogeração de uma Indústria Siderúrgica Brasileira. Conforme apresentado na motivação deste trabalho, as bases que fundamentam esta disciplina são bastante recentes e desta forma é apresentado uma metodologia de Diagnóstico Termoeconômico que utiliza o modelo H&S como base da análise do sistema térmico para verificar as vantagens da utilização deste modelo na solução de Diagnósticos Termoeconômicos.

Dentre os modelos Termoeconômicos existentes, a presente dissertação realizará o Diagnóstico Termoeconômico aplicando o modelo H&S, desenvolvido por Santos (2009) que considera a neguentropia como parcela da exergia física juntamente com a entalpia. O intuito dessa abordagem é a aplicação do modelo H&S na realização de Diagnósticos Termoeconômicos reais e complexos. Adicionalmente, para analisar as vantagens da utilização do modelo H&S no desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos de sistemas térmicos, será realizada análise comparativa entre os modelos termoeconômicos E, E&S e H&S no desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos de sistemas térmicos e análise de suas limitações.

Como objetivos específicos, são determinados os índices de desempenhos dos equipamentos do sistema de cogeração baseados na primeira e segunda lei da termodinâmica e identificação

dos equipamentos mais ineficientes da instalação quantificando as malfunções e disfunções do sistema.

Os dados foram coletados na instalação tanto considerando a condição de referência ou de projeto e a condição de teste ou operação da planta onde as anomalias estão presentes. Foram realizadas simulações necessárias para obtenção de dados não disponíveis na planta em função de limitação da instrumentação disponível na unidade utilizando o simulador comercial *thermoflex*® da empresa americana Thermoflow Inc., a partir do levantamento de dados e parâmetros operacionais de uma central de cogeração siderúrgica obtidos da literatura e de dados coletados diretamente na planta.

1.4 Estrutura da Dissertação

Para atingir os objetivos expostos, além desta introdução, esta dissertação conta ainda com quatro capítulos, a saber:

- No capítulo 2 intitulado *Revisão Bibliográfica sobre Diagnóstico Termodinâmico*, é realizada a revisão bibliográfica visando mostrar o estado da arte no que diz respeito ao Diagnóstico Termodinâmico em Centrais Termelétricas.
- O capítulo 3 intitulado *Diagnóstico Termoeconômico*, refere-se aos conceitos gerais do Diagnóstico Termoeconômico voltados para avaliação de sistemas térmicos que serão aplicados no estudo de caso desta Dissertação. Adicionalmente, é realizada a aplicação do conceito do Diagnóstico Termoeconômico em uma planta simples para exemplificação da metodologia e comparações entre os modelos Termoeconômicos E, E&S e H&S.
- No capítulo 4 intitulado *Diagnóstico Termoeconômico da planta do Estudo de Caso* se encontra o estudo de caso e a aplicação da metodologia de Diagnóstico Termoeconômico em uma Central de Cogeração real e complexa utilizando o Modelo E, E&S e H&S.
- No capítulo 5 intitulado *Discussões dos Resultados*, os resultados da aplicação da metodologia de Diagnóstico Termoeconômico do estudo de caso são analisados de acordo com referências na literatura e aspectos da Termoeconomia.

O último capítulo, intitulado *Considerações Finais*, aborda a síntese dessa dissertação, apontando suas contribuições além de sugestões para trabalhos futuros.

O trabalho conta ainda com os Apêndices A e B que possuem os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos não apresentados no decorrer da dissertação do sistema térmico do exemplo e da planta do estudo de caso, respectivamente.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO

O Diagnóstico Termodinâmico tem como objetivo analisar as condições de funcionamento de um equipamento e/ou sistemas térmicos diferentes daquelas previstas em seu projeto original. Em geral, a avaliação dessa nova condição de operação do sistema é muito importante, pois estas podem levar a falhas dos equipamentos ou acarretarem em uma redução de desempenho do sistema térmico, ocasionando em maior custo operacional para manutenção da planta.

O Diagnóstico Termodinâmico baseia-se na análise de parâmetros medidos no processo, tendo as relações termodinâmicas entre estes parâmetros como base para análise. Analisa todo o sistema térmico, visando fornecer informações que mantenham ou melhorem a relação custo/benefício, sob a visão do custo de manutenção dos equipamentos em contrapartida ao ganho no desempenho global da planta em caso de eliminação da anomalia detectada com a realização do diagnóstico termodinâmico.

Este capítulo abordará as técnicas e metodologias de Diagnósticos Termodinâmicos mais estudadas e difundidas na literatura e no meio acadêmico voltados para avaliação de sistemas térmicos.

2.1 Análise Quantitativa de Causalidade

O método de análise quantitativa de causalidade é um método de análise do comportamento do sistema térmico de maneira matemática que considera o comportamento de seus componentes em função de variáveis do sistema térmico.

Esta metodologia visa determinar o valor de uma função objetivo para um parâmetro que represente o comportamento global do sistema térmico analisado (como eficiência, consumos

específicos, custo específico de geração do sistema, dentre outros) em função de formulações baseadas em variáveis dependentes e independentes do sistema térmico analisado (pressões, temperaturas, vazões, etc.) desde que estas variáveis possam ser definidas em termos termodinâmicos.

Este método determina o consumo adicional de energia causado pelas anomalias dos componentes do sistema térmico, analisando a variação do parâmetro objetivo entre a condição de teste (*TOP*) e a condição de referência (*ROP*) do sistema térmico analisado.

De acordo com Arrieta (2006), esta variação pode ser escrita como uma série de Taylor. Assim, a alteração de uma variável do sistema afetará um grande número de seus componentes, de maneira mais ou menos significativa e desta forma o produto destes componentes será afetado e assim conseqüentemente até que o sistema encontre uma condição de equilíbrio. Esta nova condição de equilíbrio, apresentará um novo valor de parâmetro $f(x)$, conforme Equação 2.1, que para o valor na condição de teste (*TOP*) será diferente do valor na condição de referencia (*ROP*).

$$f(x) = f(x_{dep}, x_{indep}) \quad (2.1)$$

Entretanto, uma dificuldade encontrada por este método é a identificação e quantificação das anomalias induzidas nos componentes pelos outros componentes do sistema térmico de forma a diferenciar as anomalias entre anomalias induzidas e intrínsecas.

Usón et al. (2006), (2009) e Usón e Valero (2011) realizam uma série de estudos complementares acerca do diagnóstico termodinâmico em uma planta de potência a carvão, com dados representativos de anos de operação da unidade. Os resultados obtidos com a utilização do método da análise quantitativa da causalidade são comparados com outras duas metodologias (a primeira baseada em técnicas de regressão linear enquanto a segunda em técnicas de redes neurais). Os resultados corroboram de que a análise quantitativa da causalidade quantifica os efeitos do aumento de consumo de energia provocado pela variação das variáveis do sistema térmico, enquanto as outras duas técnicas avaliadas limitam-se a avaliar as variáveis de maior influência do ciclo.

2.2 Temperatura de Dissipação

Este método proposto por Royo et al (1997) define um parâmetro interno θ conforme Equação 2.2 para os componentes de um ciclo de potência. Esse parâmetro precisa estar relacionado a algum indicador de desempenho, como rendimento, efetividade ou razão de pressão de algum componente do ciclo.

$$\theta_{es} = \left(\frac{h_e - h_s}{s_e - s_s} \right) \quad (2.2)$$

Onde h_e e s_e representam respectivamente a entalpia e entropia do fluxo de massa na entrada do componente e h_s e s_s representam respectivamente a entalpia e entropia do fluxo de massa na saída do componente.

Analisando as variações de entalpia e entropia contidas nesse parâmetro interno θ para um mesmo fluxo de massa é possível constatar anomalias nos componentes do ciclo através da verificação deste parâmetro em um plano h-s, conforme metodologia proposta por Royo et al. (1997).

Na Figura 2.1 está sendo representado o comportamento do fluxo mássico que passa por um compressor nas condições normais de operação (linha cheia) e em uma condição onde há presença de anomalias (linha tracejada). É possível verificar que quando existem anomalias presentes há uma diminuição da inclinação da reta que liga as condições iniciais e finais do fluxo mássico.

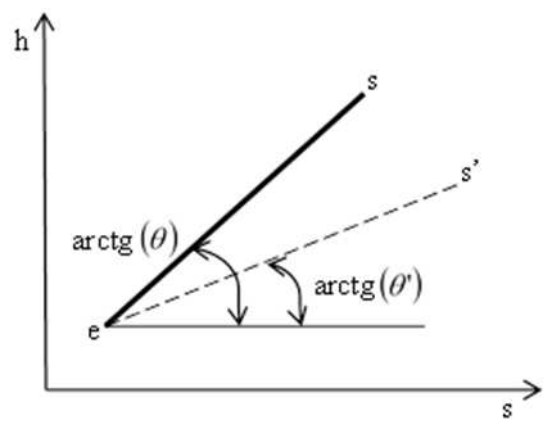


Figura 2.1: Variação do parâmetro θ para um componente com e sem anomalia
Fonte: Adaptado de Royo et al. (1997).

É possível verificar que quando existe presença de anomalias ocorre uma diminuição da inclinação da reta que une as condições iniciais e finais do fluxo. Esta variação na inclinação pode ser descrita pelo parâmetro interno θ descrito na Equação 2.2. Todavia, mesmo o parâmetro θ sendo conhecido para um componente onde existe malfunção intrínseca, somente essa informação não é suficiente para determinar o estado de saída do mesmo que pode estar em qualquer lugar da linha tracejada es', sendo necessário desta forma, informações adicionais sobre o fluxo de saída.

Para a descrição do componente onde há presença de anomalias induzidas são consideradas nesta metodologia pequenas variações de θ , o suficiente para considerar que θ permanece constante ($\theta=\theta'$). Esta hipótese assume que, para pequenas variações nos insumos de um componente, seu rendimento permanece constante.

Conhecendo-se as novas condições de entrada e saída é possível conhecer a variação diferencial do parâmetro θ . A inclinação dessa linha possui dimensões de temperatura e é chamada de temperatura de dissipação, conforme Equação 2.3.

$$Td_s = \left(\frac{\partial h_s}{\partial s_s} \right) \quad (2.3)$$

Desta forma, é possível conhecer os componentes que possuem malfunções intrínsecas através do parâmetro interno θ e avaliar estas malfunções intrínsecas através da temperatura de dissipação. Porém esse método está limitado há pequenas variações nos fluxos de entrada dos componentes haja vista que para grandes variações nesses parâmetros a hipótese de que o desempenho de cada componente permanece constante não é válida.

2.3 Termocaracterização

O método da termocaracterização proposto por Zaleta et al. (2004a) define o estado de referência de um componente genérico a partir da análise de um volume de controle traçado em torno do referido equipamento, conforme apresentado na Figura 2.2. Assim os fluxos de entrada e saída de entalpia, entropia e a fração de vazão mássica (MFR) são utilizados para determinar uma curva de desempenho para o equipamento em uma condição de referência definida.

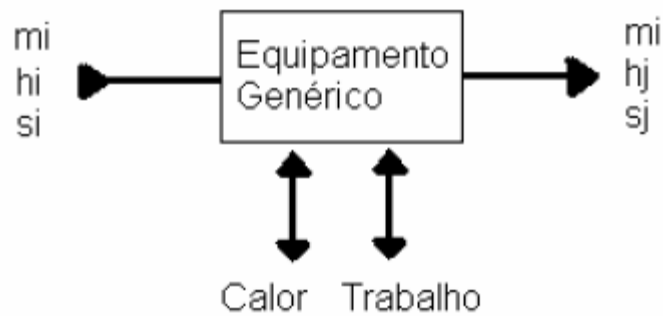


Figura 2.2: Representação da variação de entalpia e entropia em um equipamento genérico

Fonte: Adaptado de Zaleta et al (2004).

As equações que determinam a análise dos fluxos de entalpia, entropia e vazão mássica através do volume de controle são, respectivamente, as Equações 2.4, 2.5 e 2.6. O termo \dot{m}_{design} representa a vazão mássica de projeto.

$$\Delta h = h_e - h_s \quad (2.4)$$

$$\Delta s = s_e - s_s \quad (2.5)$$

$$MFR = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{design}} \quad (2.6)$$

Onde h_e e s_e representam respectivamente a entalpia e entropia do fluxo de massa na entrada do componente e h_s e s_s representam respectivamente a entalpia e entropia do fluxo de massa na saída do componente.

Com a realização destas definições, cada componente do ciclo pode ter seu comportamento mapeado e representado graficamente através de uma curva de desempenho conforme Figura 2.3. A presença de um ponto fora da curva pode ser interpretada como uma anomalia e que de acordo com as variáveis que foram modificadas, estas anomalias podem ser classificadas como intrínsecas ou induzidas.

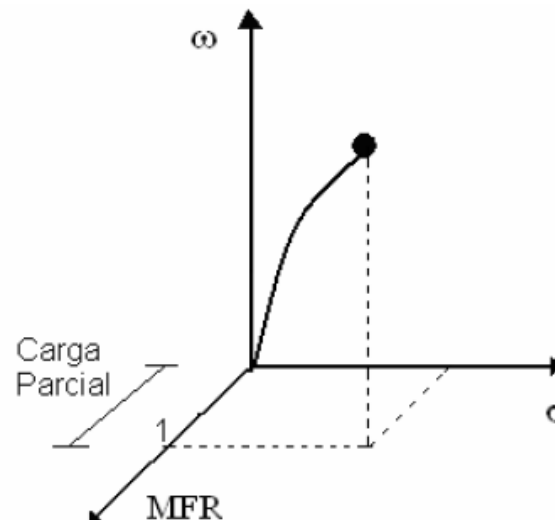


Figura 2.3: Representação do estado de referência em função da variação de entropia, variação de entalpia e fração mássica para um equipamento genérico em três dimensões

Fonte: Adaptado de Zaleta et al (2004).

Zaleta et al. (2004) realizou uma análise de sensibilidade do consumo específico de combustível em função da variação de entropia e entalpia aplicando o método da termocaracterização. Portanto a variação de entalpia e entropia em cada componente pode ter seu impacto no consumo específico de combustível verificado. Para isso, os componentes do ciclo foram separados em dois grupos: componentes termomecânicos como turbinas, bombas, etc. e componentes de troca térmica que são os trocadores de calor e posteriormente cada grupo teve sua equação de impacto no consumo específico de combustível estabelecida.

Zaleta et al. (2010) realizou uma crítica relacionada ao fato das teorias anteriores, baseadas em modelos analíticos ou análises exergoeconômicas não permitirem uma distinção clara entre anomalias intrínsecas e induzidas em sistemas mais complexos. Nesse trabalho o autor apresenta as premissas nas quais se baseia a metodologia de diagnóstico por termocaracterização.

2.4 Técnicas de Inteligência Artificial

Diagnósticos baseados em técnicas de inteligência artificial, como redes neurais, lógica Fuzzi, filtro de Kalman, rede Bayesian, algoritmos genéticos dentre outros têm sido propostos na tentativa de evitar o uso de expressões analíticas complexas. Para o desenvolvimento destes

sistemas de diagnóstico é necessário um grande volume de dados para treinamento do sistema e geralmente estes métodos não conseguem diferenciar as anomalias induzidas das intrínsecas.

De acordo com Cai et al. (2011), estes tipos de métodos se baseiam em ocorrências passadas, o que os impedem de gerar bons resultados em situações que ainda não foram experimentadas pela planta.

2.4.1 Redes Neurais

Redes Neurais são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Uma rede neural possui um esquema de processamento de dados que é capaz de utilizar o conhecimento baseado em aprendizagem (experiência) e disponibilizar este conhecimento para uma aplicação específica.

De acordo com Arrieta (2006) um ponto de destaque do diagnóstico utilizando o método das Redes Neurais é o fato de ser baseada em registros históricos de operação da planta e em função desta característica é possível que resultados de diagnósticos que utilizam esta técnica não sejam consistentes para condições inéditas de operação na planta.

Uma comparação de desempenho de cinco diferentes arquiteturas de redes neurais foi aplicada ao diagnóstico por Hassan et al. (2003 apud ARRIETA, 2006, p. 75). As arquiteturas analisadas incluem rede neural percebedora, rede neural filtro linear, rede neural feed-forward, rede neural de auto-organização e a rede neural de quantização do vetor de aprendizagem. Esse estudo realiza uma análise crítica do desempenho das arquiteturas de redes neurais analisadas em um equipamento de teste com diferentes tipos de falhas. Como conclusão, o autor demonstra que as arquiteturas de redes neurais percebedora e redes neurais de quantização do vetor de aprendizagem apresentam resultados mais confiáveis para aplicação sistemas de diagnóstico.

Um sistema inteligente capaz de realizar diagnóstico e detectar anomalias on-line foi desenvolvido por Arranz et al. (2008). Desta forma, o diagnóstico da central termelétrica de ciclo combinado com turbina a gás era realizado de maneira dinâmica. Fast e Palmé (2010), também utilizando técnicas de redes neurais, criaram um sistema on-line de monitoramento e diagnóstico da produção de potência e calor em uma planta real. Os modelos de redes neurais foram desenvolvidos com dados operacionais dos componentes da planta e permitiam avaliar anomalias e falhas presentes na operação.

O desenvolvimento de sistemas de diagnóstico para uma planta de cogeração com motor de combustão interna utilizando redes neurais são tratados nos trabalhos de Barelli et al. (2009a), (2009b), (2011) e (2013). Os modelos simulam a degradação de desempenho nos componentes de um motor de combustão interna e descrevem as etapas necessárias para o seu desenvolvimento. Na etapa inicial, é realizado a coleta e tratamento de dados experimentais com o intuito de individualizar os parâmetros característicos do motor. Em uma segunda fase, um simulador de lógica neural é desenvolvido com base nos dados experimentais da unidade. Por fim os autores desenvolveram um sistema neural capaz de reproduzir os comandos de regulação do motor em função de cada patamar de potência definido.

De maneira similar, Wu et al. (2010) estudaram o uso de redes neurais artificiais no diagnóstico de falhas em motores de combustão interna. Neste trabalho os autores realizam o diagnóstico de falhas em um motor utilizando o sinal de pressão do coletor de ar de admissão do motor em conjunto com a técnica de redes neurais. O sinal de pressão foi escolhido devido ao fato dessa variável estar correlacionada à eficiência volumétrica do compressor, ao consumo de combustível e ao desempenho do motor de combustão interna.

2.4.2 Lógica Fuzzy

Segundo Mendes (2012), a lógica Fuzzy é uma técnica de inteligência artificial que consiste em aproximar a decisão computacional da decisão humana, tomando os equipamentos e instalações mais eficientes em suas funções. De acordo com Ribeiro (2014), a lógica Fuzzy tem como objetivo determinar uma saída lógica a partir de entradas imprecisas, nas quais estejam presentes incertezas. Tal técnica é capaz de prover mecanismos de solução de problema nas áreas de controle e tomada de decisão na geração termelétrica.

No diagnóstico de falhas em centrais termelétricas algumas fontes de incertezas e de dados ambíguos são encontrados no mapeamento das causas de anomalias ou até mesmo no histórico operacional de dados coletados de equipamentos que trabalhavam sob diferentes condições de desempenho, conforme mostra Zhang et al. (2010).

Segundo Zhang et al. (2010), com o conceito de “grau de verdade” a teoria dos conjuntos Fuzzy amplia a aplicação da teoria dos conjuntos tradicionais. Os grupos são rotulados

qualitativamente (alto, morno, ativo, pequeno, perto, etc.) e os elementos deste conjunto são caracterizados, ou seja, estabelece valores que indicam o grau em que um elemento pertence.

A literatura reporta outros trabalhos desenvolvidos utilizando essa técnica como mecanismo de diagnóstico de falhas, Ogaji et al. (2005a) e Verma et al. (2006) estudaram aplicação de Lógica Fuzzy para análise de diagnóstico em turbinas a gás aeronáuticas. Celik e Bayir (2007) relataram a detecção de falhas em motores de combustão interna utilizando essa técnica.

2.4.3 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman é um algoritmo recursivo muito eficiente. Ele minimiza o erro médio quadrático de uma variável de estado a partir de um histórico completo de feedback sensorial recebido durante determinada atividade cuja leituras sofrem a perturbação de algum ruído (incerteza).

De acordo com Denève et al. (2007), um filtro de Kalman é um integrador ideal no sentido de que minimiza o erro da estimativa, dado o histórico completo dos feedbacks sensoriais recebidos durante o movimento. A propriedade chave de um Filtro de Kalman é sua habilidade de combinar as estimativas geradas internamente com estimativas obtidas a partir desses feedbacks sensoriais.

Segundo Nerger et al. (2005), quando o modelo é linear e o ruído é Gaussiano, a estratégia ideal para a análise é através de um filtro de Kalman, que pode ser usado para o controle ideal e também está na maioria dos recentes modelos de tomada de decisão.

2.4.4 Rede Bayesian

Uma rede Bayesianiana consiste em representar graficamente o conhecimento de um domínio onde não se tem certeza de todas as variáveis presentes. Essa técnica estabelece uma combinação de dados estatísticos do sistema em análise de forma a representar um resumo das possíveis circunstâncias envolvidas em um domínio. Como exemplo, uma rede Bayesianiana pode representar a probabilidade entre falhas e avarias de um dado sistema térmico. De acordo com Capra et al.

(2006), os sintomas dados podem ser usados por essa rede para computar as probabilidades da presença de falhas.

O uso de uma rede Bayesiana dentro do Diagnóstico Termodinâmico pode ser constatado a partir do momento em que as anomalias e as causas a elas relacionadas passam a ser representadas por probabilidades. Desta maneira, um tratamento estatístico baseado na elaboração de uma rede Bayesian permitirá determinar a probabilidade de ocorrência de uma anomalia qualquer.

A grande vantagem da utilização das redes bayesianas está relacionada ao fato delas permitem analisar grandes quantidades de dados, que para o diagnóstico em sistemas de geração termelétrica é de grande valia visto que essas plantas contam com vários pontos de aquisição de dados para controle e operação do sistema. Porém, dentro desse mesmo contexto, Silva (2009) chama a atenção para o fato desse método normalmente não permitir a diferenciação das anomalias induzidas das intrínsecas.

2.4.5 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos utilizam ferramentas computacionais para solucionar problemas de otimização. Robustos, genéricos e de fácil adaptação, consistem de uma técnica amplamente estudada e utilizada em diversas áreas, inclusive no diagnóstico de sistemas térmicos. Os algoritmos genéticos são indicados para a aplicação de solução de problemas que envolvam um grande número de variáveis.

Ogaji et al. (2005b) desenvolveu estudo a cerca de diagnóstico de desempenho em turbinas a gás baseados na técnica de algoritmos genéticos. De forma similar, a análise do uso de algoritmos genéticos aplicados ao diagnóstico de falhas em motores pode ser visto em Sampath et al. (2002).

Esta metodologia permite uma abordagem para o tratamento de ruídos (incertezas) e comportamentos não lineares em comparação às técnicas de redes neurais e lógica fuzzy. Por outro lado o grande número de iterações requeridas para uma convergência adequada, em virtude da grande quantidade de dados processados, implica em alto esforço computacional.

2.5 Reconciliação

Embora esta técnica seja às vezes seja tratada como um método termoeconômico, ela não apresenta as características básicas inerentes à metodologia termoeconômica, tais como estrutura produtiva, fluxos exergéticos e definição de consumo exergético unitário, dentre outros. Logo, será método é citado neste trabalho de maneira independente do método termoeconômico.

No método de reconciliação a maneira de se obter os resultados é através de equações analíticas baseadas em linearização. O modelo implementado determina quais são as causas que impactam nos indicadores de desempenho da planta, tais como o Heat Rate e ou no produto total produzido pela instalação de acordo com Zaleta et al. (2004a).

Segundo Zaleta et al. (2004b), para o desenvolvimento de um sistema de reconciliação são necessários as seguintes considerações:

- Definição de um estado de referência;
- Definição de um modelo analítico para os componentes do ciclo;
- Determinação de variáveis livres;
- Definição de uma condição de operação;
- Desenvolvimento do módulo de reconciliação.

O desenvolvimento do módulo de reconciliação determinará quais são as causas que impactam nos indicadores de desempenho da planta, como por exemplo: o consumo específico de combustível, rendimento global da instalação, etc. Nesse processo, cada malfuncionamento seria corrigida individualmente avaliando qual o ganho que seria obtido em cada indicador de desempenho analisado. Desta maneira, é como se a unidade estivesse sendo reparada da condição TOP (condição de operação em teste) para uma condição de referência ROP (condição de referência operacional) passando por cada avaria de maneira individual, avaliando a influência da retirada das mesmas nos indicadores de desempenho.

Segundo Zaleta et al. (2004a), uma etapa importante desta metodologia é estabelecer um modelo que represente bem o funcionamento da instalação fora do ponto de projeto para assim evitar linearizações para previsões de desempenho, pois a cada anomalia eliminada, haverá uma nova condição de funcionamento da instalação com novos desempenhos de seus componentes.

Santaló (2007), seguindo essa mesma linha de raciocínio, alerta que para uma correta avaliação sobre o ganho nos indicadores de desempenho da planta pela eliminação de uma anomalia, deve-se considerar, em conjunto, o impacto da eliminação das malfunções intrínsecas e o impacto causado pela eliminação das malfunções induzidas.

Chávez et al. (2006) desenvolveu o uso da metodologia Seis Sigma aplicada ao diagnóstico por reconciliação. A principal finalidade era evitar o extenso cálculo numérico-analítico utilizado pelo método de reconciliação originariamente concebido. Essa metodologia representa uma tentativa de determinar quais os parâmetros mais importantes a se analisar e que permitam alcançar os objetivos em um estudo dessa natureza.

Pacheco Ibarra et al. (2010) apresentaram um estudo propondo uma metodologia termodinâmica híbrida baseada nos conceitos da fórmula de impacto do combustível e um método de reconciliação analítica. Tal método é capaz de detectar, isolar e quantificar individualmente o impacto de cada anomalia sobre o consumo de combustível. Uma central termelétrica de ciclo combinado é utilizada para validar o modelo matemático. Os autores avaliam que a grande vantagem desse método híbrido está relacionada à possibilidade de diagnosticar diversas anomalias ao mesmo tempo.

Silva et al. (2009b), (2009c) e (2011) apresentaram trabalhos correlacionados ao desenvolvimento de um sistema de informação para o diagnóstico e prognóstico em uma central termelétrica. O sistema é baseado em uma abordagem analítica que informa a condição termodinâmica atual de todos os componentes do ciclo, bem como a melhoria que pode ser obtida no desempenho do ciclo através da eliminação das anomalias detectadas.

2.6 Termoeconômico

O principal objetivo do Diagnóstico Termoeconômico é detectar o desvio da eficiência na operação de sistemas térmicos, determinando suas causas e quantificando o efeito de cada uma delas no consumo de recursos adicionais, como aponta Valero et al. (2004a).

O principal problema no diagnóstico de sistemas térmicos é a detecção de quais são os equipamentos responsáveis pelas malfunções do sistema e quanto é a contribuição de cada um destes no consumo adicional de recursos.

A Teoria Estrutural da Termoeconomia (Valero et al., 1993) combina as técnicas de Termoeconomia no impacto do consumo de combustível e análise exegética. Conseqüentemente,

esta teoria pode calcular os custos unitários dos produtos dos equipamentos com a aplicação da regra da cadeia das derivadas para as equações características dos modelos Termoeconômicos. A teoria estrutural no Diagnóstico Termoeconômico foi introduzida por Torres et al. (2002), combinando as técnicas da Termoeconomia e análise exergética no impacto de consumo adicional de combustível. São apresentados os conceitos de malfunção, malfunção intrínseca, malfunção induzida e disfunção.

- **Malfunção:** é a variação do consumo exergético unitário para cada componente do ciclo entre, estado de referência e estado real, como pode ser observado na Equação 2.7.

$$MF_i = \Delta k_i \cdot P_i^0 \quad (2.7)$$

Onde Δk_i é a variação do consumo exergético entre a condição de referência e a condição de teste P_i^0 é o produto do equipamento no estado de referência.

Sendo que o consumo exergético unitário para uma mesmo componente tomando uma estrutura produtiva como referência é definido conforme Equação 2.8. É importante ressaltar que o valor de K nunca será inferior a “1”, pois caso esse valor fosse menor do que “1” violaria a segunda lei da Termodinâmica.

$$k_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (2.8)$$

Onde F_i é o insumo exergético e P_i é o produto exergético do equipamento.

- **Malfunção intrínseca:** é a malfunção causada pela deterioração do rendimento de um componente devido à presença de uma anomalia. Consequentemente será necessário um consumo adicional de insumo para que este componente mantenha o mesmo produto.

- **Malfunção induzida:** é a malfunção causada pela variação de insumo em um componente, ou seja, pela sua operação fora do ponto de projeto. O componente seguirá sua curva de desempenho. Tanto a malfunção induzida como a disfunção podem ser resultado do funcionamento do sistema de controle como também por uma malfunção presente em outro componente do ciclo.

- **Disfunção:** é o resultado de como os componentes do sistema se adaptam para manterem a produção total em decorrência da operação fora do ponto de projeto sem queda no desempenho do componente. O produto é alterado devido somente à variação no insumo, porém sem perda de rendimento

De acordo com Usón et al. (2007), uma das principais dificuldades encontradas no Diagnóstico Termoeconômico tem sido a separação das malfunções intrínsecas das malfunções induzidas. Segundo Silva (2009), em uma unidade termelétrica, quando a eficiência de um componente começa a diminuir, todos os parâmetros da planta sofrem certo impacto. E este impacto será influenciado pelo sistema de controle da planta, que tentará manter os parâmetros controlados dentro de uma faixa aceitável. São produzidas assim, pela intervenção do sistema de controle, novas malfunções induzidas, alterando as malfunções induzidas que se dariam se não houvesse a presença do mesmo.

De acordo com Silva (2009) as malfunções podem ser classificadas quanto a sua origem, ou seja, externas à planta (Condições ambientais e Qualidade do combustível) ou internas à planta (Intrínsecas e Induzidas).

Conforme apresentado, o consumo exergético unitário é definido como a razão entre o insumo exergético, F , e o produto exergético, P , para uma mesmo componente conforme a Equação 2.8. Logo, tratando-se de consumo exergético e sendo os processos reais irreversíveis, a exergia necessária para obtenção de produto é necessariamente dependente das destruições das exergias envolvidas nos processos responsáveis pela sua formação. Desta forma, segundo Orozco (2013), o consumo exergético de um produto é o somatório de sua exergia mais a exergia destruída em sua produção. Logo, a exergia na saída (P) de um componente do sistema térmico é necessariamente menor do que a exergia na sua entrada (F) em função das irreversibilidades (I) existente no componente. Este fato é apresentado na Equação 2.9

$$F = P + I \quad (2.9)$$

Para a realização de uma análise Termoeconômica é necessário representar o sistema térmico através de uma estrutura produtiva. A definição da estrutura produtiva está diretamente relacionada ao conceito de insumo (F) e produto (P). Logo, para se definir o processo de formação de custos, é preciso definir a função de cada unidade de modo que o sistema de equações determine a relação entre as unidades e as unidades e o ambiente externo.

Lazzaretto e Toffolo (2006) apresentam uma ampla discussão sobre as potencialidades e os limites de procedimentos de diagnósticos propostos na literatura para distinguir os efeitos induzidos por anomalias em outros componentes daqueles que são gerados intrinsecamente. O que é considerado como sendo a principal tarefa para localizar, efetivamente, as causas das anomalias em sistemas de energia.

A avaliação das malfunções induzidas é a principal dificuldade no uso da fórmula do impacto do combustível no Diagnóstico Termoeconômico, por isso um grande esforço foi concentrado em desenvolver procedimentos para localizar e quantificar as anomalias induzidas. Nesse ponto o problema TADEUS (Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy Utility Systems), iniciado em 2001, apresentava como objetivo aplicar procedimentos de diferentes grupos de pesquisa na análise termoeconômica para o diagnóstico de anomalias e ineficiências de sistemas energéticos, estabelecer conceitos comuns e nomenclaturas, comparar resultados e evidenciar as principais características de cada abordagem.

Verda et al. (2003) foca nas características que deveria ter o sistema de diagnóstico em uma planta térmica e o conceito de condição de referência, em outros trabalhos o autor aplica diferentes tratamentos para o mesmo problema. Valero et al. (2004a) fornece as características de operação, propriedades termodinâmicas de projeto e estratégia de controle para um ciclo combinado. Possíveis falhas de componentes e principais aspectos teóricos da abordagem termoeconômica são apresentadas por Valero et al. (2004b) para a mesma planta.

Vários outros autores se basearam na proposta de Valero et al. (2004a) e Valero et al. (2004b) para apresentar suas metodologias, dentre os quais se destacam os trabalhos de Zaleta et al. (2004b), Reini e Taccani (2004), Correias (2004) e Lazzaretto et al. (2006).

Silva et al. (2009a) efetuaram um estudo baseado nos princípios da análise termoeconômica para realizar o diagnóstico de desempenho em ciclo combinado de cogeração simulando algumas anomalias na planta. O trabalho apresenta um sistema de Diagnóstico Termoeconômico com base na definição de uma estrutura produtiva que utiliza entalpia e neguentropia como componente da exergia física e se mostrou uma ferramenta eficaz no diagnóstico de sistemas térmicos.

Cafaro et al. (2010) desenvolveu um trabalho de monitoramento e de desempenho termoeconômico em uma planta de ciclo combinado. O objetivo era encontrar resultados preliminares que permitissem fornecer procedimentos e ferramentas de suporte de manutenção

ao cliente a partir dos cálculos índices termoeconômicos que fossem capazes de representar a degradação da planta.

Orozco (2013) desenvolve um modelo computacional para monitoração e diagnóstico do desempenho de centrais termelétricas de ciclo combinado por meio da metodologia termoeconômica. O sistema permite calcular os impactos causados pelas variáveis operacionais e climáticas sobre o comportamento do sistema além de permitir a realização do prognóstico. Uma característica importante do sistema desenvolvido está relacionada ao fato do mesmo só ser aplicável em análises para um regime permanente de operação da planta.

CAPÍTULO 3

DIAGNÓSTICO TERMoeCONÔMICO

Este capítulo aborda os conceitos gerais do Diagnóstico Termoeconômico voltados para avaliação de sistemas térmicos que serão aplicados no estudo de caso desta dissertação. Adicionalmente, esta mesma metodologia de Diagnóstico Termoeconômico será aplicada em uma planta simples para exemplificação e análise da metodologia utilizada bem como comparação dos resultados obtidos entre os modelos Termoeconômicos E, E&S e H&S verificando suas vantagens, desvantagens e limitações.

3.1 Conceitos Gerais do Diagnóstico Termoeconômico

O diagnóstico é a arte de descobrir e entender sinais de malfunções e quantificar seus efeitos. No caso do Diagnóstico Termoeconômico, o efeito da malfunção é quantificado em termos de recursos adicionais consumidos para obter a mesma produção, ambos em qualidade e quantidade (Uche, 2000).

O Diagnóstico Termoeconômico apresenta como resultado a quantificação dos efeitos das degradações dos equipamentos, enquanto que outros procedimentos restringem-se a identificarem as anomalias. Para realização do Diagnóstico Termoeconômico e quantificação desses efeitos, é necessário ter como base a estrutura produtiva do sistema térmico, onde cada componente ou subsistema é definido de acordo com a função desempenhada no ciclo (produto) e de acordo com os recursos que consomem (insumos) para que possam exercer suas funções.

Conforme apresentado no capítulo 2, a teoria estrutural foi introduzida no Diagnóstico Termoeconômico por Torres et al. (2002), combinando as técnicas da Termoeconomia e análise exérgica no impacto no consumo de combustível. A aplicação deste método exige que o sistema térmico seja representado através de uma estrutura produtiva. A estrutura produtiva é um gráfico que mostra um conjunto de relações que definem a interação entre os próprios

componentes e do ambiente. De acordo com Belisario (2012), o diagrama produtivo trata-se de uma complementação gráfica da estrutura produtiva que auxilia na construção do modelo Termoeconômico e torna mais amigável a análise da função produtiva de cada subsistema da planta. Para que seja possível a representação da estrutura produtiva, é necessário que anteriormente a estrutura física do sistema térmico a ser analisado seja informada. Na Figura 3.1 é apresentado exemplo de uma estrutura física de um ciclo Brayton de cogeração através de seus quatro equipamentos ou subsistemas: câmara de combustão (CC), compressor de ar (CA), turbina a gás (TG) e caldeira de recuperação (CR).

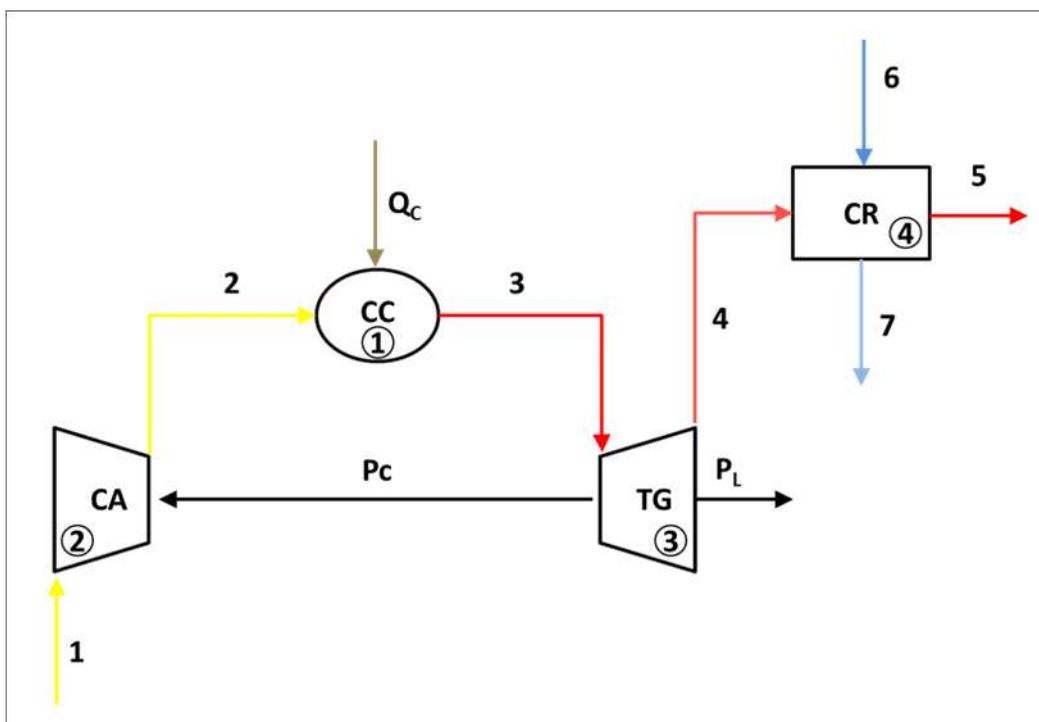


Figura 3.1: Estrutura física de um ciclo Brayton de cogeração

Para representar uma estrutura produtiva utilizando notação matricial E_{ij} , onde E_{ij} representam os fluxos de Exergia e significa que o fluxo vem do componente i e vai para o componente j , é necessário entender que significa que o fluxo possui o sentido do componente i para o componente j . Também são representadas as junções e bifurcações que são necessários para representar as interações entre os componentes. De acordo com Usón (2008) as bifurcações e junções podem representar tanto os dispositivos físicos que aparecem na planta ou elementos fictícios introduzidos para construir a estrutura produtiva. Um exemplo de uma estrutura

produtiva, que representa a estrutura física da Figura 3.1 é apresentado na Figura 3.3 contemplando todos os seus elementos.

Além das unidades reais representadas por retângulos, a estrutura produtiva conta com equipamentos fictícios auxiliares representados por losangos e círculos, chamados de junções e bifurcações, respectivamente. As junções são utilizadas quando uma unidade possui mais de um insumo, que se juntam na junção e formam um único insumo. Já as bifurcações são utilizadas quando uma unidade possui mais de um produto definido. A Figura 3.2 mostra as unidades fictícias utilizadas em diagramas produtivos.

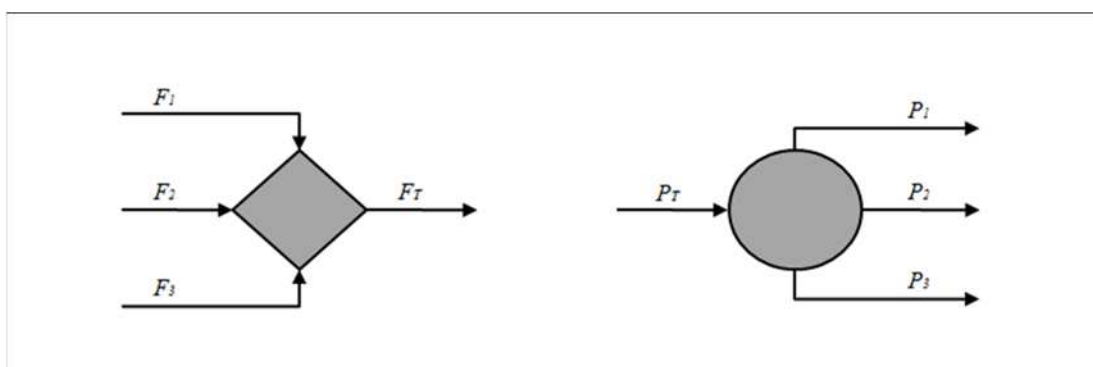


Figura 3.2: Representação de junção (esquerda) e bifurcação (direita).

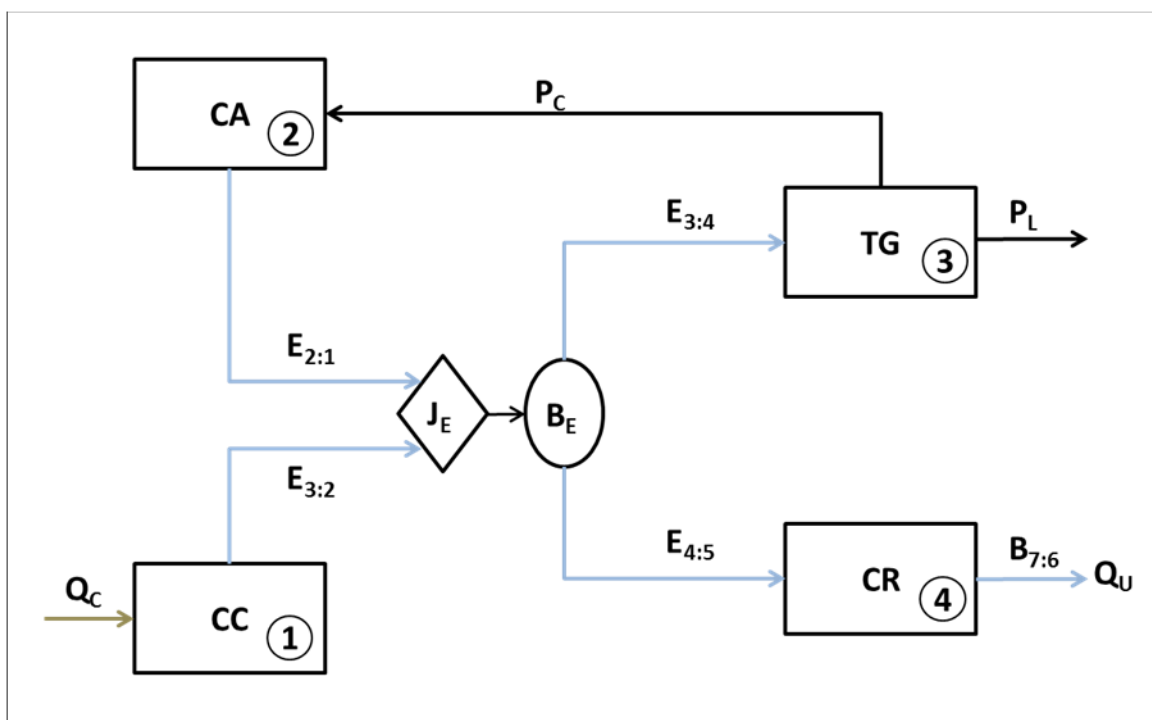


Figura 3.3: Estrutura produtiva de um ciclo Brayton de cogeração

É possível verificar que na Figura 3.3, os componentes do sistema começam com o número 1 e aumentam de forma crescente de acordo com a quantidade de componentes do sistema térmico.

O insumo e o produto de um componente qualquer do sistema térmico, serão calculados utilizando as Equações 3.1 e 3.2.

$$P_i = \sum_{j=0}^n E_{ij} \quad (3.1)$$

$$F_i = \sum_{j=0}^n E_{ji} \quad (3.2)$$

Assim, pode-se apresentar o consumo exergético unitário em função da quantidade de exergia necessária para cada componente para obtenção do seu produto. Esta representação é apresentada na Equação 3.3.

$$K_{ij} = \frac{F_{ij}}{P_j} \quad (3.3)$$

Conclui-se que a soma de todos os consumos exergéticos unitários de um componente será conforme a Equação 3.4.

$$K_j = \sum_{i=0}^n k_{ij} = \frac{F_j}{P_j} \quad (3.4)$$

O produto de um componente pode ser tanto um produto da planta como um insumo para outro componente, que neste caso é usado internamente à mesma (Silva, 2009). Sendo assim, a equação para cálculo do produto pode ser expressa conforme a Equação 3.5.

$$P_i = B_{i0} + \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (3.5)$$

Onde B_{i0} é a contribuição do componente i para o produto de todo o sistema.

Para o desenvolvimento do Diagnóstico Termoeconômico do estudo de caso desta dissertação, que trata se um sistema térmico real e complexo, é necessário ter uma abordagem e metodologia de cálculo que nos conduza ao resultado de forma sistêmica, com resultados confiáveis e robustos. Para isso, é necessário descrever a metodologia de desenvolvimento do Diagnóstico Termoeconômico em notação matricial. Logo, são apresentadas as equações necessárias para este desenvolvimento.

Escrevendo de forma matricial a Equação 3.5, temos a equação característica de uma estrutura produtiva na Equação 3.6.

$$P = P_S + \langle KP \rangle P \quad (3.6)$$

Onde:

P_S representa um vetor (nx1) que possui os dados da contribuição de cada componente na produção global do sistema e;

$\langle KP \rangle$ representa a matriz (nxn) cujos elementos correspondem aos consumos exergeticos unitários k_{ij} .

A Equação 3.7 relaciona a produção de cada componente do sistema térmico como uma função da produção final e o consumo unitário de cada componente. Isso auxilia o desenvolvimento matemático do Diagnóstico Termoeconômico:

$$P = |P\rangle P_S \quad \text{onde: } |P\rangle = (U_D - \langle KP \rangle)^{-1} \quad (3.7)$$

Da mesma maneira, a irreversibilidade de cada componente é expressa conforme a Equação (3.8).

$$I = |I\rangle P_S \quad \text{onde: } |I\rangle = (K_D - U_D) |P\rangle \quad (3.8)$$

Enquanto que o total de recursos do sistema térmico pode ser expresso de acordo com a Equação 3.9.

$$F_T = k_e^t |P\rangle P_S \quad (3.9)$$

Onde $K_e^t(K_{01}, \dots, K_{0n})$, é um vetor (nx1) e representa os consumos exergéticos unitários dos recursos externos.

Os fluxos de produto de um mesmo componente possuem o mesmo processo de formação e, portanto possuem o mesmo consumo exergético unitário. Desta forma, pode-se apresentar a Equação 3.10.

$$K_{ij} = K_{p,i} \quad (3.10)$$

De acordo com Usón e Valero (2010), aplicando o balanço de custos para todos os componentes, pode ser demonstrado que o consumo exergético unitário dos fluxos pode ser obtido usando a Equação 3.11.

$$K_p = |P\rangle^t K_e \quad \text{onde: } |P\rangle = (U_D - \langle KP \rangle)^{-1} \quad (3.11)$$

O consumo adicional de combustível de um sistema térmico pode ser expresso pela diferença de consumo de insumos entre a operação da planta na condição de teste e a operação da planta na condição de projeto ou condição de referência com o mesmo objetivo de produção. Na Equação 3.12 é representado o consumo adicional de recursos.

$$\Delta F_T = F_T + F_T^0 \quad (3.12)$$

E essa equação pode ser dividida na soma das irreversibilidades de cada componente, conforme apresentado na Equação 3.13.

$$\Delta F_T = \Delta I_T = \sum_{j=1}^n (I_j - I_j^0) = \sum_{j=1}^n \Delta I \quad (3.13)$$

A Equação 3.14 analisa o impacto no aumento do consumo do combustível em virtude de um aumento no consumo exergético unitário dos componentes. Assim, segundo Usón e Valero (2011) esta expressão é muito importante para o Diagnóstico Termoeconômico porque relaciona a variação do consumo de combustível de um sistema com a variação dos consumos exergéticos unitários dos componentes do mesmo, e com a variação da produção.

$$\Delta F_T = \Delta K_e^t P^0 + K_p^{*t} \Delta \langle KP \rangle P^0 + K_p^{*t} \Delta P_S \quad (3.14)$$

Se não houver alteração na produção total da planta, a equação é reescrita da seguinte conforme a Equação 3.15.

$$\Delta F_T = (\Delta K_e^t + K_p^{*t} \Delta \langle KP \rangle) P^0 \quad (3.15)$$

Reescrevendo em formato escalar, é possível apresentar a Equação 3.16.

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0}^n K_{p,j}^* \Delta K_{ji} \right) P_i^0 \quad (3.16)$$

Quando se utiliza a equação acima, o consumo adicional de insumo ΔF_T (também chamado de Impacto de combustível) pode ser expresso como a soma da contribuição de cada componente.

A variação do consumo exergético de cada componente do sistema térmico aumenta o consumo de recursos e suas irreversibilidades na quantidade de $\Delta K_{ji} \cdot P_i^0$, que é chamado de *malfunções*. Isto implica conseqüentemente em um consumo adicional de recurso dado por $\Delta K_{p,j}^* \Delta K_{j,i} \cdot P_i^0$, que é o *custo das malfunções*. Entretanto, o impacto de combustível total pode ser escrito como a soma das malfunções em cada componente como apresentado na Equação 3.16.

Desta forma, a malfunção, que é o aumento do consumo unitário exergético do próprio componente pode ser expresso pela Equação 3.17.

$$MF_i = P_i^0 \Delta K_i = \sum_{j=0}^n P_i^0 \Delta K_{ji} \quad (3.17)$$

A disfunção descrita na Equação 3.18 é o resultado de maior consumo de insumos induzida em virtude de malfunções em outros componentes do sistema térmico, que força um consumo adicional de recurso para obter a produção adicional de recursos requerida por outros componentes. A malfunção afeta somente o comportamento dos componentes enquanto que a disfunção é o resultado de como os componentes se adaptam para manter a produção total.

$$DF_i = (K_i - 1) \Delta P_i \quad (3.18)$$

3.2 Aplicação do Diagnostico Termoeconômico para um caso simples

De forma a exemplificar o método proposto, será realizado o Diagnóstico Termoeconômico em um sistema térmico de menor complexidade. O sistema térmico para esta análise será o mesmo utilizado no capítulo 1 para exemplificação da motivação do trabalho, onde a estrutura física é apresentada na Figura 1.2 e as estruturas produtivas dos modelos E, E&S e H&S são apresentadas, respectivamente nas Figuras 1.3, 1.4 e 1.5.

Com o objetivo de verificar as vantagens da utilização do modelo H&S para realização de Diagnósticos Termoeconômicos de sistemas térmicos, será realizado o Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do exemplo utilizado os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e o H&S) e ao final, os resultados de todos os três Diagnósticos Termoeconômicos realizados serão apresentados e analisados.

Na Tabela 3.1 estão as descrições e os principais parâmetros (vazão, pressão e temperatura) dos fluxos físicos do ciclo para a condição de referência do sistema térmico. O combustível é o gás natural, cujo consumo em base exergética (QC) é de 70.000 kW.

Tabela 3.1: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência (condição de referência)

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
Nº	DESCRIÇÃO			
0 (ref)	Ambiente	0,00	1,01	25,00
1	Água	19,5	0,07	39,04
2	Água	19,5	63,00	39,50
3	Vapor	19,5	60,00	500,00
4	Mistura ($x=0,9$)	19,5	0,07	39,04

O gerador elétrico produz 20.230 kW de potência elétrica. Porém, a potência elétrica líquida (P_L) é de 20.000 kW porque uma parte ($P_B = 155$ kW) é consumida pela bomba de alimentação e outra parte ($P_C = 75$ kW) alimenta a bomba de resfriamento do condensador. Estes dados são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência (condição de referência)

Descrição	KW
P_L	20.000
P_C	75
P_B	155

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência considerando a condição de referência.

Tabela 3.3: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência (condição de Referência)

FLUXOS FÍSICOS	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	e [kJ/kg]	H [kW]	S [kW]	E [kW]
0 (ref)	104,84	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
1	163,35	0,56	1,24	1.140,97	1.116,78	24,19
2	170,99	0,56	7,63	1.289,78	1.140,96	148,82
3	3.422,31	6,88	1.375,44	64.690,60	37.869,43	26.821,17
4	2.330,76	7,50	98,50	43.405,31	41.484,49	1.920,82
Qc						70.000,00

Todos os valores de entalpia (h), entropia (s) e exergia (e) dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo apresentados na Tabela 3.3 são calculados com a utilização da ferramenta *steamtable* instalado no Excel® 2003. H, S e E representam respectivamente os valores da entalpia total, entropia total e exergia total dos fluxos físicos.

Na Tabela 3.4 são apresentados os valores das eficiências do gerador a vapor, turbina a vapor e bomba de alimentação. Estes dados são utilizados para as simulações das anomalias realizadas neste capítulo.

Tabela 3.4: Valores de eficiência dos equipamentos (condição de Referência)

Item	Descrição	Valor (%)
η_{GV}	Eficiência térmica do gerador de vapor (GV)	90,573%
η_{TV}	Eficiência isentrópica da turbina a vapor (TV)	84,903%
η_B	Eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B)	82,972%
η_{motorB}	Eficiência do motor elétrico da bomba de alimentação	95,042%
$\eta_{Gerador}$	Eficiência do gerador elétrico	96,004%

Onde a eficiência térmica do gerador de vapor (GV) é calculada conforme a Equação 3.19, a eficiência isentrópica da turbina a vapor (TV) é calculada conforme a Equação 3.20, a eficiência

isentrópica da bomba de alimentação (B) é calculada de acordo com a Equação 3.21, a eficiência do motor elétrico da bomba de alimentação é calculada conforme a Equação 3.22 e a eficiência do gerador elétrico é calculada conforme a Equação 3.23.

$$\eta_{GV} = m_2(h_3 - h_2) / Q_C \quad (3.19)$$

$$\eta_{TV} = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4S}) \quad (3.20)$$

$$\eta_B = (h_{2S} - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (3.21)$$

$$\eta_{motorB} = m_2(h_2 - h_1) / P_B \quad (3.22)$$

$$\eta_{Gerador} = W_{GE} / (m_2(h_3 - h_4)) \quad (3.23)$$

Além da realização do Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do exemplo utilizando os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S), cinco diferentes anomalias são simuladas neste sistema térmico para cada um destes modelos Termoeconômicos. Desta forma, quinze diferentes resultados de Diagnósticos Termoeconômico são apresentados, comparados e analisados para consolidar a robustez deste método de Diagnóstico e verificar a diferença entre os modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S). As cinco anomalias simuladas são:

Anomalia 1 – Redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV);

Anomalia 2 – Redução de 10% da eficiência isentrópica da turbina (TV);

Anomalia 3 – Redução de 10% da eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B);

Anomalia 4 – Aumento de 10% da pressão de vácuo do condensador (C);

Anomalia 5 – Redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV), redução de 10% da eficiência isentrópica da turbina (TV), redução de 10% da eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B) e aumento de 10% da pressão de vácuo do condensador (C), ou seja, todas as anomalias 1, 2, 3 e 4 juntas.

Para a realização de todos os casos de Diagnósticos Termoeconômicos desta dissertação, será utilizada a metodologia proposta por Orozco (2013). Esta metodologia consiste na realização do Diagnóstico Termoeconômico do impacto no consumo adicional de combustível

tem duas fases: a análise Termoeconômica e o Diagnóstico Termoeconômico e cada uma delas tem várias etapas como mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: *Etapas para realização do Diagnóstico Termoeconômico*

Fonte: Adaptado de Orozco (2013)

Item	Etapas	Descrição
Análise Termoeconômica	1	Definir a condição de referência
	2	Definir a condição de teste
	3	Representação F-P
	4	Obtenção da matriz $\langle KP \rangle$
	5	Elaboração da matriz unitária U_D
	6	Cálculo do operador produto $ P\rangle$
	7	Cálculo do operador de irreversibilidade $ I\rangle$
	8	Obtenção do consumo exergético unitário dos produtos de cada componente
Diagnóstico Termoeconômico	9	Obtenção da matriz $\Delta\langle KP \rangle$
	10	Obtenção da matriz de anomalias
	11	Obtenção da matriz de disfunções
	12	Cálculo do consumo adicional de combustível

Todas as etapas desta metodologia são apresentadas para um dos quinze diferentes Diagnósticos Termoeconômicos do sistema térmico do exemplo realizados a fim de exemplificar e apresentar esta ferramenta de Diagnóstico em detalhes. Portanto, no item 3.2.1.1 é apresentada em detalhes a metodologia para o modelo E considerando redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV) sendo que os resultados das etapas dos demais Diagnósticos Termoeconômicos realizados para o sistema térmico do exemplo são apresentados no Apêndice A.

3.2.1 Diagnóstico Termoeconômico considerando redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV) (Anomalia 1)

Nesta seção serão realizados os Diagnósticos Termoeconômicos para os três diferentes modelos (E, E&S e H&S) considerando redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV).

3.2.1.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 1)

ETAPAS 1 e 2 – Definir a condição de referência e condição de teste:

Os dados da condição de referência são apresentados na Tabela 3.1. Os dados da condição de teste do sistema térmico do exemplo são calculados considerando a condição de anomalia no gerador de vapor (GV) com uma redução de 10% em sua eficiência térmica, ou seja, uma redução da eficiência térmica do gerador de vapor de 90,573% para 80,573%. Os dados da condição de teste ou operação são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 1)

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
Nº	DESCRIÇÃO			
0 (ref)	Ambiente	0,00	1,01	25,00
1	Água	19,5	0,07	39,04
2	Água	19,5	63,00	39,50
3	Vapor	19,5	60,00	500,00
4	Mistura ($x=0,9$)	19,5	0,07	39,04

Nesta condição de operação, todos os equipamentos mantêm os seus produtos, havendo somente alteração da eficiência térmica do gerador de vapor e conseqüentemente aumentando o consumo de combustível em função desta alteração para manutenção da mesma potência líquida do sistema térmico.

O valor de consumo total de combustível é calculado considerando a Equação 3.24. O valor consumo adicional de combustível encontrado como resultado dos Diagnósticos Termoeconômicos considerando a anomalia 1 para os modelos E, E&S e H&S são idênticos ao valor da diferença entre o valor total do combustível calculado para a condição de teste (com anomalia) e a condição de referência do sistema térmico. Este resultado mostra valores encontrados dos Diagnósticos realizados são coerentes, pois pelo método do Diagnóstico Termoeconômico o valor encontrado como consumo adicional de combustível precisa ser necessariamente igual ao valor adicional consumido de combustível do meio externo para o sistema térmico.

$$Q_C = m_2(h_3 - h_2)/\eta_{GV} \quad (3.24)$$

Onde Q_C é o valor total de combustível, m_2 é a vazão do fluxo físico n° 02, h_3 é a entalpia do fluxo físico n°3, h_2 é a entalpia do fluxo físico n°02 e η_{GV} é a eficiência térmica do gerador a vapor.

Na Tabela 3.7 são apresentados os valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a simulação da anomalia 1. Como nesta situação foi simulada somente a redução de 10% da eficiência térmica do gerador a vapor, pode ser verificado na Tabela 3.7 que somente o valor total do consumo de combustível aumentou de 70.000 para 78.687,82 kW para que as condições dos fluxos físicos de saída do gerador a vapor não fossem alteradas em função da alteração da eficiência térmica do gerador a vapor.

Tabela 3.7: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 1)

FLUXOS FÍSICOS	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	e [kJ/kg]	H [kW]	S [kW]	E [kW]
0 (ref)	104,84	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
1	163,35	0,56	1,24	1.140,97	1.116,78	24,19
2	170,99	0,56	7,63	1.289,78	1.140,96	148,82
3	3.422,31	6,88	1.375,44	64.690,60	37.869,43	26.821,17
4	2.330,76	7,50	98,50	43.405,31	41.484,49	1.920,82
Qc						78.687,82

Todos os valores de entalpia (h), entropia (s) e exergia (e) dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo apresentados na Tabela 3.7 são calculados com a utilização da ferramenta *steamtable* instalado no Excel® 2003. H, S e E representam respectivamente os valores da entalpia total, entropia total e exergia total dos fluxos físicos.

Além dos dados dos fluxos físicos para a condição de teste considerando a anomalia 1, são apresentados na Tabela 3.8 os dados de potência elétrica dos equipamentos do sistema térmico. Para esta anomalia não ocorre nenhuma alteração dos consumos elétricos dos equipamentos, visto que a anomalia está localizada somente no gerador a vapor e desta forma não interfere em nenhum outro equipamento do sistema.

Tabela 3.8: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 1)

Descrição	KW
P _L	20.000
P _C	75
P _B	155

ETAPA 3 – Representação F-P:

Para obtenção matricial dos dados de insumo e produto para compor a tabela F-P é necessário à elaboração da estrutura produtiva do sistema térmico, a qual foi apresentada na Figura 1.3 para o modelo E. Através da estrutura produtiva e das condições de referência e condição de teste do sistema térmico é elaborada a matriz F-P para a condição de referência e para a condição de teste, sendo ambas apresentadas nas Tabelas 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9: Matriz F-P para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		70.000					70.000
P _{GV}					26.672		26.672
P _B					125		125
P _{TV-C-GE}						20.230	20.230
P _{JE&P}				26.872			26.872
P _{B_p}	20.000		155		75		20.230
TOTAL	0	70.000	0	26.872	26.797	20.230	

Tabela 3.10: Matriz F-P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		78.688					78.688
P _{GV}					26.672		26.672
P _B					125		125
P _{TV-C-GE}						20.230	20.230
P _{JE&P}				26.872			26.872
P _{B_p}	20.000		155		75		20.230
TOTAL	20.000	78.688	155	26.872	26.872	20.230	

Estes valores são obtidos usando a distribuição de fluxos de exergia de acordo com a estrutura produtiva da Figura 1.3. A última linha das tabelas (total) representa o insumo total de cada equipamento i . Este valor é obtido por adição de todas as contribuições recebidas pelo equipamento i , dos outros equipamentos j do ciclo. Da mesma maneira no lado do produto (lado direito da matriz F-P) existe uma coluna que representa a produção total de cada equipamento.

ETAPA 4 – Obtenção da matriz (KP):

A matriz KP é a matriz que seus elementos representam os consumos exergéticos unitários dos equipamentos do sistema e é calculada utilizando a Equação 3.3. Essa matriz é calculada e apresentada tanto pra a condição de referência quanto para a condição de teste do sistema térmico analisado são apresentadas nas Tabelas 3.11 e 3.12, respectivamente.

Tabela 3.11: *Matriz KP para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E*

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	0	2,624	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,993	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	JE&P	0,000	0,000	1,328	0,000	0,000
P	B _p	0,000	1,244	0,000	0,003	0,000
TOTAL		2,624	1,244	1,328	1,000	1,000

Tabela 3.12: *Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)*

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	0	2,950	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,993	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	JE&P	0,000	0,000	1,328	0,000	0,000
P	B _p	0,000	1,244	0,000	0,003	0,000
TOTAL		2,950	1,244	1,328	1,000	1,000

Onde o consumo exergético total de cada equipamento é representado pelo somatório dos elementos das linhas de cada coluna (última linha da matriz) e necessariamente precisa ser maior ou igual a 1. Para as junções e bifurcações das estruturas produtivas, o valor é unitário, como pode ser verificado para a junção E&P e bifurcação B_p em ambas as Tabelas 3.11 e 3.12.

ETAPA 5 – Elaboração da matriz unitária U_D :

A matriz U_D é uma matriz unitária diagonal e é apresentada na Tabela 3.13. Ela é necessária para realização do cálculo do operador $|P\rangle$ e do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ de acordo com as Equações 3.7 e 3.8, respectivamente.

Tabela 3.13: Matriz unitária U_D do Ciclo Rankine de potência para o modelo E

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	GV	1				
P	B		1			
P	TV-C-GE			1		
P	JE&P				1	
P	B _p					1

ETAPA 6 – Cálculo do operador produto $|P\rangle$:

A matriz do operador produto $|P\rangle$ é calculada utilizando a Equação 3.7 tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste. Ambas são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 3.14 e 3.15.

Tabela 3.14: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	GV	1,000	1,659	1,334	1,004	1,334
P	B	0,000	1,008	0,006	0,005	0,006
P	TV-C-GE	0,000	1,258	1,012	0,009	1,012
P	JE&P	0,000	1,671	1,344	1,012	1,344
P	B _p	0,000	1,258	0,012	0,009	1,012
	TOTAL	1,000	6,853	3,706	2,037	4,706

Tabela 3.15: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	GV	1,000	1,659	1,334	1,004	1,334
P	B	0,000	1,008	0,006	0,005	0,006
P	TV-C-GE	0,000	1,258	1,012	0,009	1,012
P	JE&P	0,000	1,671	1,344	1,012	1,344
P	B _p	0,000	1,258	0,012	0,009	1,012
	TOTAL	1,000	6,853	3,706	2,037	4,706

ETAPA 7 – Cálculo do operador de irreversibilidade |I|:

O cálculo da matriz de irreversibilidade |I| é realizado conforme a Equação 3.8. Essa matriz apresentará os coeficientes de irreversibilidades geradas por cada componente do sistema térmico e a partir deles é possível realizar o cálculo das malfunções e disfunções dos equipamentos. A matriz de irreversibilidades é apresentada para a condição de teste na Tabela 3.16.

Tabela 3.16: *Matriz do operador de irreversibilidade |I| para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)*

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{Bp}
P	GV	1,950	3,235	2,601	1,958	2,601
P	B	0,000	0,246	0,002	0,001	0,002
P	TV-C-GE	0,000	0,413	0,332	0,003	0,332
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	TOTAL	1,950	3,893	2,934	1,962	2,934

ETAPA 8 – Obtenção do consumo exergético unitário dos produtos de cada componente:

Para obtenção do consumo exergético unitário dos produtos de cada componente é necessário calcular os consumos unitários de acordo com a Equação 3.11. Na Tabela 3.17 é apresentado o consumo exergético unitário dos equipamentos do sistema analisado tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste.

Tabela 3.17: *Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 1) para o exemplo utilizando o modelo E*

Equipamento	K _i na condição de referência	K _i na condição de teste	ΔK _i
GV	2,6244	2,9502	0,3257
B	1,2437	1,2437	0,0000
TV-C-GE	1,3283	1,3283	0,0000

ETAPA 9 – Obtenção da matriz $\Delta\langle KP \rangle$:

Essa matriz representa a diferença entre as matrizes $\langle KP \rangle$ calculadas tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste, sendo que a matriz $\langle KP \rangle$ é a matriz do consumo exergético unitário dos equipamentos. Logo, a matriz $\Delta\langle KP \rangle$ representará a diferença entre os consumos exergético unitários na condição de teste e a condição de referência. Na tabela 3.18 é apresentada a matriz $\Delta\langle KP \rangle$.

Tabela 3.18: Matriz $\Delta\langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{B_p}
P₀	0,326	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{TV-C-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE&P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{B_p}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,326	0,000	0,000	0,000	0,000

Onde a última linha desta matriz representa o vetor resultante da diferença dos consumos exergéticos unitários dos equipamentos entre a condição de referência e a condição de teste.

ETAPA 10 – Obtenção da matriz de anomalias

Na Tabela 3.19 é apresentada a matriz contendo os dados das malfunções de cada equipamento em função das anomalias existentes no sistema na condição de teste. As malfunções são calculadas exatamente como apresentado na Equação 3.17.

Tabela 3.19: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{B_p}
P₀	8687,82	0,00	0,00	0,00	0,00
P_{GV}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P_B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P_{TV-C-GE}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P_{JE&P}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P_{B_p}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	8687,82	0,00	0,00	0,00	0,00

Onde a última linha apresenta o total das malfunções dos equipamentos.

ETAPA 11 – Obtenção da matriz de disfunções

Essa matriz apresenta os dados das disfunções dos equipamentos do sistema. As disfunções são calculadas como apresentado na Equação 3.18. Na Tabela 3.20 é apresentada a matriz das disfunções.

Tabela 3.20: *Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)*

	F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}	TOTAL
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{TV-C-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{JE&P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Onde a última linha apresenta o total das disfunções dos equipamentos.

ETAPA 12 – Cálculo do consumo adicional de combustível

Nesta etapa são somadas as malfunções com as disfunções para obter o consumo adicional de combustível. Os resultados são apresentados na Tabela 3.21.

Tabela 3.21: *Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)*

	GV	B	TV-C-GE	JE&P	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8.687,8	8.687,8
ΔI_B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{TV-C-GE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JE&P}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{B_p}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Malfunção	8.687,8	0,0	0,0	0,0	0,0		8.687,8	
Consumo adicional de combustível	8.687,8	0,0	0,0	0,0	0,0			8.687,8

Onde a linha DI representa a soma das disfunções geradas por cada componente, a coluna DF é a soma das disfunções geradas em cada componente, a coluna Malfunção representa a soma das malfunções em cada componente, a coluna Total representa o consumo adicional de combustível de cada componente e na última linha da matriz é apresentado o consumo adicional

de combustível total do sistema. Esta forma de apresentação facilita a visualização da contribuição de cada equipamento no consumo adicional de combustível total do sistema.

De forma a analisar os resultados obtidos no Diagnóstico Termoeconômico, são apresentados na Figura 3.4 em forma gráfica os resultados obtidos e apresentados na Tabela 3.21. Com a análise deste gráfico, é possível verificar quais equipamentos contribuem para o aumento do consumo adicional de combustível e quais os valores das malfunções e disfunções de cada equipamento, onde o consumo adicional de combustível é o resultado da soma das malfunções e disfunções. Pode ser verificado que para este exemplo existe malfunção somente no gerador a vapor enquanto que é observada a inexistência de malfunções nos outros equipamentos (comparação entre a condição de referência e a condição de teste).

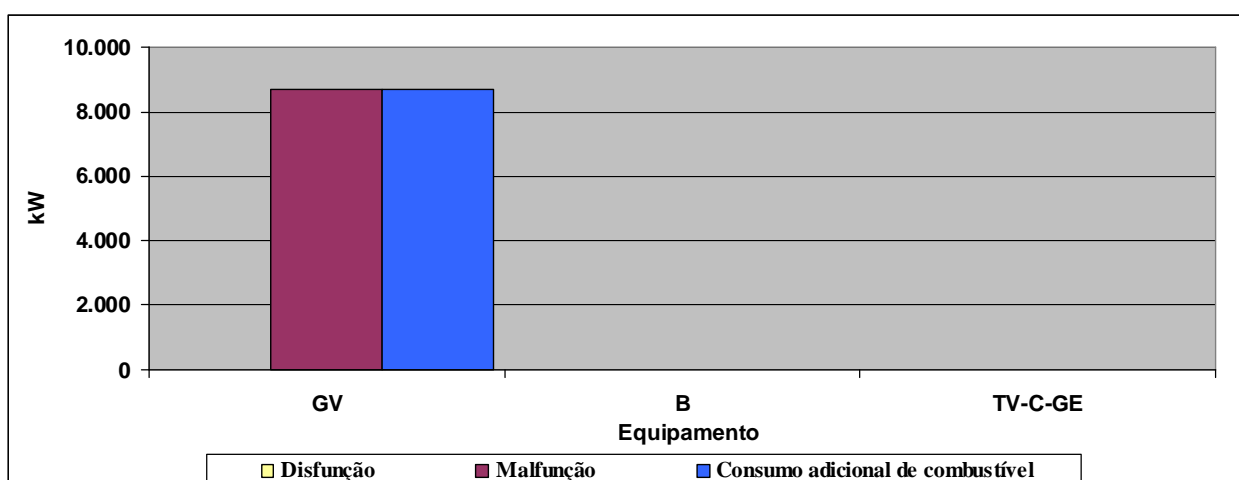


Figura 3.4: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)

No gráfico apresentado na Figura 3.5 são apresentadas as malfunções, disfunções bem como o valor do consumo adicional de combustível gerados por cada equipamento. Para este caso é observado somente malfunção no gerador a vapor, que é totalmente coerente com a anomalia que foi simulada nesse equipamento (redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor). Como era esperado, não é observado nenhum consumo adicional de combustível nos outros equipamentos, pois não ocorreu nenhuma alteração dos fluxos físicos bem como qualquer alteração dos insumos e produtos destes equipamentos.

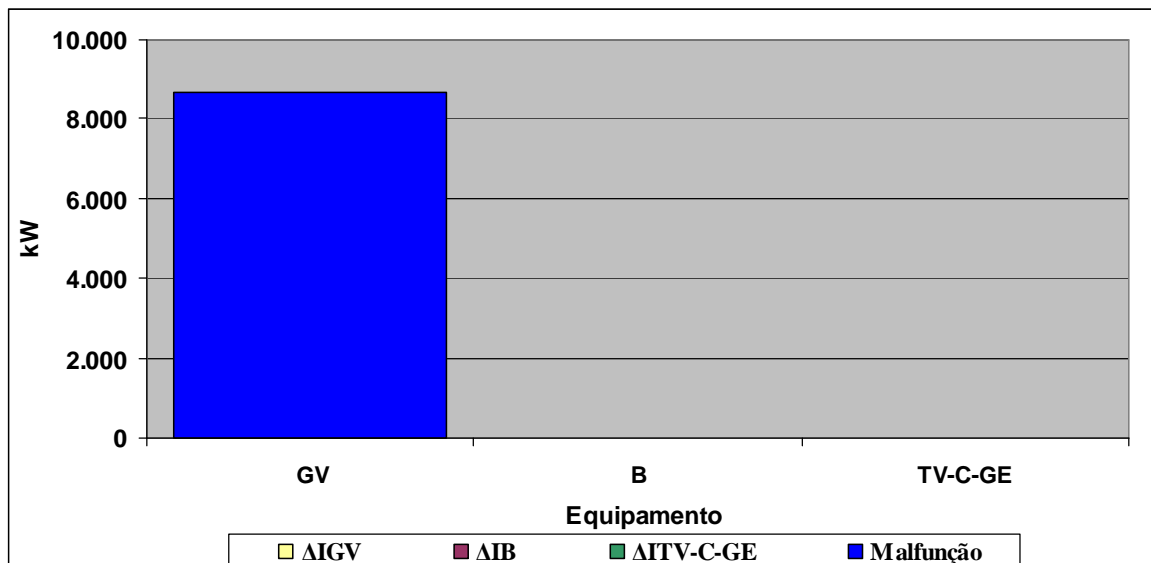


Figura 3.5: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 1)

3.2.1.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)

Os resultados do Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do exemplo considerando a anomalia 1 e utilizando o modelo E&S são apresentados na Tabelas 3.22. É possível verificar que não ocorreu nenhuma alteração dos valores de malfunção e disfunções encontrados no Diagnóstico Termoeconômico entre os modelos E&S e o modelo E apresentado na seção 3.2.1.1.

Tabela 3.22: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI _{GV}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8.687,8	8.687,8
ΔI _B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI _{TV-GE}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI _C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI _{JE&BE}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI _{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI _{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Malfunção	8.687,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		8.687,8	
Consumo adicional de combustível	8.687,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			8.687,8

3.2.1.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)

Os resultados do Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do exemplo utilizando o modelo H&S, são idênticos aos resultados encontrados utilizando o modelo E e E&S para a anomalia 1. O resultado do Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo H&S para a anomalia 1 é apresentado na Tabela 3.23

Tabela 3.23: *Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)*

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8.687,8	8.687,8
ΔI_B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{TV-GE}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Malfunção	8.687,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8.687,8	
Consumo adicional de combustível	8.687,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		8.687,8

3.2.2 Diagnóstico Termoeconômico considerando redução de 10% da eficiência isentrópica da Turbina a vapor (TV) (Anomalia 2)

Nesta seção são realizados os Diagnósticos Termoeconômicos considerando redução de 10% da eficiência isentrópica da Turbina a vapor (TV) do ciclo Rankine do exemplo para os três diferentes modelos (E, E&S e H&S).

Os dados da condição de referência são apresentados na Tabela 3.1. Os dados da condição de teste do sistema térmico do exemplo são calculados considerando a condição de anomalia na turbina a vapor (TV) com uma redução de 10% em sua eficiência isentrópica, ou seja, uma redução da eficiência isentrópica de da Turbina a vapor de 84,903% para 74,903%. Os dados para esta condição de teste ou operação são apresentados na Tabela 3.24.

O valor consumo adicional de combustível encontrado como resultado dos Diagnósticos Termoeconômicos considerando a anomalia 2 para os modelos E, E&S e H&S são idênticos ao

valor da diferença entre o valor total do combustível calculado para a condição de teste (com anomalia) e a condição de referência do sistema térmico. Este resultado mostra valores encontrados dos Diagnósticos realizados são coerentes.

Tabela 3.24: *Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 2)*

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
Nº	DESCRIÇÃO			
0 (ref)	Ambiente	0	1,01	25,00
1	Água	22,13	0,07	39,01
2	Água	22,13	63,00	39,50
3	Vapor	22,13	60,00	500,00
4	Mistura (x=0,95)	22,13	0,07	39,01

Os dados da condição de teste dos fluxos físicos do ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a anomalia 2 foram calculados utilizando a ferramenta *steamtable* instalado no Excel® 2003. Desta forma, as propriedades específicas de entalpia e entropia da água e do vapor, bem como temperaturas e título do vapor dos fluxos físicos foram determinadas considerando a anomalia simulada.

Na Tabela 3.25 são apresentados os valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a simulação da anomalia 2. Como nesta situação foi simulada somente a redução de 10% da eficiência isentrópica da turbina a vapor, pode ser verificado na Tabela 3.25 que somente a vazão de vapor do ciclo aumentou de 19,50 para 22,13 kg/s a fim de manter a potência líquida final do sistema ($P_L=20.000$ kW).

Tabela 3.25: *Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 2)*

FLUXOS FÍSICOS	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	e [kJ/kg]	H [kW]	S [kW]	E [kW]
0 (ref)	104,84	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
1	163,35	0,56	1,24	1.294,63	1.267,18	27,44
2	170,99	0,56	7,63	1.463,47	1.294,61	168,86
3	3.422,31	6,88	1.375,44	73.402,64	42.969,40	30.433,24
4	2.459,32	7,91	104,27	52.095,38	49.788,23	2.307,15
Qc						79.427,06

Para o cálculo da condição do fluxo físico nº04 foi considerada o novo valor de eficiência isentrópica da turbina (η_{TV}) a vapor de 74,903% e utilizada a Equação 3.25 para cálculo do valor de entalpia deste fluxo físico.

$$h_4 = h_3 - (h_3 - h_{4S})\eta_{TV} \quad (3.25)$$

Onde h_{4S} possui valor de 2136,66 kJ/kg e é calculado utilizando o suplemento steamtable considerando como referência para este cálculo o valor da pressão do fluxo físico nº 4 (0,07 bar) e a entropia específica do fluxo físico nº 3 (6,88 kJ/kg.K).

Os outros valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo apresentados na Tabela 3.25 são calculados com a utilização do steamtable. H, S e E representam respectivamente os valores da entalpia total, entropia total e exergia total dos fluxos físicos.

Além dos dados dos fluxos físicos para a condição de teste considerando a anomalia 2, são apresentados na Tabela 3.26 os dados de potência elétrica dos equipamentos do sistema térmico. A potência elétrica da bomba é calculada conforme Equação 3.26 e potência líquida do sistema térmico é mantida com o mesmo valor da condição de referência.

$$P_B = m_2(h_2 - h_1) / \eta_{motorB} \quad (3.26)$$

Onde m_2 , h_1 e h_2 são respectivamente, vazão de água do fluxo físico nº 2, entalpia do fluxo físico nº 1 e entalpia do fluxo físico nº 2. O η_{motorB} é apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.26: Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 2)

Descrição	KW
P_L	20.000
P_C	75
P_B	176

Apresentado todos os dados da condição de teste para o sistema térmico considerando a simulação da anomalia 2, são realizados os Diagnósticos Termoeconômicos utilizando os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S) e os seus resultados são apresentados nos

itens 3.2.2.1, 3.2.2.2 e 3.2.2.3, sendo que os dados de cada etapa deste desenvolvimento são apresentados no apêndice A.

3.2.2.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 2)

Na Tabela 3.27 são apresentados os valores obtidos resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 2 utilizando o modelo E. É possível verificar que a redução da eficiência isentrópica em 10% inserida na turbina a vapor com a redução da eficiência isentrópica acarreta uma malfuncção na turbina de 3.577,9 kW e uma disfunção significativa no gerador de vapor (GV) de 5.835kW.

Tabela 3.27: *Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)*

	GV	B	TV-C-GE	JE&P	B _p	DF	Malfuncção	Total
ΔI_{GV}	0,0	0,0	5.842,4	-7,3	0,0	5.835,0	0,0	5.835,0
ΔI_B	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	4,1	0,0	4,1
$\Delta I_{TV-C-GE}$	0,0	0,0	15,1	-4,5	0,0	10,5	3.577,4	3.587,9
$\Delta I_{JE\&P}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	0,0	5.861,5	-11,9	0,0	5.849,7		
Malfuncção	0,0	0,0	3.577,4	0,0	0,0		3.577,4	
Consumo adicional de combustível	0,0	0,0	9.438,9	-11,9	0,0			9.427,1

O gráfico da Figura 3.6 apresenta os mesmos dados da Tabela 3.27 de forma a melhorar a sua visualização e interpretação. O resultado do Diagnóstico Termoeconômico além de apresentar o resultado final dos valores do consumo adicional de combustível, também apresenta as interações e os equipamentos responsáveis pelas malfuncções e disfunções no sistema. Na Figura 3.7, o gráfico mostra claramente que 100% da disfunção gerada no gerador a vapor (GV) é causado pela turbina a vapor (TV). Este resultado ratifica que a anomalia 2 inserida na turbina a vapor ocasionou o consumo adicional de combustível no gerador a vapor.

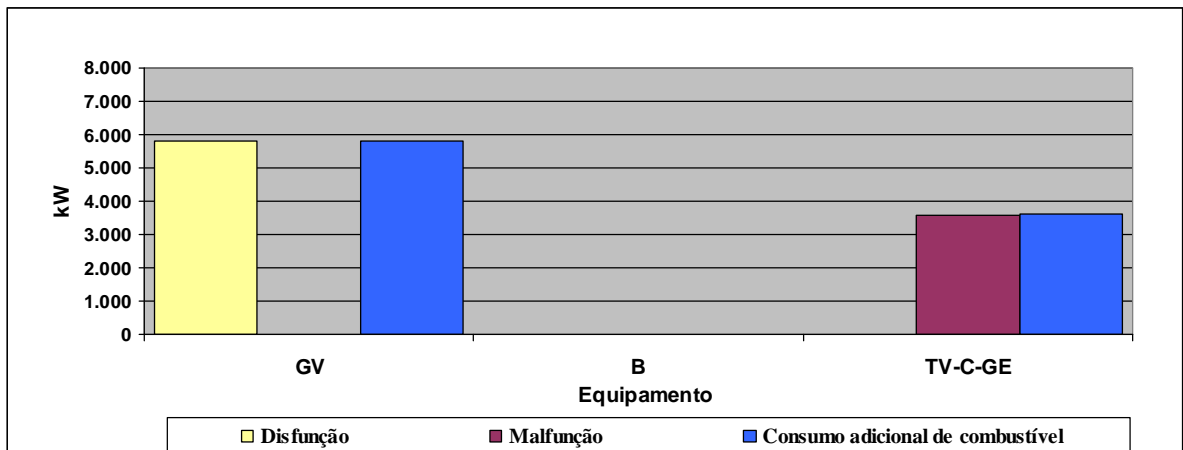


Figura 3.6: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

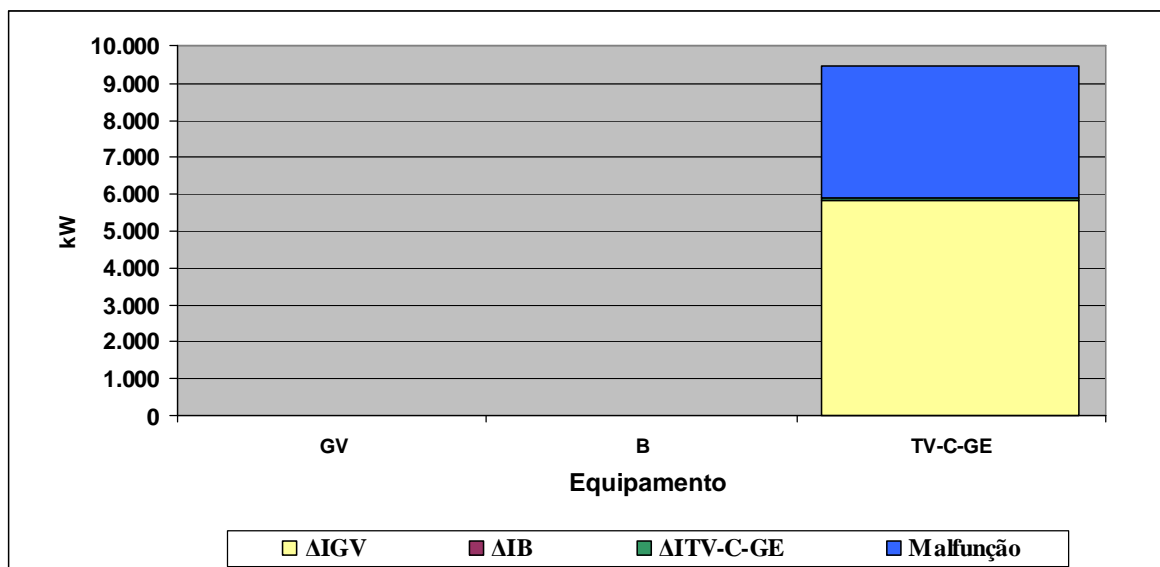


Figura 3.7: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

3.2.2.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

Na Tabela 3.28 são apresentados os valores obtidos do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 2 utilizando o modelo E&S.

Tabela 3.28: *Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)*

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	0,0	10.838,6	-57,2	0,0	0,0	0,0	10.781,3	0,0	10.781,3
ΔI_B	0,0	0,0	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	7,3
ΔI_{TV-GE}	0,0	0,0	24,4	-9,3	0,0	0,0	0,0	15,1	6.393,5	6.408,6
ΔI_C	0,0	0,0	-7.786,8	29,1	0,0	0,0	0,0	-7.757,7	-12,6	-7.770,3
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	0,0	3.083,6	-37,4	0,0	0,0	0,0	3.046,2		
Malfunção	0,0	0,0	6.393,5	-12,6	0,0	0,0	0,0		6.380,9	
Consumo adicional de combustível	0,0	0,0	9.477,1	-50,1	0,0	0,0	0,0			9.427,1

Uma diferença que fica evidente entre os resultados obtidos entre os modelo E e E&S são os valores negativos encontrados para o condensador (malfunção e disfunção). Como visto no capítulo 1, o modelo E&S apresenta limitação para tratamento de equipamentos dissipativos (condensador) e é possível constatar que esta limitação interfere diretamente no resultado do Diagnóstico Termoeconômico realizado.

São apresentados os dados da Tabela 3.28 de forma gráfica na Figura 3.8. A malfunção encontrada na turbina a vapor (TV) é em função da anomalia 2 de redução da eficiência isentrópica de 10% deste equipamento. Da mesma forma que no modelo E, verifica-se na Figura 3.9 que o único equipamento responsável pelas disfunções encontradas nos outros equipamentos do ciclo é turbina a vapor (TV). Porém, além de ratificar que a anomalia 2 inserida na turbina a vapor ocasionou consumo adicional de combustível em função da alteração dos produtos de outros equipamentos (disfunções), o resultado deste Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo E&S também evidencia a limitação do modelo E&S para tratamento de equipamentos dissipativos (condensador).

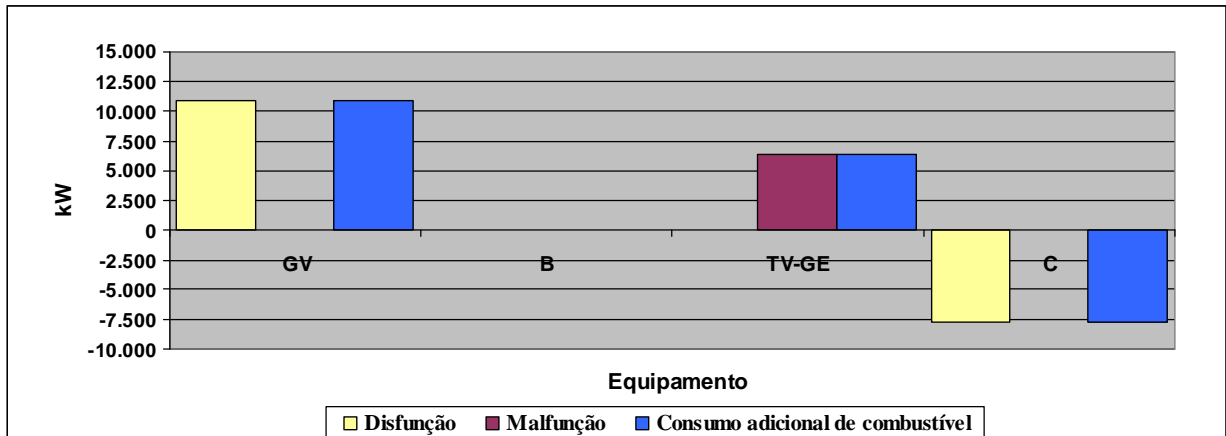


Figura 3.8: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

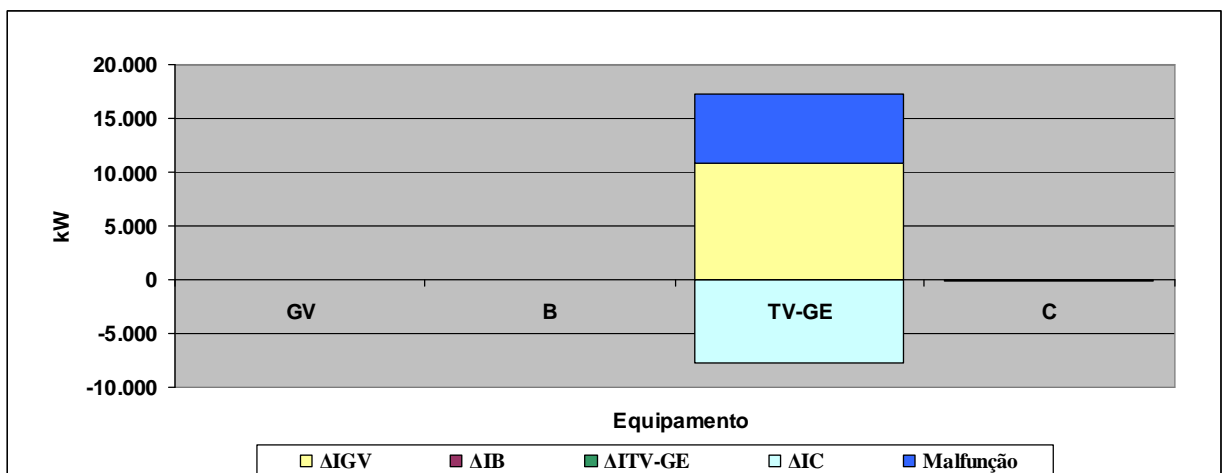


Figura 3.9: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

3.2.2.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

O resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 2 utilizando o modelo H&S é apresentado na Tabela 3.29.

Tabela 3.29: *Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)*

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	0,0	5.866,0	-31,0	0,0	0,0	0,0	5.835,0	0,0	5.835,0
ΔI_B	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	4,1
ΔI_{TV-GE}	0,0	0,0	13,1	-5,0	0,0	0,0	0,0	8,1	3.196,7	3.204,9
ΔI_C	0,0	0,0	397,2	-1,5	0,0	0,0	0,0	395,7	-12,6	383,1
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	0,0	6.280,4	-37,4	0,0	0,0	0,0	6.242,9		
Malfunção	0,0	0,0	3.196,7	-12,6	0,0	0,0	0,0		3.184,1	
Consumo adicional de combustível	0,0	0,0	9.477,1	-50,1	0,0	0,0	0,0			9.427,1

Da mesma forma que os resultados encontrados nos modelos E e E&S para a anomalia 2, existe malfunção na turbina a vapor e este resultado é coerente visto a simulação de anomalia somente neste equipamento. Porém, diferentemente do modelo E&S, os valores obtidos para o equipamento dissipativo deste sistema (condensador) são coerentes e corroboram com a abordagem realizada no capítulo 1, na motivação deste trabalho. Os dados da Tabela 3.29 são apresentados de forma gráfica nas Figuras 3.10 e 3.11 e de forma similar aos modelos E e E&S evidencia que além da malfunção encontrada na turbina a vapor, existem disfunções geradas pela turbina nos outros equipamentos do ciclo.

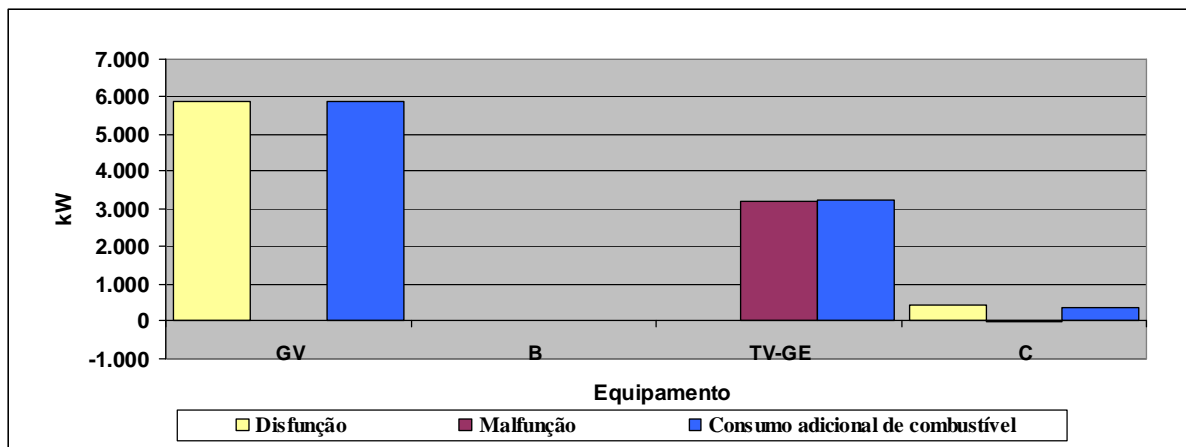


Figura 3.10: *Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)*

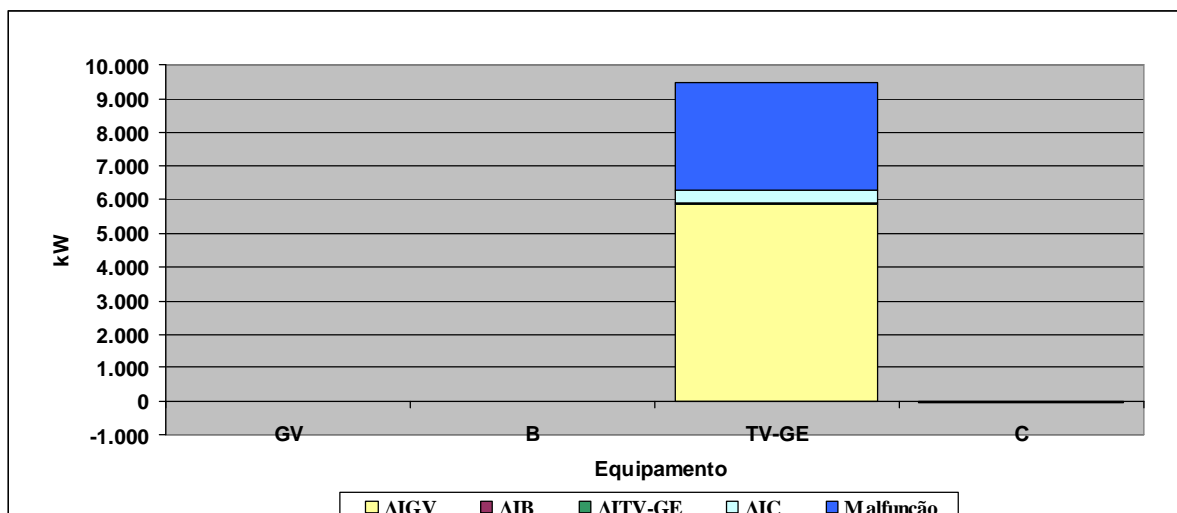


Figura 3.11: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

Uma observação importante oriunda da comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos entre os modelos E, E&S e H&S é que o valor total da soma do consumo adicional de combustível da turbina a vapor e do condensador é igual nos modelos E e H&S, diferindo somente no modelo E&S conforme base de dados apresentada na Tabela 3.30. Para o modelo E, o valor da soma entre as malfunções e disfunções da turbina a vapor e do condensador é de 3587,9 kW, para o modelo E&S é de -1361,6 kW e para o modelo H&S é de 3587,9 kW. Este resultado mostra que o Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo H&S é capaz de realizar o tratamento de equipamentos dissipativos (condensador) quantificando de maneira independente a contribuição destes equipamentos no consumo adicional de combustível do sistema térmico.

Tabela 3.30: Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 2

Equipamento	Malfunção [kW]			Disfunção [kW]		
	E	E&S	H&S	E	E&S	H&S
GV	0,0	0,0	0,0	5835,0	10781,3	5835,0
B	0,0	0,0	0,0	4,1	7,3	4,1
TV-C-GE	3577,4	6393,5	3196,7	10,5	15,1	8,1
C	-	-12,6	-12,6	-	-7757,7	395,7
TOTAL	3577,4	6380,9	3184,1	5849,7	3046,2	6242,9

3.2.3 Diagnóstico Termoeconômico considerando redução de 10% da eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B) (Anomalia 3)

Nesta seção são realizados os Diagnósticos Termoeconômicos considerando redução de 10% da eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B) do ciclo Rankine do exemplo para os três diferentes modelos (E, E&S e H&S).

Os dados da condição de referência são apresentados na Tabela 3.1. Os dados da condição de teste do sistema térmico do exemplo são calculados considerando a condição de anomalia na bomba de alimentação (B) com uma redução de 10% em sua eficiência isentrópica, ou seja, uma redução da eficiência isentrópica bomba de alimentação de 82,972% para 72,972%. Os dados da condição de teste considerando esta anomalia são apresentados na Tabela 3.31.

Tabela 3.31: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 3)

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
Nº	DESCRIÇÃO			
0 (ref)	Ambiente	0	1,01	25,00
1	Água	19,52	0,07	39,01
2	Água	19,52	63,00	39,75
3	Vapor	19,52	60,00	500,00
4	Mistura (x=0,90)	19,52	0,07	39,01

Os dados dos fluxos físicos da condição de teste do ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a anomalia 3 são calculados utilizando a ferramenta *steamtable* instalado no Excel® 2003. Desta forma, as propriedades específicas de entalpia e entropia da água e do vapor, bem como temperaturas e título do vapor dos fluxos físicos são determinadas considerando a anomalia simulada.

O valor consumo adicional de combustível encontrado como resultado dos Diagnósticos Termoeconômicos considerando a anomalia 3 para os modelos E, E&S e H&S são idênticos ao valor da diferença entre o valor total do combustível calculado para a condição de teste (com anomalia) e a condição de referência do sistema térmico. Este resultado mostra valores encontrados dos Diagnósticos realizados são coerentes.

Na Tabela 3.32 são apresentados os valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a condições dos fluxos físicos com a simulação da anomalia 3. Com esta simulação, a vazão de água do ciclo aumentou de 19,50 para 19,52 kg/s a fim de manter a potência líquida final do sistema ($P_L=20.000$ kW).

Tabela 3.32: *Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 3)*

FLUXOS FÍSICOS	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	e [kJ/kg]	H [kW]	S [kW]	E [kW]
0 (ref)	104,84	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
1	163,35	0,56	1,24	1.142,18	1.117,97	24,21
2	172,03	0,57	7,68	1.311,56	1.161,63	149,93
3	3.422,31	6,88	1.375,44	64.759,12	37.909,54	26.849,58
4	2.330,76	7,50	98,50	43.451,28	41.528,43	1.922,85
Qc						70.051,61

Para o cálculo da condição do fluxo físico n° 02 é considerado o novo valor de eficiência isentrópica da bomba de alimentação (η_B) de 72,972% e utilizada a Equação 3.27 para cálculo do valor de entalpia deste fluxo físico.

$$h_2 = h_1 - (h_{2S} - h_1)\eta_B \quad (3.27)$$

Onde h_{2S} possui valor de 169,69 kJ/kg e é calculado utilizando o suplemento steamtable considerando como referência para este cálculo o valor da pressão do fluxo físico n°2 (63,00 bar) e a entropia específica do fluxo físico n° 1 (0,56 kJ/kg.K).

O valor consumo adicional de combustível encontrado como resultado dos Diagnósticos Termoeconômicos considerando a anomalia 3 para os modelos E, E&S e H&S são idênticos ao valor da diferença entre o valor total do combustível calculado para a condição real (com anomalia) e a condição de referência do sistema térmico. Este resultado mostra valores encontrados dos Diagnósticos realizados são coerentes.

Os outros valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo apresentados na Tabela 3.32 são calculados com a utilização do steamtable. H, S e E representam respectivamente os valores da entalpia total, entropia total e exergia total destes fluxos físicos.

Além dos dados dos fluxos físicos para a condição de teste considerando a anomalia 3, são apresentados na Tabela 3.33 os dados de potência elétrica dos equipamentos do sistema térmico para esta nova condição. Conforme apresentado anteriormente, a potência líquida é mantida com o mesmo valor da condição de referência, porém a potência elétrica da bomba é calculada conforme Equação 3.26

Tabela 3.33: *Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 3)*

Descrição	KW
P _L	20.000
P _C	75
P _B	176

Os Diagnósticos Termoeconômicos utilizando os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S) considerando a anomalia 3 são apresentados nos itens 3.2.3.1, 3.2.3.2 e 3.2.3.3 e os dados de cada etapa deste desenvolvimento são apresentados no apêndice A.

3.2.3.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 3)

Na Tabela 3.34 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 3 utilizando o modelo E. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.12. É possível verificar que a redução da eficiência isentrópica em 10% na bomba de alimentação ocasiona uma malfunção de 19,9 kW neste equipamento.

Tabela 3.34: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

	GV	B	TV-C-GE	JE&P	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	43,1	-0,1	1,3	0,0	44,3	-20,0	24,3
ΔI_B	0,0	0,1	0,0	0,4	0,0	0,4	19,9	20,3
$\Delta I_{TV-C-GE}$	0,0	6,6	0,0	0,4	0,0	7,0	-0,1	7,0
$\Delta I_{JE\&P}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	49,8	-0,1	2,1	0,0	51,8		
Malfunção	-20,0	19,9	-0,1	0,0	0,0		-0,2	
Consumo adicional de combustível	-20,0	69,7	-0,2	2,1	0,0			51,61

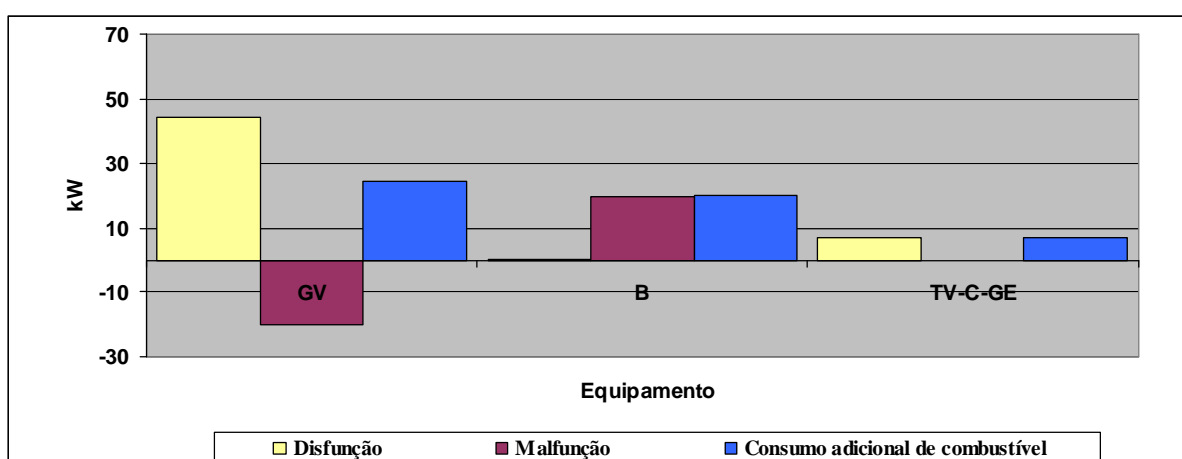


Figura 3.12: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

Na Figura 3.13 é apresentado o gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico. Diferentemente dos outros Diagnósticos Termoeconômicos realizados para as anomalias 1 e 2 onde somente o equipamento em que a anomalia foi inserida (simulada) apresentou malfunção nos resultados destes Diagnósticos, para o caso da anomalia 3, percebe-se malfunção com valor negativo no gerador de vapor (GV). Esta malfunção é resultado da melhora do consumo exergético do gerador de vapor da condição de teste comparada a condição de referência. Este melhor desempenho é resultado do aumento da temperatura da água de alimentação na entrada da caldeira, ocasionando assim melhora no rendimento exergético do gerador de vapor. Desta forma, é possível concluir que esta malfunção é uma malfunção induzida por outro equipamento (bomba de alimentação (B)). Porém, podemos realizar esta afirmação por se tratar de um caso simples onde a anomalia do sistema foi simulada exatamente para que os resultados destes Diagnósticos fossem discutidos e analisados. Em um sistema de maior

complexidade, onde o objetivo da realização do Diagnóstico Termoeconômico é exatamente encontrar as malfunções e disfunções do sistema térmico sem conhecer previamente as anomalias existentes neste, não é possível a diferenciação entre as malfunções intrínsecas das induzidas somente pelo método do Diagnóstico Termoeconômico.

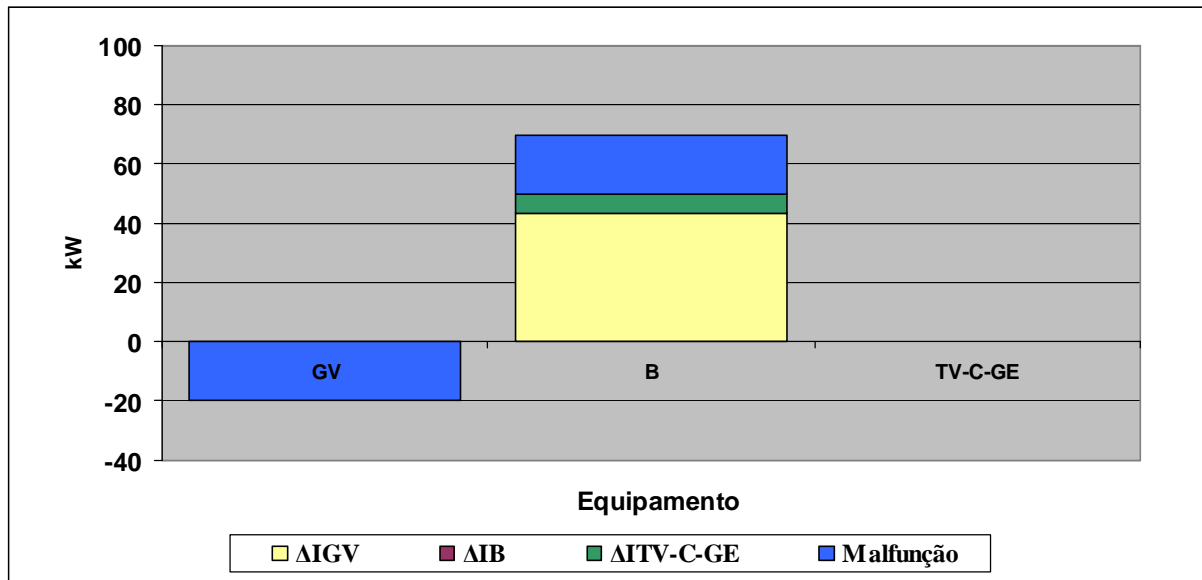


Figura 3.13: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

3.2.3.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

Na Tabela 3.35 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 3 utilizando o modelo E&S. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.14. É possível verificar que a redução da eficiência isentrópica em 10% na bomba de alimentação ocasiona uma malfunção de 39,0 kW neste equipamento.

Tabela 3.35: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	-2,9	82,8	0,0	-0,3	2,3	0,0	0,0	81,9	-38,1	43,8
ΔI_B	0,0	0,1	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,8	39,0	39,8
ΔI_{TV-GE}	0,0	8,3	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	8,8	0,0	8,8
ΔI_C	18,5	-57,8	0,0	0,2	-1,6	0,0	0,0	-40,7	-0,1	-40,7
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	15,6	33,4	0,0	-0,2	2,0	0,0	0,0	50,8		
Malfunção	-38,1	39,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0		0,8	
Consumo adicional de combustível	-22,5	72,4	0,0	-0,3	2,0	0,0	0,0			51,61

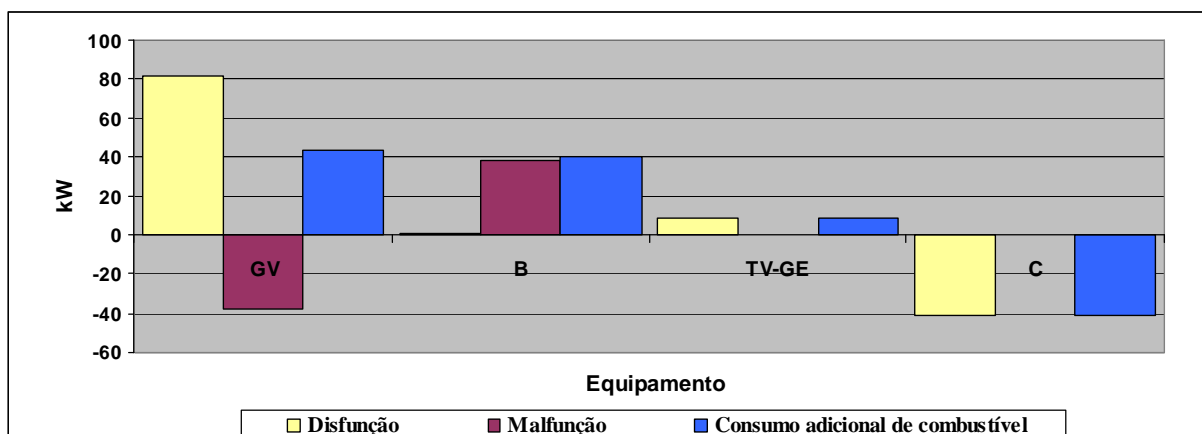


Figura 3.14: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

Na Figura 3.15 é apresentado o gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico. De forma similar ao resultado encontrado para o modelo E&S considerando o sistema térmico do exemplo com a anomalia 3, pode-se perceber que o resultado deste Diagnóstico também evidencia a limitação do modelo E&S para tratamento de equipamentos dissipativos (condensador) em função dos resultados apresentados para este equipamento.

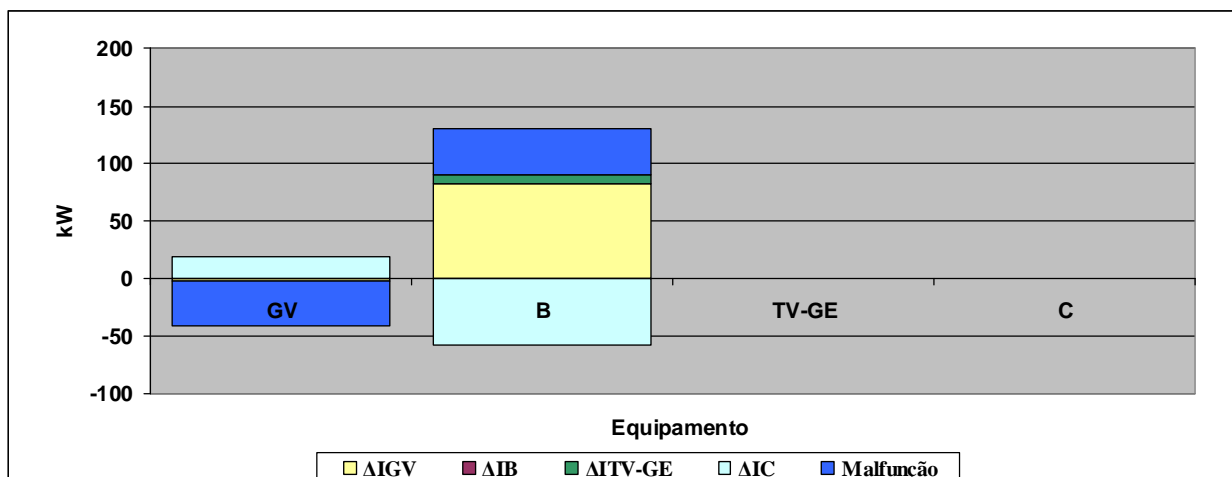


Figura 3.15: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

3.2.3.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

Na Tabela 3.36 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 3 utilizando o modelo H&S. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.16. É possível verificar que a redução da eficiência isentrópica em 10% na bomba de alimentação ocasiona uma malfunção de 14,2 kW neste equipamento.

Tabela 3.36: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	-14,0	26,0	0,0	-0,2	20,1	0,0	0,0	31,9	-7,6	24,3
ΔI_B	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1	0,0	0,0	6,2	14,2	20,3
ΔI_{TV-GE}	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0	4,9	0,0	4,9
ΔI_C	-1,0	1,8	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	2,1	-0,1	2,0
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	-15,0	27,9	0,0	-0,2	32,5	0,0	0,0	45,1		
Malfunção	-7,6	14,2	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0		6,5	
Consumo adicional de combustível	-22,6	42,0	0,0	-0,3	32,5	0,0	0,0			51,61

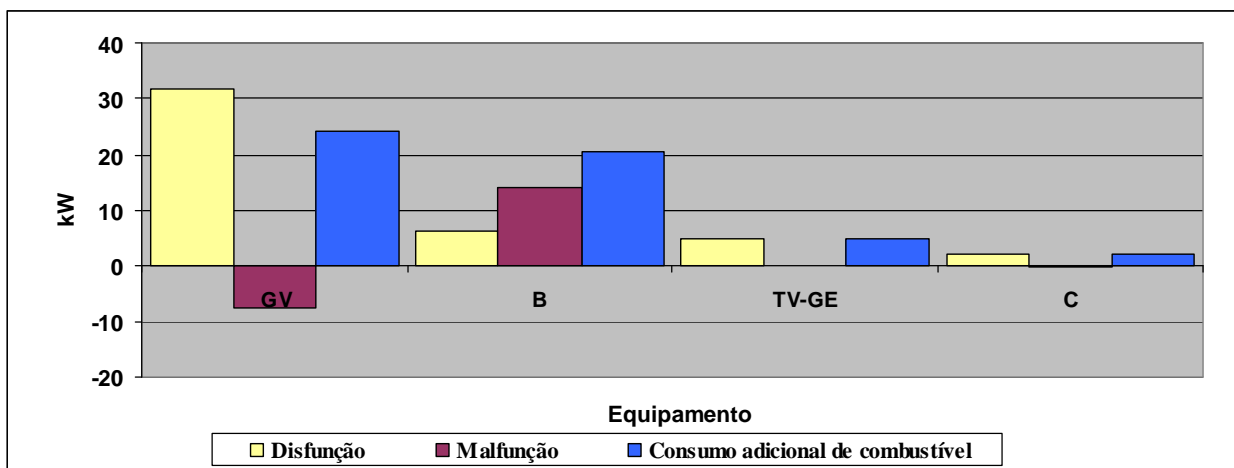


Figura 3.16: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

O gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico é apresentado na Figura 3.17. O resultado deste Diagnóstico apresenta uma diferença entre os resultados apresentados e discutidos até o momento em função da existência de disfunção causada no gerador de vapor tendo o próprio gerador de vapor como responsável por esta disfunção. A disfunção é o resultado de como os equipamentos se adaptam para manutenção das condições de produção requerida pelos outros equipamentos do sistema.

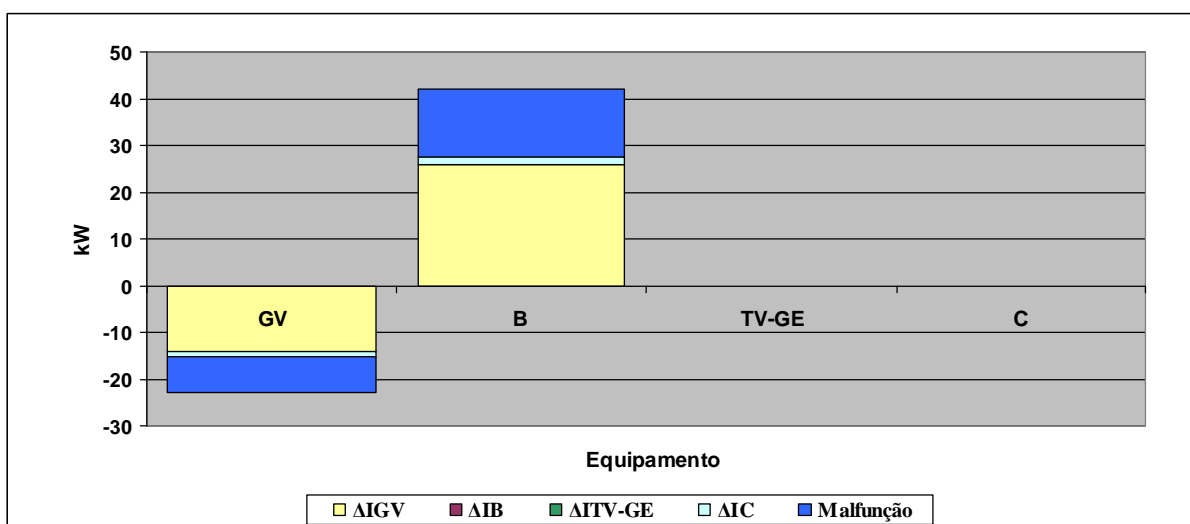


Figura 3.17: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

Da mesma forma que apresentado na análise comparativa entre os resultados dos modelos E, E&S e H&S obtidos considerando a anomalia 2, o valor total da soma do consumo adicional de combustível da turbina a vapor e do condensador é igual nos modelos E e H&S e diferente

somente no modelo E&S também para a anomalia 3 conforme base de dados apresentada na Tabela 3.37. Para o modelo E, a somatória entre as malfunções e disfunções da turbina a vapor e do condensador é de 7,0 kW, para o modelo E&S é de -32,0 kW e para o modelo H&S é de 7 kW.

Tabela 3.37: Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 3

Equipamento	Malfunção [kW]			Disfunção [kW]		
	E	E&S	H&S	E	E&S	H&S
GV	-20,0	-38,1	-7,6	44,3	81,9	31,9
B	19,9	39,0	14,2	0,4	0,8	6,2
TV-C-GE	-0,1	0,0	0,0	7,0	8,8	4,9
C	-	-0,1	-0,1	-	-40,7	2,1
TOTAL	-0,2	0,8	6,5	51,8	50,8	45,1

3.2.4 Diagnóstico Termoeconômico considerando aumento de 10% da pressão de vácuo do condensador (C) (Anomalia 4)

Nesta seção, os Diagnósticos Termoeconômicos para os três diferentes modelos (E, E&S e H&S) são realizados considerando aumento de 10% da pressão de vácuo do condensador (C).

Os dados da condição de referência são apresentados na Tabela 3.1. Os dados da condição de teste do sistema térmico do exemplo são calculados considerando a condição de anomalia no condensador (C) com aumento de 10% na sua pressão de vácuo, ou seja, aumento da pressão de vácuo de 0,07 para 0,16 bar. Os dados da condição de teste considerando esta anomalia são apresentados na Tabela 3.38.

Tabela 3.38: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 4)

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
Nº	DESCRIÇÃO			
0 (ref)	Ambiente	0	1,01	25,00
1	Água	21,23	0,16	55,72
2	Água	21,23	63,00	56,28
3	Vapor	21,23	60,00	500,00
4	Mistura (x=0,92)	21,23	0,16	55,72

Os dados da condição de teste dos fluxos físicos do ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a anomalia 4 são calculados utilizando a ferramenta *steamtable* instalado no Excel® 2003. Desta forma, as propriedades específicas de entalpia e entropia da água e do vapor, bem como temperaturas e título do vapor dos fluxos físicos são determinadas considerando a anomalia simulada.

Na Tabela 3.39 são apresentados os valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a condições dos fluxos físicos com a simulação da anomalia 4. Com esta simulação, a vazão de vapor do ciclo aumentou de 19,50 para 21,23 kg/s para que a mesma potência líquida final do gerador fosse atingida ($P_L=20.000$ kW).

Tabela 3.39: *Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 4)*

FLUXOS FÍSICOS	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	e [kJ/kg]	H [kW]	S [kW]	E [kW]
0 (ref)	104,84	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
1	233,23	0,78	6,11	2.725,47	2.595,77	129,70
2	240,91	0,78	12,60	2.888,42	2.620,89	267,52
3	3.422,31	6,88	1.375,44	70.422,96	41.255,11	29.197,85
4	2.418,88	7,42	210,25	49.122,17	44.659,01	4.463,16
Qc						74.563,98

Para o cálculo de h_4 é utilizada a Equação 3.25. Sendo que h_{4S} possui valor de 2240,45 kJ/kg e é calculado utilizando o suplemento *steamtable* considerando como referência para este cálculo o valor da pressão do fluxo físico n° 4 (0,16 bar) e a entropia específica do fluxo físico n° 3 (6,88 kJ/kg.K).

Para o cálculo de h_2 é utilizada a Equação 3.27. Sendo que h_{2S} possui valor de 239,60 kJ/kg e é calculado utilizando o suplemento *steamtable* considerando como referência para este cálculo o valor da pressão do fluxo físico n° 2 (63,00 bar) e a entropia específica do fluxo físico n° 1 (0,78 kJ/kg.K).

O valor consumo adicional de combustível encontrado como resultado dos Diagnósticos Termoeconômicos considerando a anomalia 4 para os modelos E, E&S e H&S são idênticos ao valor da diferença entre o valor total do combustível calculado para a condição de teste (com

anomalia) e a condição de referência do sistema térmico. Este resultado mostra valores encontrados dos Diagnósticos realizados são coerentes.

Os outros valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo apresentados na Tabela 3.39 são calculados com a utilização do steamtable. H, S e E representam respectivamente os valores da entalpia total, entropia total e exergia total destes fluxos físicos.

Além dos dados dos fluxos físicos para a condição de teste considerando a anomalia 4, são apresentados na Tabela 3.40 os dados de potência elétrica dos equipamentos do sistema térmico. A potência elétrica da bomba é calculada conforme Equação 3.26 e potência líquida do sistema térmico é mantida com o mesmo valor da condição de referência.

Tabela 3.40: *Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 4)*

Descrição	KW
P_L	20.000
P_C	75
P_B	170

Os Diagnósticos Termoeconômicos utilizando os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S) considerando a anomalia 4 são apresentados nos itens 3.2.4.1, 3.2.4.2 e 3.2.4.3 e os dados de cada etapa deste desenvolvimento são apresentados no apêndice A.

3.2.4.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 4)

Na Tabela 3.41 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 4 utilizando o modelo E. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.18. Em função do modelo E tratar a turbina e condensador como um único equipamento, não é possível verificar a contribuição do condensador individualmente no aumento do consumo de combustível do sistema. Além disso, da mesma forma que apresentado no item 3.2.3.1 durante análise dos resultados do Diagnóstico deste mesmo sistema térmico considerando a anomalia 3, a malfuncção negativa no gerador a vapor ocorre pela melhora no rendimento exergético deste equipamento,

oriunda do aumento da temperatura da água de alimentação na entrada da caldeira. Logo, é possível concluir que esta malfunção é uma malfunção induzida por outro equipamento (condensador (C)) e esta conclusão de que se trata de anomalia induzida só é possível pelo conhecimento prévio da anomalia do sistema e não pela característica do método de Diagnóstico Termoeconômico.

Tabela 3.41: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (anomalia 4)

	GV	B	TV-C-GE	JE&P	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	-3,5	3.566,2	-1,1	0,0	3.561,6	-1.255,6	2.306,0
ΔI_B	0,0	0,0	2,5	0,6	0,0	3,1	-1,5	1,5
$\Delta I_{TV-C-GE}$	0,0	-0,7	8,4	-1,3	0,0	6,5	2.250,0	2.256,4
$\Delta I_{JE\&P}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	-4,1	3.577,1	-1,8	0,0	3.571,2		
Malfunção	-1.255,6	-1,5	2.250,0	0,0	0,0		992,8	
Consumo adicional de combustível	-1.255,6	-5,7	5.827,1	-1,8	0,0			4.564,0

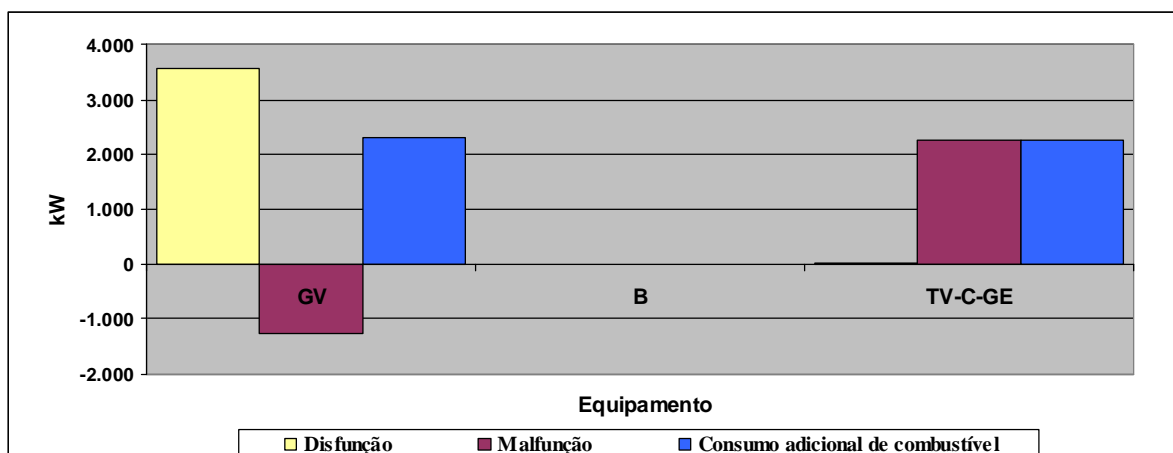


Figura 3.18: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

Na Figura 3.19 é apresentado o gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico. Percebe-se que existe uma disfunção provocada pela unidade produtiva composta pela turbina a vapor e condensador em função da necessidade do aumento da vazão de vapor do sistema para manter a potência líquida do sistema, ocasionando maior consumo de combustível no gerador a vapor.

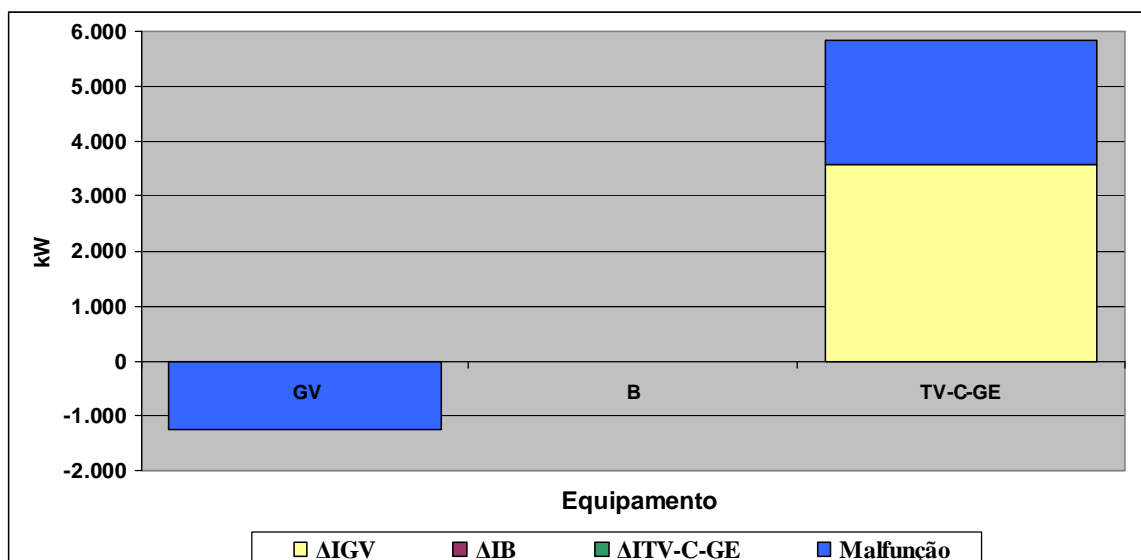


Figura 3.19: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

3.2.4.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

Na Tabela 3.42 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 4 utilizando o modelo E&S. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.20. Da mesma forma que nos demais resultados encontrados dos Diagnósticos Termoeconômicos do exemplo para o modelo E&S considerando as anomalias 2 e 3, este resultado constata a limitação deste modelo para tratamento de equipamentos dissipativos.

Tabela 3.42: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfuncão	Total
ΔI_{GV}	-406,6	-6,9	-689,7	7.673,4	4,5	0,0	0,0	6.574,7	-2.392,9	4.181,8
ΔI_B	-0,3	0,0	-0,5	5,2	1,0	0,0	0,0	5,5	-3,0	2,5
ΔI_{TV-GE}	-1,2	-0,6	-0,9	7,3	1,2	0,0	0,0	5,8	-367,3	-361,6
ΔI_C	1.185,5	4,4	447,9	-3.152,9	-2,7	0,0	0,0	-1.517,8	2.259,1	741,3
$\Delta I_{JE&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	777,3	-3,1	-243,2	4.533,0	4,0	0,0	0,0	5.068,0		
Malfuncão	-2.392,9	-3,0	-367,3	2.259,1	0,0	0,0	0,0		-504,1	
Consumo adicional de combustível	-1.615,6	-6,1	-610,5	6.792,2	4,0	0,0	0,0			4.564,0

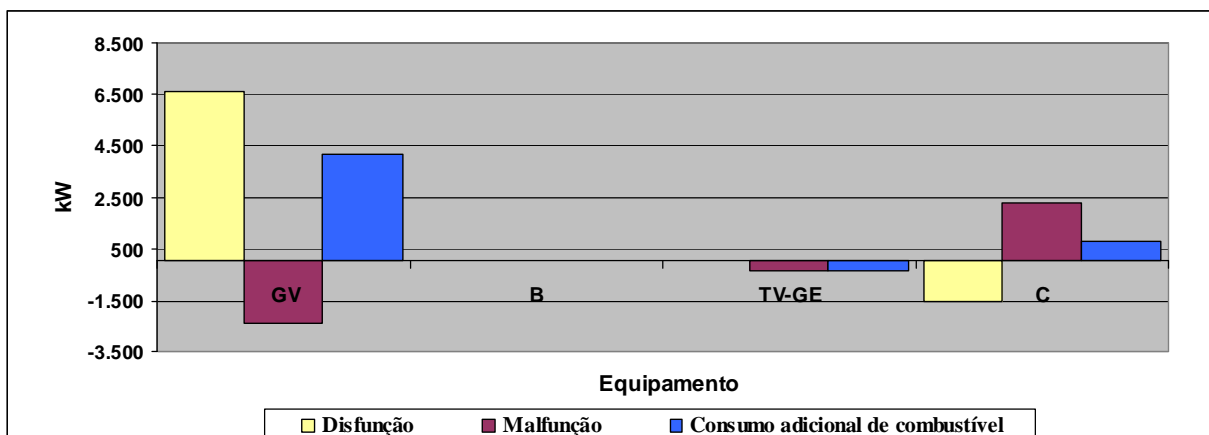


Figura 3.20: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

Na Figura 3.21 é apresentado o gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico.

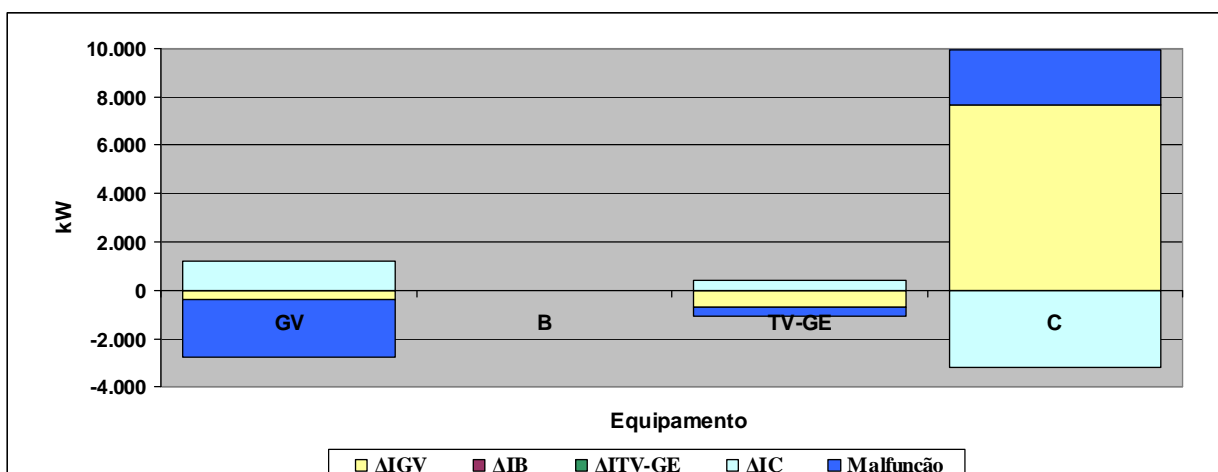


Figura 3.21: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

3.2.4.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

Na Tabela 3.43 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 4 utilizando o modelo H&S. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.22. Para este resultado como era esperado em função da anomalia simulada, fica nítida a contribuição do condensador no consumo adicional de combustível do sistema, diferentemente dos resultados encontrados para os modelos E e E&S considerando esta mesma anomalia.

Tabela 3.43: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	-991,1	-2,5	-373,6	4.156,8	3,5	0,0	0,0	2.793,2	-487,2	2.306,0
ΔI_B	-0,7	0,0	-0,3	2,9	0,8	0,0	0,0	2,8	-1,2	1,5
ΔI_{TV-GE}	-1,3	0,0	-0,5	4,2	1,0	0,0	0,0	3,3	-183,7	-180,4
ΔI_C	-139,1	-0,4	-52,4	369,1	0,5	0,0	0,0	177,7	2.259,1	2.436,8
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	-1.132,2	-2,9	-426,8	4.533,0	5,8	0,0	0,0	2.976,9		
Malfunção	-487,2	-1,2	-183,7	2.259,1	0,0	0,0	0,0		1.587,1	
Consumo adicional de combustível	-1.619,4	-4,1	-610,5	6.792,2	5,8	0,0	0,0			4.564,0

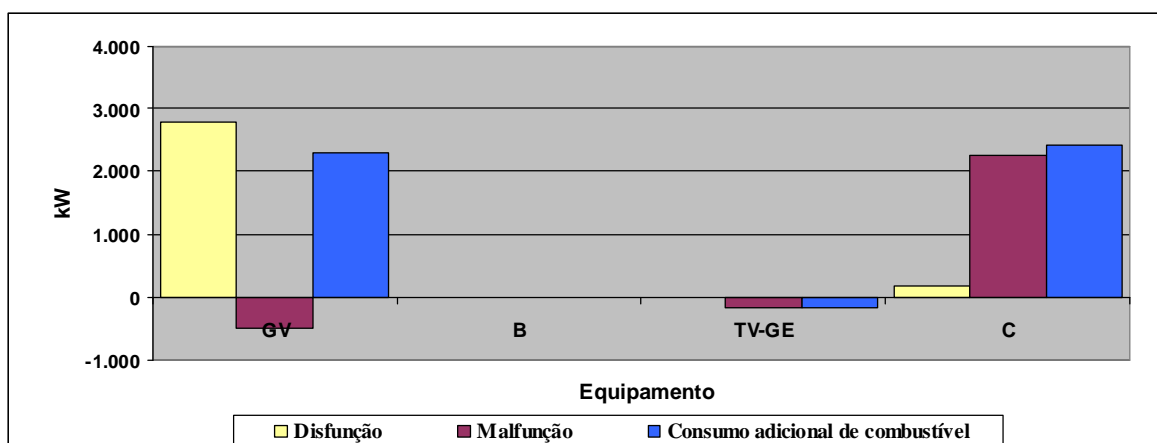


Figura 3.22: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

O gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico é apresentado na Figura 3.23.

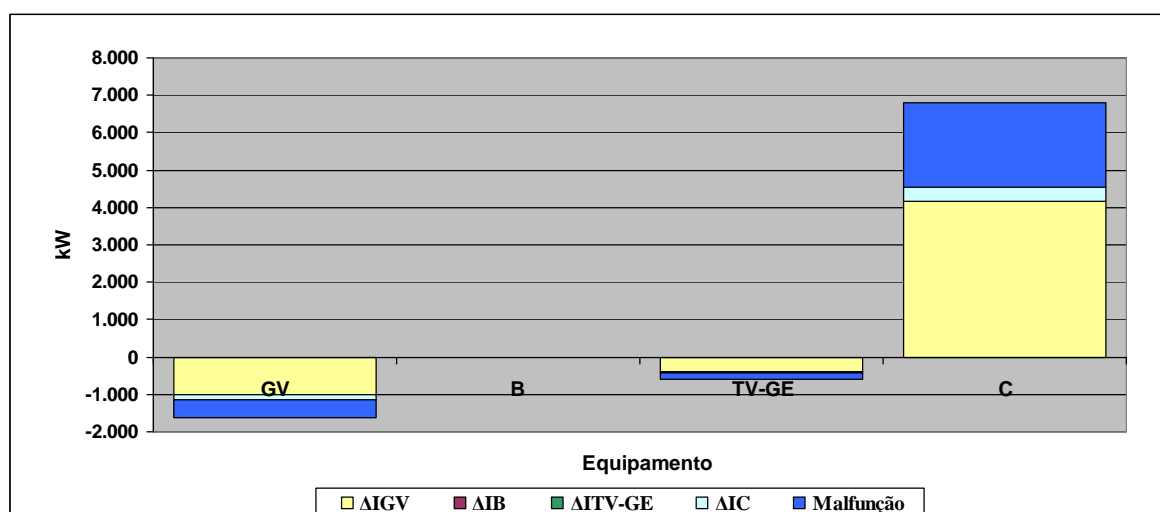


Figura 3.23: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

Da mesma forma que apresentado na análise comparativa entre os resultados dos modelos E, E&S e H&S obtidos considerando as anomalias 2 e 3, o valor total da soma do consumo adicional de combustível da turbina a vapor e do condensador é igual nos modelos E e H&S e diferente somente no modelo E&S também para a anomalia 4 conforme base de dados apresentada na Tabela 3.44. Para o modelo E, a somatória entre as malfunções e disfunções da turbina a vapor e do condensador é de 2.256,4 kW, para o modelo E&S é de 379,7 kW e para o modelo H&S é de 2.256,4 kW.

Tabela 3.44: *Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 4*

Equipamento	Malfunção [kW]			Disfunção [kW]		
	E	E&S	H&S	E	E&S	H&S
GV	-1255,6	-2392,9	-487,2	3561,6	6574,7	2793,2
B	-1,5	-3,0	-1,2	3,1	5,5	2,8
TV-C-GE	2250,0	-367,3	-183,7	6,5	5,8	3,3
C	-	2259,1	2259,1	-	-1517,8	177,7
TOTAL	992,8	-504,1	1587,1	3571,2	5068,0	2976,9

3.2.5 Diagnóstico Termoeconômico considerando as anomalias 1, 2, 3 e 4 juntas (Anomalia 5)

Nesta seção, os Diagnósticos Termoeconômicos para os três diferentes modelos (E, E&S e H&S) são realizados considerando uma redução de 10% da eficiência térmica do gerador de vapor (GV), redução de 10% da eficiência isentrópica da turbina (TV), redução de 10% da eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B) e aumento de 10% da pressão de vácuo do condensador (C), ou seja, todas as anomalias 1, 2, 3 e 4 juntas.

Os dados da condição de referência são apresentados na Tabela 3.1. Os dados da condição de teste do sistema térmico do exemplo são calculados considerando a anomalia 5 e os dados desta condição de teste são apresentados na Tabela 3.45.

Tabela 3.45: Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 5)

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
Nº	DESCRIÇÃO			
0 (ref)	Ambiente	0	1,01	25,00
1	Água	24,09	0,16	55,72
2	Água	24,09	63,00	56,28
3	Vapor	24,09	60,00	500,00
4	Mistura (x=0,92)	24,09	0,16	55,72

Os dados da condição de teste dos fluxos físicos do ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a anomalia 5 são calculados utilizando a ferramenta *steamtable* instalado no Excel® 2003. Desta forma, as propriedades específicas de entalpia e entropia da água e do vapor, bem como temperaturas e título do vapor dos fluxos físicos são determinadas considerando a anomalia simulada.

Na Tabela 3.46 são apresentados os valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo considerando a condições dos fluxos físicos com a simulação da anomalia 5. Com esta simulação, a vazão de vapor do ciclo aumentou de 19,50 para 24,09 kg/s para que a mesma potência líquida final do gerador fosse atingida ($P_L=20.000$ kW).

Tabela 3.46: Valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 5)

FLUXOS FÍSICOS	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]	e [kJ/kg]	H [kW]	S [kW]	E [kW]
0 (ref)	104,84	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
1	233,23	0,78	6,11	3.092,83	2.945,65	147,18
2	240,91	0,78	12,60	3.277,74	2.974,16	303,58
3	3.422,31	6,88	1.375,44	79.915,08	46.781,74	33.133,35
4	2.537,06	7,78	221,29	58.590,23	53.259,57	5.330,65
Qc						95.115,88

Para o cálculo de h_4 é utilizada a Equação 3.25. Sendo que h_{4s} possui valor de 2240,45 kJ/kg e é calculado utilizando o suplemento *steamtable* considerando como referência para este cálculo o valor da pressão do fluxo físico nº 4 (0,16 bar) e a entropia específica do fluxo físico nº 3 (6,88 kJ/kg.K).

Para o cálculo de h_2 é utilizada a Equação 3.27. Sendo que h_{2s} possui valor de 239,60 kJ/kg e é calculado utilizando o suplemento steamtable considerando como referência para este cálculo o valor da pressão do fluxo físico nº 2 (63,00 bar) e a entropia específica do fluxo físico nº 1 (0,78 kJ/kg.K).

O valor consumo adicional de combustível encontrado como resultado dos Diagnósticos Termoeconômicos considerando a anomalia 5 para os modelos E, E&S e H&S são idênticos ao valor da diferença entre o valor total do combustível calculado para a condição de teste (com anomalia) e a condição de referência do sistema térmico. Este resultado mostra valores encontrados dos Diagnósticos realizados são coerentes.

Os outros valores de entalpia, entropia e exergia dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência do exemplo apresentados na Tabela 3.46 são calculados com a utilização do steamtable. H, S e E representam respectivamente os valores da entalpia total, entropia total e exergia total destes fluxos físicos.

Além dos dados dos fluxos físicos para a condição de teste considerando a anomalia 5, são apresentados na Tabela 3.47 os dados de potência elétrica dos equipamentos do sistema térmico. A potência elétrica da bomba é calculada conforme Equação 3.26 e potência líquida do sistema térmico é mantida com o mesmo valor da condição de referência.

Tabela 3.47: *Descrição das potências elétricas das unidades produtivas do Ciclo Rankine de potência para a condição de teste (Anomalia 5)*

Descrição	KW
P_L	20.000
P_C	75
P_B	170

Os Diagnósticos Termoeconômicos utilizando os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e H&S) considerando a anomalia 5 são apresentados nos itens 3.2.5.1, 3.2.5.2 e 3.2.5.3 e os dados de cada etapa deste desenvolvimento são apresentados no apêndice A.

3.2.5.1 Utilizando o modelo E (Anomalia 5)

Os dados do consumo adicional de combustível obtidos como resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 5 utilizando o modelo E são apresentados na Tabela 3.48. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.24.

Tabela 3.48: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (anomalia 5)

	GV	B	TV-C-GE	JE&P	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	0,0	-4,7	11.699,1	-12,3	0,0	11.682,1	7.276,3	18.958,5
ΔI_B	0,0	0,0	6,8	0,6	0,0	7,4	-1,5	5,8
$\Delta I_{TV-C-GE}$	0,0	-1,0	31,7	-7,0	0,0	23,7	6.127,8	6.151,6
$\Delta I_{JE\&P}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	0,0	-5,7	11.737,6	-18,7	0,0	11.713,2		
Malfunção	7.276,3	-1,5	6.127,8	0,0	0,0		13.402,7	
Consumo adicional de combustível	7.276,3	-7,2	17.865,5	-18,7	0,0			25.115,9

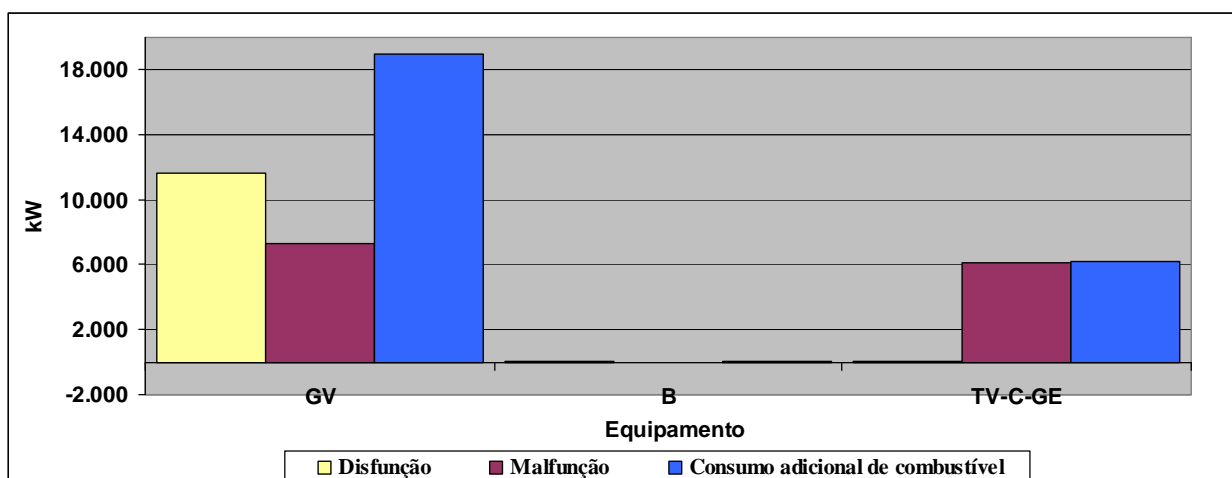


Figura 3.24: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

Na Figura 3.25 é apresentado o gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico.

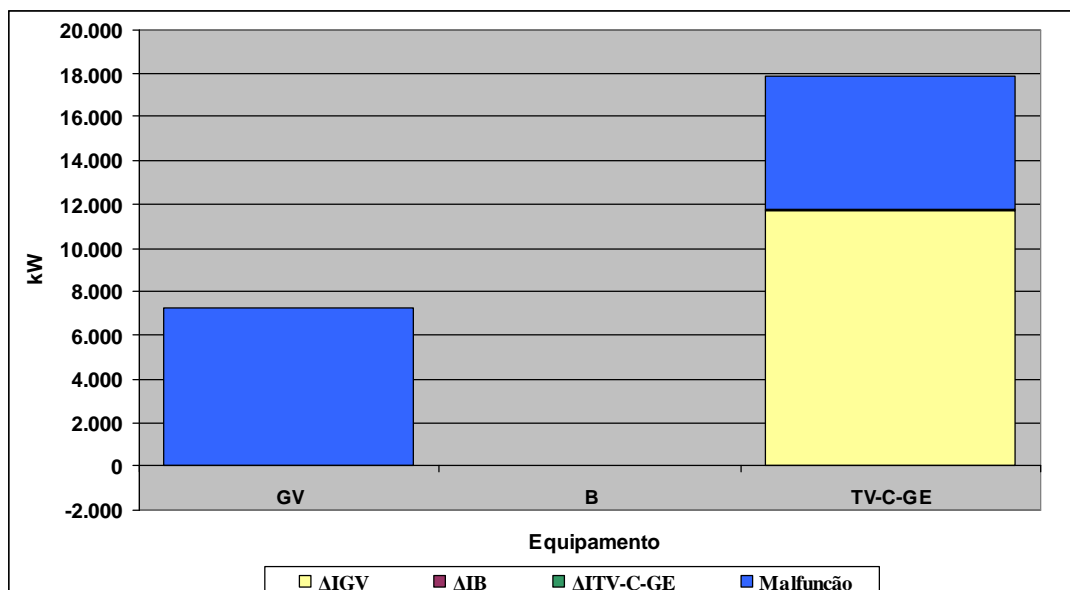


Figura 3.25: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

Comparando o resultado deste Diagnóstico com os resultados encontrados individualmente de consumo adicional de combustível para as anomalias 1, 2, 3 e 4, constata-se que o consumo adicional de combustível total considerando a anomalia 5 é diferente das somas individuais do consumo adicional de combustível para cada anomalia conforme apresentado na Tabela 3.49 em função das interações entre os equipamentos do sistema térmico. Este mesmo resultado é encontrado para os modelos E&S e H&S.

Tabela 3.49: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

Anomalia	Consumo adicional de combustível [kW]		
	E	E&S	H&S
Anomalia 1	8687,8	8687,8	8687,8
Anomalia 2	9427,1	9427,1	9427,1
Anomalia 3	51,6	51,6	51,6
Anomalia 4	4564,0	4564,0	4564,0
Sub Total	22730,5	22730,5	22730,5
Anomalia 5	25115,9	25115,9	25115,9

3.2.5.2 Utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

Na Tabela 3.50 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 5 utilizando o modelo E&S. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.26.

Tabela 3.50: *Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)*

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	-451,2	-8,6	11.891,5	8.460,0	6,9	0,0	0,0	19.898,5	6.139,1	26.037,6
ΔI_B	-0,3	0,0	7,3	5,2	1,0	0,0	0,0	13,1	-3,0	10,2
ΔI_{TV-GE}	-1,9	-1,1	22,9	4,0	2,1	0,0	0,0	26,0	5.701,5	5.727,5
ΔI_C	1.186,2	4,9	-6.962,2	-3.131,8	-3,8	0,0	0,0	-8.906,7	2.247,3	-6.659,4
$\Delta I_{JE&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	732,7	-4,8	4.959,5	5.337,3	6,2	0,0	0,0	11.030,9		
Malfunção	6.139,1	-3,0	5.701,5	2.247,3	0,0	0,0	0,0		14.085,0	
Consumo adicional de combustível	6.871,8	-7,7	10.661,0	7.584,6	6,2	0,0	0,0			25.115,9

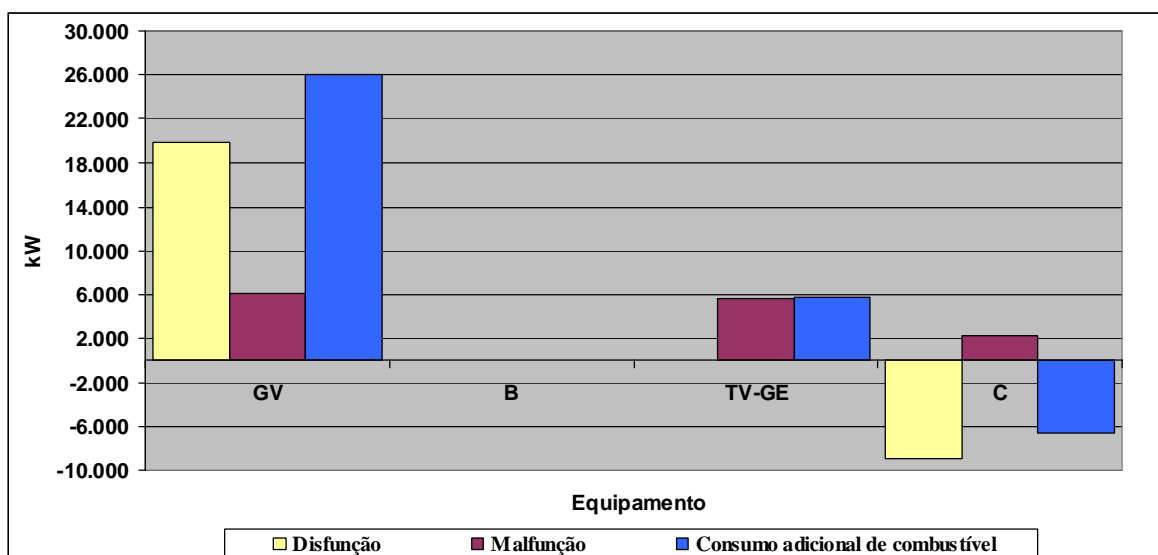


Figura 3.26: *Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)*

Na Figura 3.27 é apresentado o gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico.

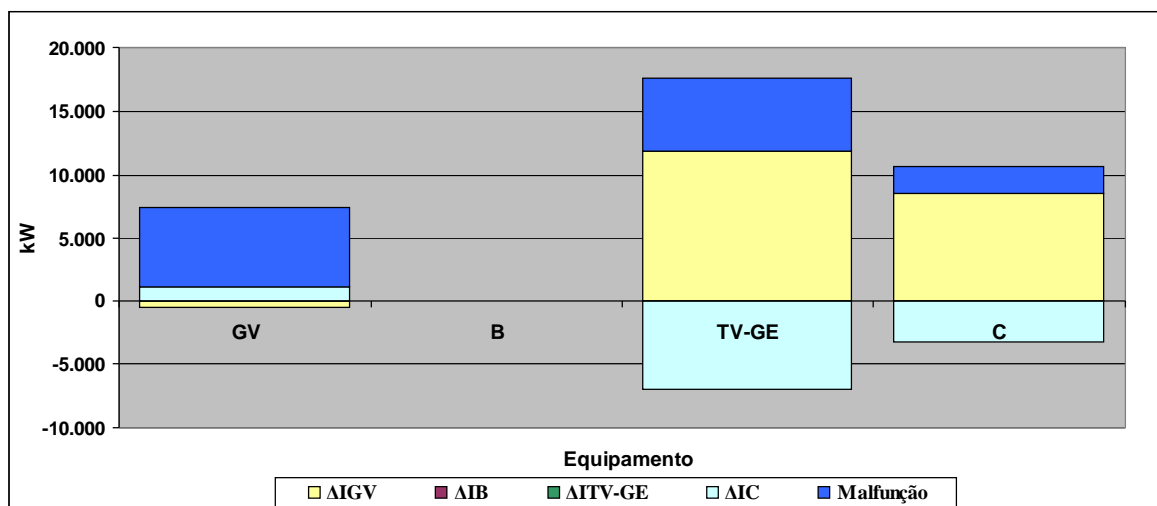


Figura 3.27: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

3.2.5.3 Utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

Na Tabela 3.51 são apresentados os valores obtidos do consumo adicional de combustível através do resultado do Diagnóstico Termoeconômico para a condição de anomalia 5 utilizando o modelo H&S. Estes mesmos dados são apresentados de forma gráfica na Figura 3.28.

Tabela 3.51: Consumo adicional de combustível (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

	GV	B	TV-GE	C	JE&BE	B _s	B _p	DF	Malfunção	Total
ΔI_{GV}	-1.193,1	-3,0	6.981,3	4.966,7	5,9	0,0	0,0	10.757,8	8.200,6	18.958,5
ΔI_B	-0,7	0,0	4,1	2,9	0,8	0,0	0,0	7,1	-1,2	5,8
ΔI_{TV-GE}	-2,1	0,0	12,3	2,1	1,6	0,0	0,0	14,0	2.850,8	2.864,7
ΔI_C	-138,9	-0,4	812,6	365,5	0,6	0,0	0,0	1.039,5	2.247,3	3.286,8
$\Delta I_{JE\&BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BS}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{BP}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	-1.334,7	-3,4	7.810,3	5.337,3	8,9	0,0	0,0	11.818,4		
Malfunção	8.200,6	-1,2	2.850,8	2.247,3	0,0	0,0	0,0		13.297,5	
Consumo adicional de combustível	6.865,9	-4,6	10.661,0	7.584,6	8,9	0,0	0,0			25.115,9

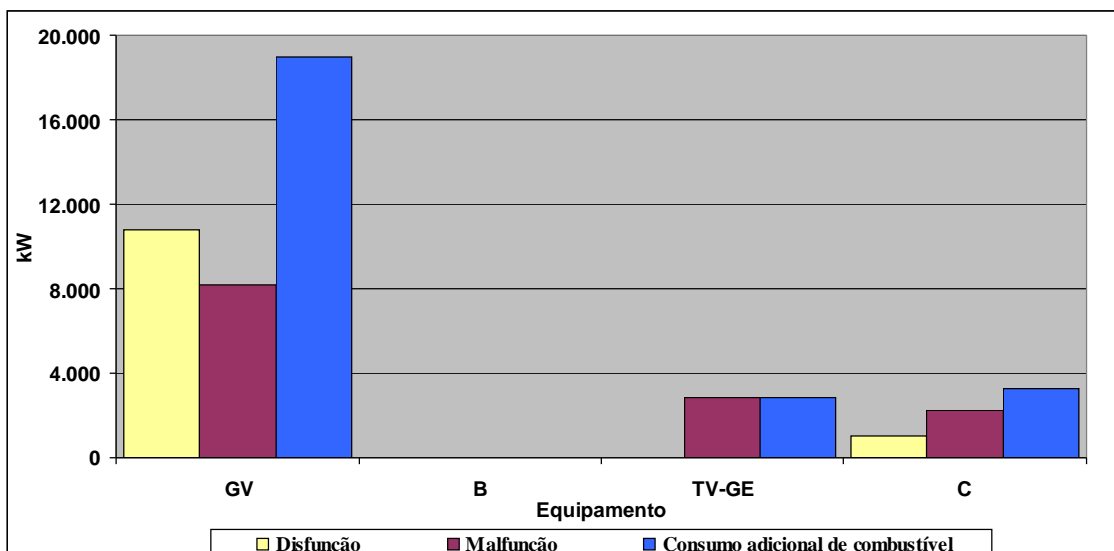


Figura 3.28: Aumento do consumo do combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

O gráfico da análise do consumo adicional de combustível deste Diagnóstico Termoeconômico é apresentado na Figura 3.29.

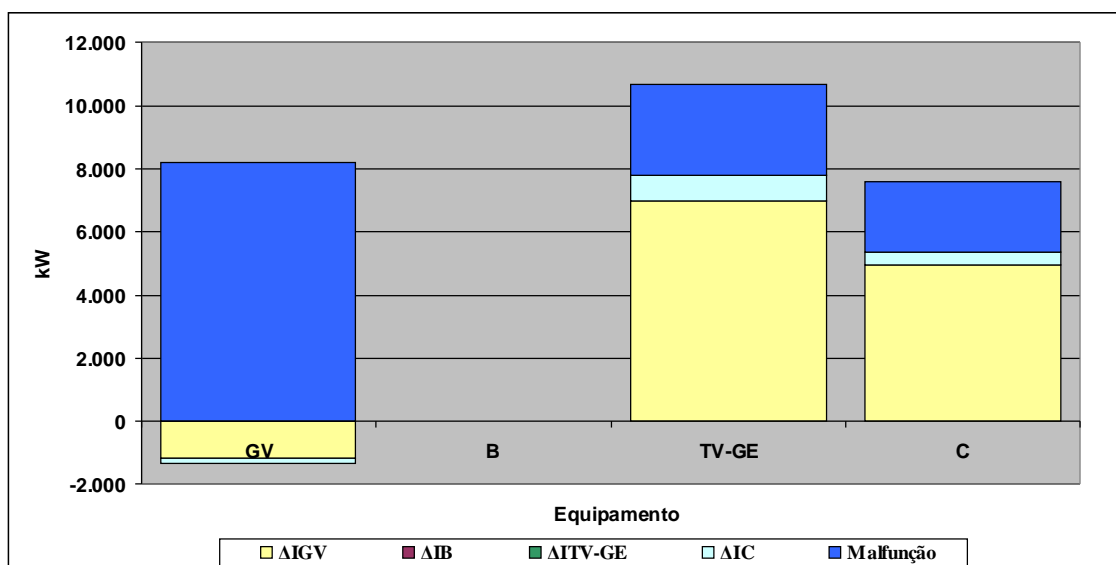


Figura 3.29: Análise do consumo adicional de combustível para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

Da mesma forma que apresentado na análise comparativa entre os resultados dos modelos E, E&S e H&S obtidos considerando as anomalias 2, 3 e 4, o valor total da soma do consumo adicional de combustível da turbina a vapor e do condensador é igual nos modelos E e H&S e diferente somente no modelo E&S também para a anomalia 4 conforme base de dados apresentada na Tabela 3.52. Para o modelo E, a somatória entre as malfunções e disfunções da

turbina a vapor e do condensador é de 6.151,6 kW, para o modelo E&S é de -931,9 kW e para o modelo H&S é de 6.151,6 kW.

Tabela 3.52: *Comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos dos modelos E, E&S e H&S considerando a anomalia 5*

Equipamento	Malfuncão [kW]			Disfunção [kW]		
	E	E&S	H&S	E	E&S	H&S
GV	7276,3	6139,1	8200,6	11682,1	19898,5	10757,8
B	-1,5	-3,0	-1,2	7,4	13,1	7,1
TV-C-GE	6127,8	5701,5	2850,8	23,7	26,0	14,0
C	-	2247,3	2247,3	-	-8906,7	1039,5
TOTAL	13402,7	14085,0	13297,5	11713,2	11030,9	11818,4

CAPÍTULO 4

DIAGNÓSTICO TERMoeCONÔMICO DA PLANTA DO ESTUDO DE CASO

Neste capítulo encontra-se o estudo de caso e a aplicação da metodologia de Diagnóstico Termoeconômico na Central de Cogeração real e complexa do Setor Siderúrgico a ser analisada utilizando Os modelos E, E&S e H&S. Os dados de referência foram obtidos da literatura (Belisario, 2012; Donatelli, 1993) para a condição de referência e coletados diretamente na planta para a condição de teste. Posteriormente, os dados foram processados no *software thermoflex*® com o objetivo de realização de balanço de massa e energia e obtenção de dados não disponíveis pela literatura ou pela instrumentação da planta em alguns pontos específicos dos equipamentos (pressão, temperatura e vazão mássica). As propriedades específicas entalpia e entropia da água e do vapor foram determinadas pelo suplemento *steamtable* instalado no Excel® 2003. Por último são apresentados os resultados da realização do Diagnóstico Termoeconômico.

Para se realizar uma simulação no *thermoflex*® algumas etapas devem ser seguidas. Será apresentado um descritivo das etapas básicas necessárias à simulação no *thermoflex*®, complementadas com figuras e comentários para auxiliar no entendimento da simulação. Adicionalmente, se encontram as simulações que foram realizadas neste trabalho. A Figura 4.1 mostra o procedimento necessário à simulação.

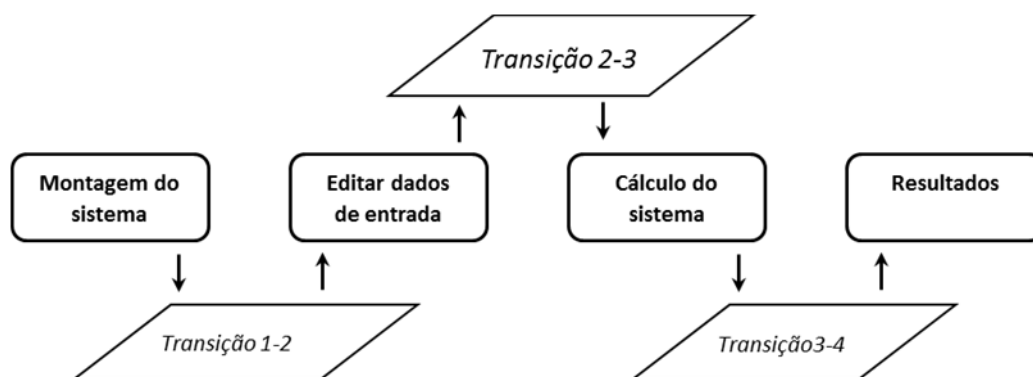


Figura 4.1: Etapas básicas para se construir um modelo de simulação no *thermoflex*®

Etapa 1: Montagem do sistema. Os equipamentos do sistema são escolhidos na biblioteca, alocados no supervisor do *software*, e conectados por linhas que representam os fluxos disponíveis para trabalho.

Transição 1-2: Checagem do sistema. Confere se todos os equipamentos estão conectados.

Etapa 2: Editar dados de entrada. Os dados de entrada dos componentes são inseridos no sistema através de um duplo clique no equipamento que se deseja editar. Cada equipamento possui sua própria caracterização quanto ao tipo e quantidade de entradas necessárias à simulação.

Transição 2-3: Checagem das entradas. Confere se não há nenhuma incoerência nos dados inseridos dos equipamentos. Se não houver nenhum tipo de inconsistência, o programa inicia as iterações. Do contrário, uma tela de avisos aponta as inconsistências e sugere correções.

Etapa 3: Cálculo do sistema: O *thermoflex*® inicia a simulação através do cálculo da modelagem do sistema. Uma tela é exibida no supervisor apresentando o progresso das iterações até que a convergência seja atingida.

Transição 3-4: Mensagens de aviso e erros: Esta transição alerta o usuário para possíveis erros de cálculo da modelagem e/ou avisos quando existir além de apontar ações de correção.

Etapa 4: Resultados. Nesta última etapa os resultados são exibidos na forma de texto em tabelas e gráficos dos equipamentos além de balanços de massa e energia e demais resultados obtidos com a modelagem.

Na Figura 4.2 é apresentada a tela de simulação realizada para a planta do estudo de caso no ambiente do *thermoflex*®.

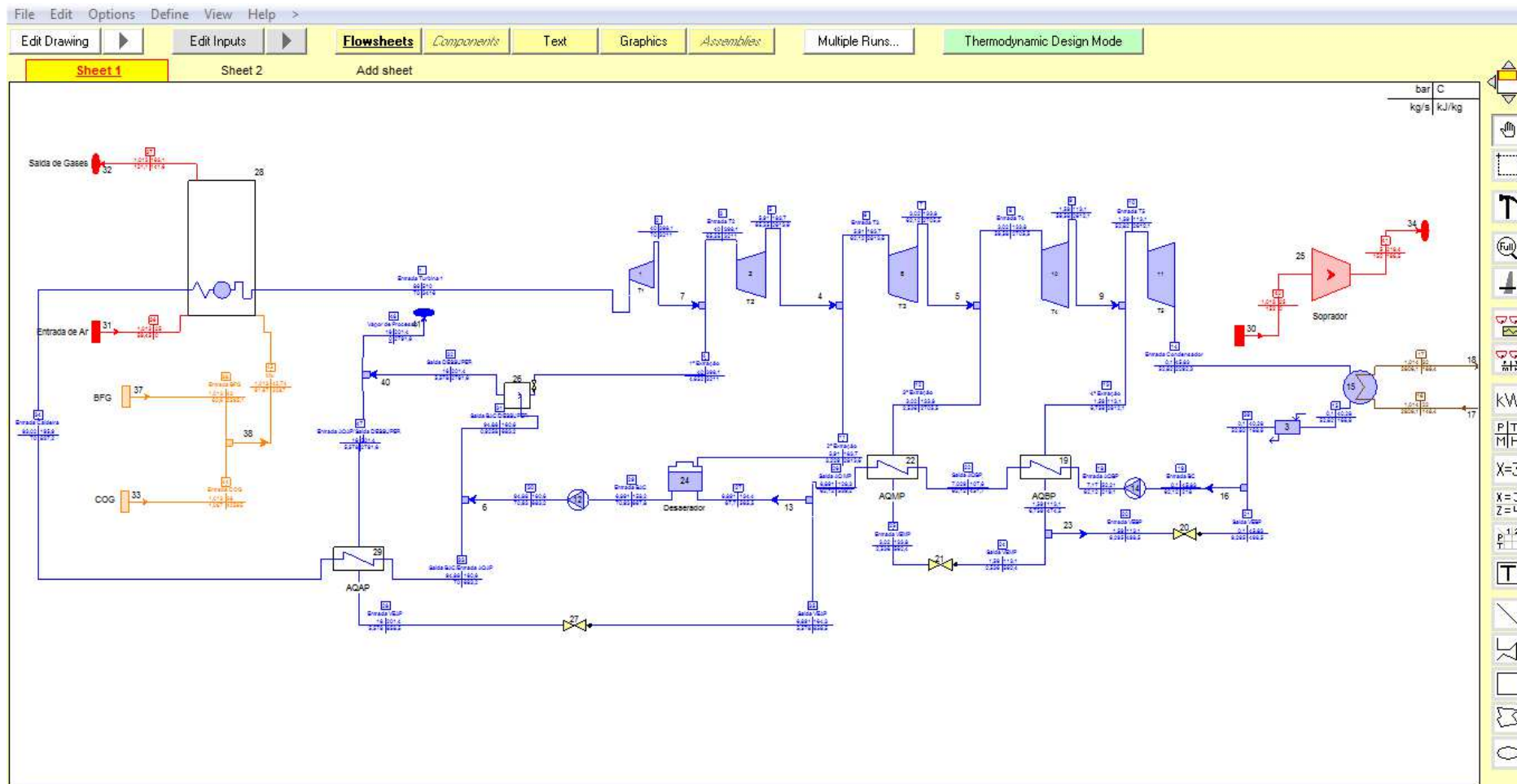


Figura 4.2: Simulação no thermoflex® da central de cogeração siderúrgica

A planta de Cogeração que é o objetivo deste estudo, utiliza os gases gerados nos processos Siderúrgicos (BFG, COG e LDG) como combustíveis nas Centrais Termelétricas (ciclo à vapor) para posterior geração de energia elétrica, mecânica (ar comprimido) e térmica (vapor). Os principais gases utilizados nos processos de cogeração oriundos dos processos siderúrgicos são o BFG “*Blast Furnace Gas*”, o COG “*Coke Oven Gas*” e o LDG “*Linz Donawitz Gas*” e suas características são apresentadas na Tabela 4.1 as características desses gases.

Tabela 4.1: *Características dos gases siderúrgicos*
Fonte: Belisario (2012).

CARACTERÍSTICA	ELEMENTO			UNIDADE
	BFG	COG	LDG	
Poder Calorífico Inferior	803	4362	2160	kcal/Nm ³
Densidade Relativa	1,06	0,352	1,03	-
Massa Específica	1,37	0,454	1,33	kg/Nm ³
Relação Ar/Gás	0,646	4,658	3,83	-
Limites de Inflamabilidade	35 - 73,5	7,2 - 21,7	12,5 - 75	m ³ de ar/ m ³ de gás

O gás BFG é um dos produtos do processo de redução do ferro para a produção do “ferro gusa” nos Altos Fornos. O ar soprado proveniente dos sopradores do sistema de Cogeração é enviado para o Alto Forno onde é previamente aquecido pelos regeneradores de ar. Os regeneradores utilizam grande parte do combustível gerado no próprio Alto Forno para realização deste aquecimento, aumentando a eficiência do processo de redução e diminuindo o consumo necessário de combustível (coque) no interior do Alto Forno. Após o processo de redução ocorrido no interior do Alto Forno, os gases de exaustão (BFG) são direcionados para o topo e conduzidos pelos dutos coletores de saída para os sistemas de limpeza primária e secundária. O sistema de limpeza primária filtra parcialmente a poeira através do coletor de pó e a secundária consiste na passagem do gás por despoeiradores a úmido e pelo separador de neblina. Após esta etapa, o gás BFG é armazenado com auxílio de equipamentos conhecido como “gasômetros” para depois ser enviado aos consumidores finais (todos internos à usina). A Tabela 4.2 mostra a composição química “aproximada” do BFG.

Tabela 4.2: *Composição química do BFG*
Fonte: Belisario (2012).

ELEMENTO	V(%)
N ₂	48,00
H ₂	4,50
CO	24,00
CO ₂	23,50

O COG é produto da coqueificação do carvão mineral na Coqueria. O processo de coqueificação consiste no aquecimento do carvão em altas temperaturas na ausência de ar. Como resultado deste processo ocorre a quebra de moléculas orgânicas do carvão originando o produto final, o coque. O COG é gás resultante do processo de combustão ocorrido no interior nas baterias da Coqueria para a produção do Coque. A qualidade do coque bem como a do COG são dependentes da origem do carvão e quantidade de impurezas em sua composição e, portanto possuem características e composições dependentes e que oscilam de acordo com as matérias primas. A composição química “aproximada” do COG é mostrada pela Tabela 4.3.

Tabela 4.3: *Composição química do COG*
Fonte: Belisario (2012).

ELEMENTO	V(%)
N ₂	2,77
H ₂	61,82
O ₂	0,26
CO	6,63
CO ₂	1,56
CH ₄	23,14
C ₂ H ₂	0,1
C ₂ H ₄	1,78
C ₂ H ₆	0,48
C ₃ H ₈	0,47
C ₄ H ₁₀	0,03
C ₆ H ₆	0,8
C ₇ H ₈	0,04
H ₂ S	0,12

O gás LDG é produto do processo de redução direta do ferro-gusa em aço nos convertedores da Aciaria. No processo, há a oxidação de elementos contidos no ferro-gusa como carbono e outros minerais, gerando, dessa forma, uma elevação na temperatura do metal e eliminação de elementos indesejáveis no aço. Os produtos formados no convertedor são o aço, o LDG e a escória. Os principais determinantes da recuperação do gás LDG são os teores de CO e O₂ após o início do sopro de oxigênio nos convertedores. A composição química “aproximada” do LDG é mostrada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: *Composição química do LDG*
Fonte: Belisario (2012).

ELEMENTO	V (%)
CO	70,27
N ₂	14,54
CO ₂	13,77
H ₂	1,3
O ₂	0,12

Os gases siderúrgicos que são residuais dos processos de produção do aço são armazenados em reservatórios especiais chamados gasômetros, com o objetivo de maximizar a recuperação dos mesmos e estabilizar a pressão evitando oscilações bruscas de pressão e vazão nos processos e realizar a distribuição destes para os consumidores internos sem intercorrências de grandes variabilidades além de serem fundamentais para maximização do percentual de aproveitamento desses gases.

Importante destacar que a utilização dos gases oriundos de processos internos na siderúrgica proporciona a diminuição do consumo de outras fontes de combustíveis, como o gás natural (GN) e que a usina Siderúrgica do estudo é uma das poucas usinas do mundo que possuem aproveitamentos de todos os gases siderúrgicos (COG, BFG e LDG) gerados nos processos, sendo um fator positivo de competitividade e de valor ambiental inquestionável.

4.1 Estrutura Física

A Figura 4.3 representa a estrutura física do sistema de vapor do sistema de cogeração avaliado. O ciclo Termodinâmico é o Rankine regenerativo, com três aquecedores de alimentação fechados de alta, média e baixa pressão (AQ AP, AQ MP e AQ BP) e um aquecedor de alimentação aberto (desaerador), que são responsáveis pelo pré-aquecimento da água antes da entrada na caldeira, o que implica no aumento de eficiência do ciclo. O desaerador também é responsável pela retirada de gases não condensáveis presentes no fluido de trabalho, que possam vir a prejudicar a operação da central de cogeração.

O processo é iniciado com a entrega de vapor da caldeira para a turbina de condensação e extração (com 4 extrações) e possui 12 estágios. A 1ª extração envia vapor ao dessuperaquecedor, responsável pelo controle das condições de entrega de vapor de processo (temperatura e pressão), sendo parte do vapor desviado para alimentar o lado quente do aquecedor de alta pressão. A 2ª, 3ª e 4ª extrações alimentam respectivamente o desaerador, e aquecedores de média e baixa pressão.

O gás exausto envia o condensado que sofreu a última expansão na turbina para o condensador. Após ser arrefecido por água do mar, uma bomba de condensado (BC) extrai o fluxo do condensador para aquecimento nos aquecedores regenerativos de baixa e média pressão. Após o processo de desaeração, a água é succionada pela bomba de alimentação de caldeira (BAC). Parte do fluxo da BAC é desviado para o dessuperaquecedor e irá controlar as condições do vapor de processo e a outra parte segue para o aquecedor de alta pressão, onde ocorre a última troca térmica antes de entrar na caldeira. Na caldeira, ar e combustíveis são injetados nos queimadores onde os combustíveis liberam energia e gases de exaustão que trocam calor com a água de alimentação, produzindo vapor superaquecido.

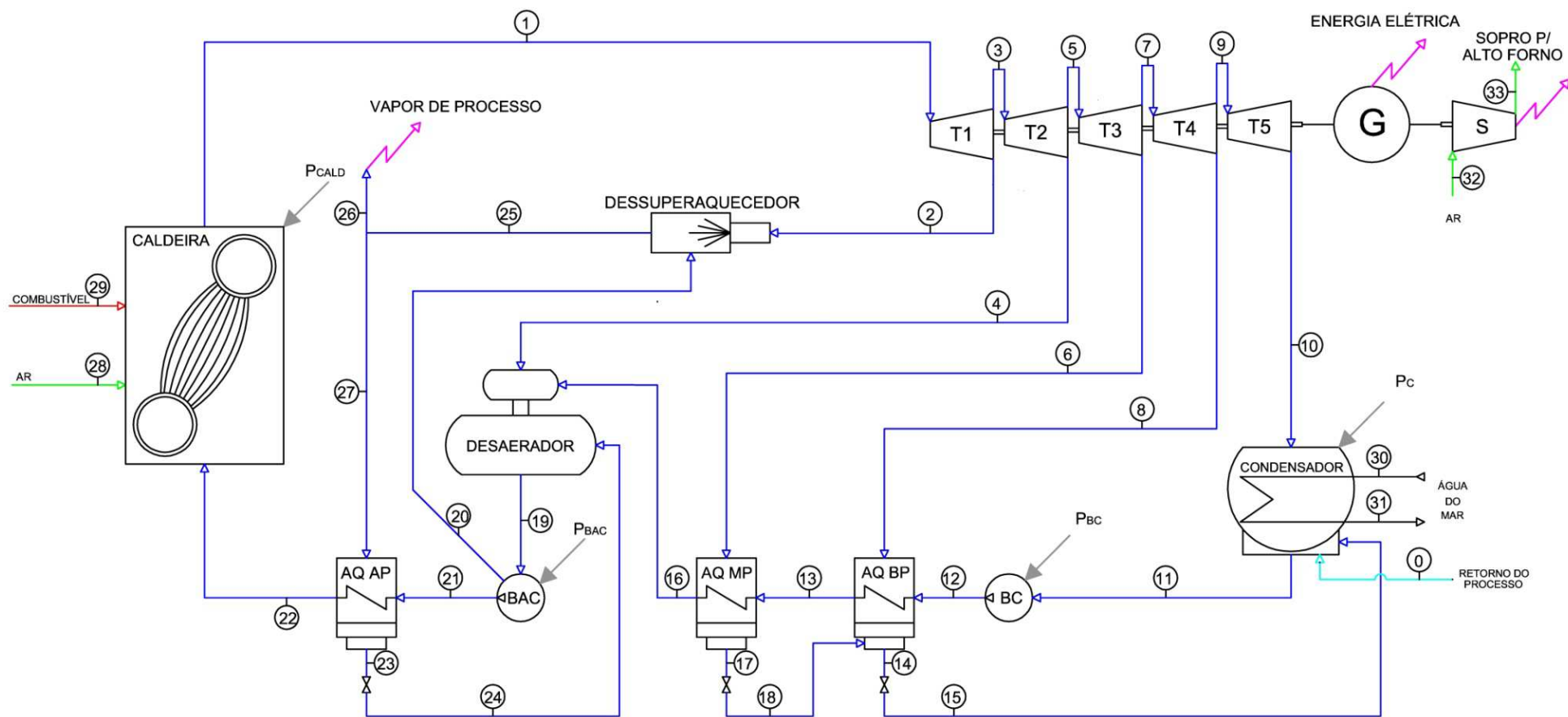


Figura 4.3: Estrutura Física da planta do estudo de caso
Fonte: Belisario (2012).

4.2 Estrutura Produtiva

A estrutura produtiva ou diagrama produtivo representa a função produtiva de cada equipamento do ciclo e é necessária para aplicação da metodologia do Diagnóstico Termoeconômico. Além disso, sua forma gráfica (diagrama produtivo) facilita sua visualização e interpretação dos dados e fluxos de insumos e produtos do ciclo.

Com o objetivo de verificar as vantagens da utilização do modelo H&S para realização de Diagnósticos Termoeconômicos de sistemas térmicos, será realizado o Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do estudo de caso utilizado os três diferentes modelos Termoeconômicos (E, E&S e o H&S) e ao final, os resultados de todos os três Diagnósticos Termoeconômicos realizados serão apresentados e analisados.

4.2.1 Estrutura Produtiva do modelo E

A estrutura produtiva segundo o Modelo E é apresentada na Figura 4.4 e é construída baseada no conceito de que cada equipamento da planta possui um produto e um insumo definidos em termos de fluxos exergeticos. Os equipamentos que possuem mais de um produto (BAC, DES e G) apresentam bifurcações em sua saída e os que possuem mais de um insumo (CALD, D, AQ BP, AQ AP, DES e T5-C), junções em sua entrada. Os equipamentos que aumentam a exergia do fluido de trabalho são produtores de exergia e os que reduzem a exergia do fluido de trabalho possuem exergia como insumo. Ao lado esquerdo, estão os equipamentos que somente contribuem para o aumento de exergia do fluido de trabalho (CALD, BAC e BC) além dos equipamentos que tanto aumentam como diminuem a exergia (D, AQ BP, AQ MP e AQ AP). Ao lado direito se encontram os equipamentos que somente consomem exergia do mesmo (T1, T2, T3, T4 e T5-C).

Os fluxos produtivos dos equipamentos que aumentam a exergia do ciclo se unem em uma junção (JE) e são distribuídos aos consumidores por uma bifurcação (BE). Além dos fluxos internos de exergia da água, estão presentes os fluxos de potência elétrica (P_i) e de eixo (W_i), além dos produtos finais da planta (S_{AF} , P_L e V). Os fluxos externos são a exergia do combustível (Q_C) e a água de retorno de processo (A_0).

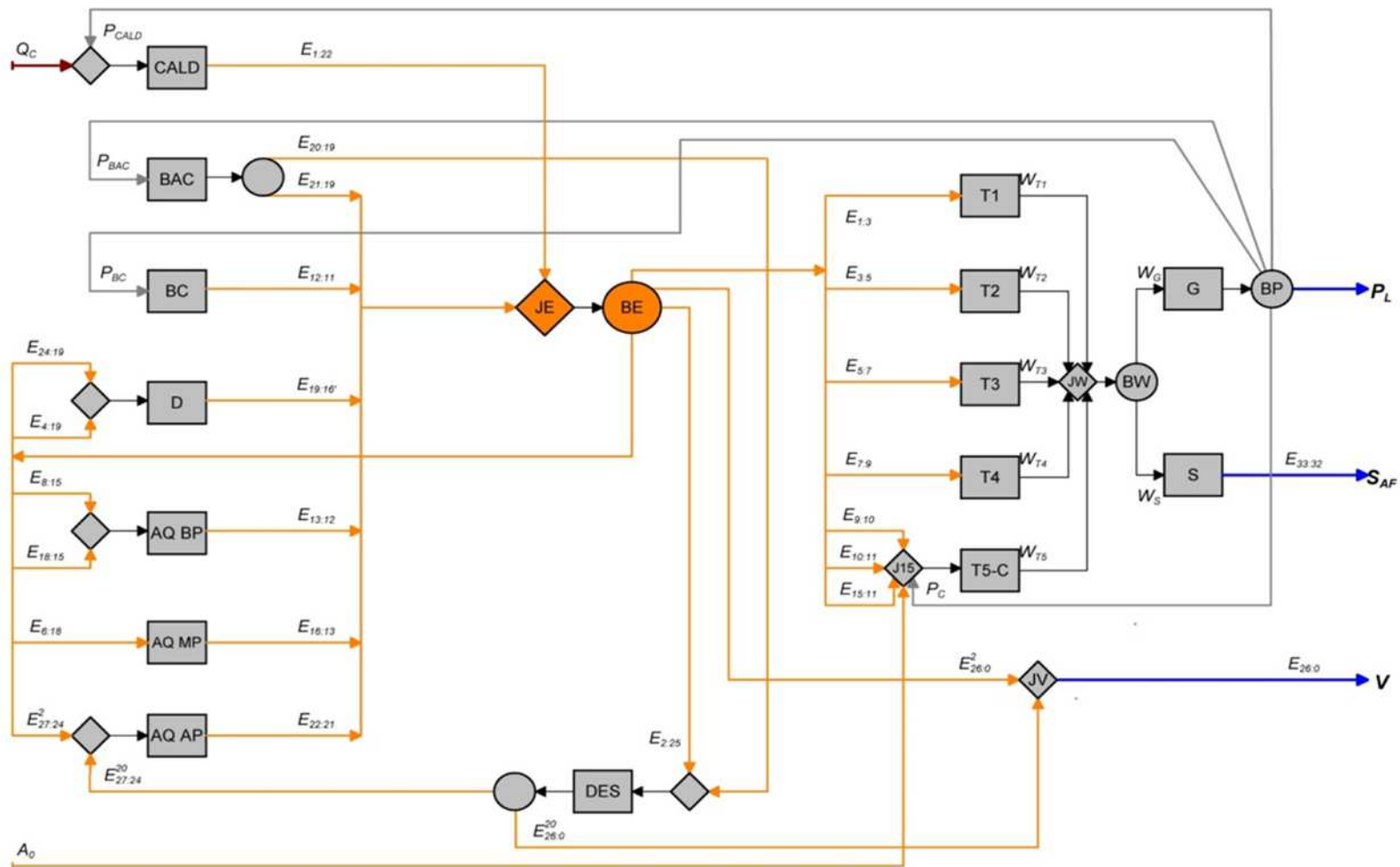


Figura 4.4: Estrutura Produtiva da central de cogeração segundo o Modelo E
Fonte: Belisario (2012).

Alguns equipamentos como a bomba de alimentação de caldeira (BAC) e o dessuperaquecedor (DES) se relacionam particularmente e diretamente com outros equipamentos. A BAC, além do produto $E_{21:19}$, produz o fluxo $E_{20:19}$ que é insumo para o dessuperaquecedor. Este último tem como produtos o fluxo $E_{27:24}^{20}$, que é insumo para o AQ AP e o fluxo $E_{26:0}^2$, insumo para a produção do vapor de processo.

Neste momento, fica evidente a desvantagem da aplicação do Modelo E em análises termoeconômicas de centrais a vapor: o condensador (C), por ser um equipamento dissipativo, não possui um produto definido em termos de exergia e deve ser alocado juntamente ao equipamento T5, formando uma unidade composta por dois equipamentos (T5-C). Esse procedimento impossibilita a análise do consumo exergético unitário do condensador como equipamento independente, limitando assim os resultados do Modelo ao Diagnóstico Termoeconômico e otimização local de sistemas térmicos que envolvam equipamentos dissipativos por não se ter um produto definido para estes equipamentos.

Os produtos e insumos de cada unidade estão representados na estrutura produtiva composta pelos próprios fluxos físicos da planta (P, W, A, Q) e também de variações dos fluxos de exergia ($E_{i:j}$) do fluido de trabalho em cada equipamento. Os fluxos produtivos baseados na variação de exergia dos fluxos físicos são calculados seguindo a notação das Equações 4.1 e 4.2.

$$E_{i:j} = \dot{m}_i \cdot (e_i - e_j) \quad (4.1)$$

$$E_{i:j'} = \dot{m}_j \cdot (e_i - e_j) \quad (4.2)$$

Foi preciso definir outra notação para se determinar a função produtiva do dessuperaquecedor e do aquecedor de alta pressão, que se relacionam entre si e com o ciclo em geral, conforme já citado. A Equação 4.3 determina o procedimento de cálculo dos fluxos produtivos destes equipamentos baseado na variação de exergia dos fluxos físicos que atravessam os mesmos e de um rateio de vazões mássicas relacionadas aos processos.

$$E_{i:j}^k = \dot{m}_k \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{25}} \right) \cdot (e_i - e_j) \quad (4.3)$$

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores obtidos das exergias dos fluxos físicos da estrutura produtiva do sistema térmico do estudo de caso.

Tabela 4.5: *Valores de exergia dos fluxos físicos do sistema térmico do estudo de caso*

FLUXO FÍSICO DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA [kW]	CONDIÇÃO DE TESTE [kW]
$E_{1:3}$	11908,6	11949,7
$E_{1:22}$	87098,1	89980,6
$E_{2:25}$	1843,1	1757,4
$E_{3:5}$	14666,2	14736,8
$E_{4:19}$	2682,9	3123,6
$E_{5:7}$	26037,2	24978,9
$E_{6:18}$	2216,6	2467,8
$E_{7:9}$	12083,4	14417,0
$E_{8:15}$	1596,0	1561,3
$E_{9:10}$	16499,7	16486,5
$E_{10:11}$	3624,8	4497,7
$E_{12:11}$	106,2	130,0
$E_{13:12}$	1120,7	979,7
$E_{15:11}$	206,2	203,9
$E_{16:13}$	2075,8	1989,9
$E_{18:15}$	292,0	487,2
$E_{19:16}$	2063,8	2492,1
$E_{20:19}$	12,2	16,7
$E_{21:19}$	1035,0	1126,5
$E_{22:21}$	4375,8	4044,5
$E_{24:19}$	836,3	941,4
$E^2_{26:0}$	0,0	0,0
$E^{20}_{26:0}$	0,0	0,0
$E^2_{27:24}$	3382,5	3133,9
$E^{20}_{27:24}$	1054,5	1094,9

4.2.2 Estrutura Produtiva do modelo E&S

Na estrutura produtiva utilizando o modelo E&S, apresentada na Figura 4.5 já é possível tratar o condensador como um equipamento independente e conseqüentemente separado do equipamento T5 (Estágios da Turbina entre a 4^o extração e o gás exausto) em função da utilização da neguentropia como fluxo fictício juntamente com a exergia para se definir a função produtiva de cada equipamento. A Figura 4.5 é apresentada a estrutura produtiva da central de cogeração siderúrgica segundo o Modelo E&S.

Como apresentado no capítulo 3, no modelo E&S, o condensador (C) pode ser visto agora isolado no diagrama produtivo, com seu produto definido pelos dois fluxos neguentrópicos ($S_{10:11}$ e $S_{15:11}$) além de insumos de exergia e potência. Uma junção de neguentropia (JS) recebe todos os fluxos de produtos de equipamentos que reduzem a entropia do fluido de trabalho e uma bifurcação (BS) os distribui aos equipamentos que aumentam a entropia do fluido. Além do condensador, todos os aquecedores de alimentação (D, AQ BP, AQMP e AQAP) e o dessuperaquecedor (DES) diminuem a entropia do fluido de trabalho, e de acordo com a definição, injetam neguentropia no sistema.

Os fluxos de exergia presentes no Modelo E&S são os mesmos do Modelo E. Com exceção do gerador, soprador e condensador, todos os demais equipamentos da estrutura física contribuem para aumentar a entropia do fluido de trabalho e por isso, têm fluxos de neguentropia como insumo. As unidades que reduzem a entropia do fluido (D, AQBP, AQMP, AQAP, DES e C) produzem fluxos de neguentropia para o ciclo ou para outros subsistemas. Os equipamentos que tanto produzem como consomem fluxos de neguentropia (aquecedores de alimentação aberto e fechados e dessuperaquecedor) são os mesmo que possuem fluxos de exergia como insumo e produto. Além dos fluxos produtivos definidos pelas variações de exergia dos fluxos físicos (Equações 4.1, 4.2 e 4.3), também é necessário definir fluxos produtivos em termos de variações de entropia dadas pelas Equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$S_{i:j} = -T_0 \cdot m_i \cdot (s_i - s_j) \quad (4.4)$$

$$S_{i:j'} = -T_0 \cdot m_j \cdot (s_i - s_j) \quad (4.5)$$

$$S_{i:j}^k = -T_0 \cdot m_k \left(\frac{m_i}{m_{25}} \right) \cdot (S_i - S_j) \quad (4.6)$$

Os equipamentos (D, AQBP, AQMP, AQAP, DES e JV) além de aumentarem a exergia do fluido de trabalho, também produzem neguentropia. O único equipamento cuja única função produtiva seja somente reduzir a entropia do fluido de trabalho é o condensador (C).

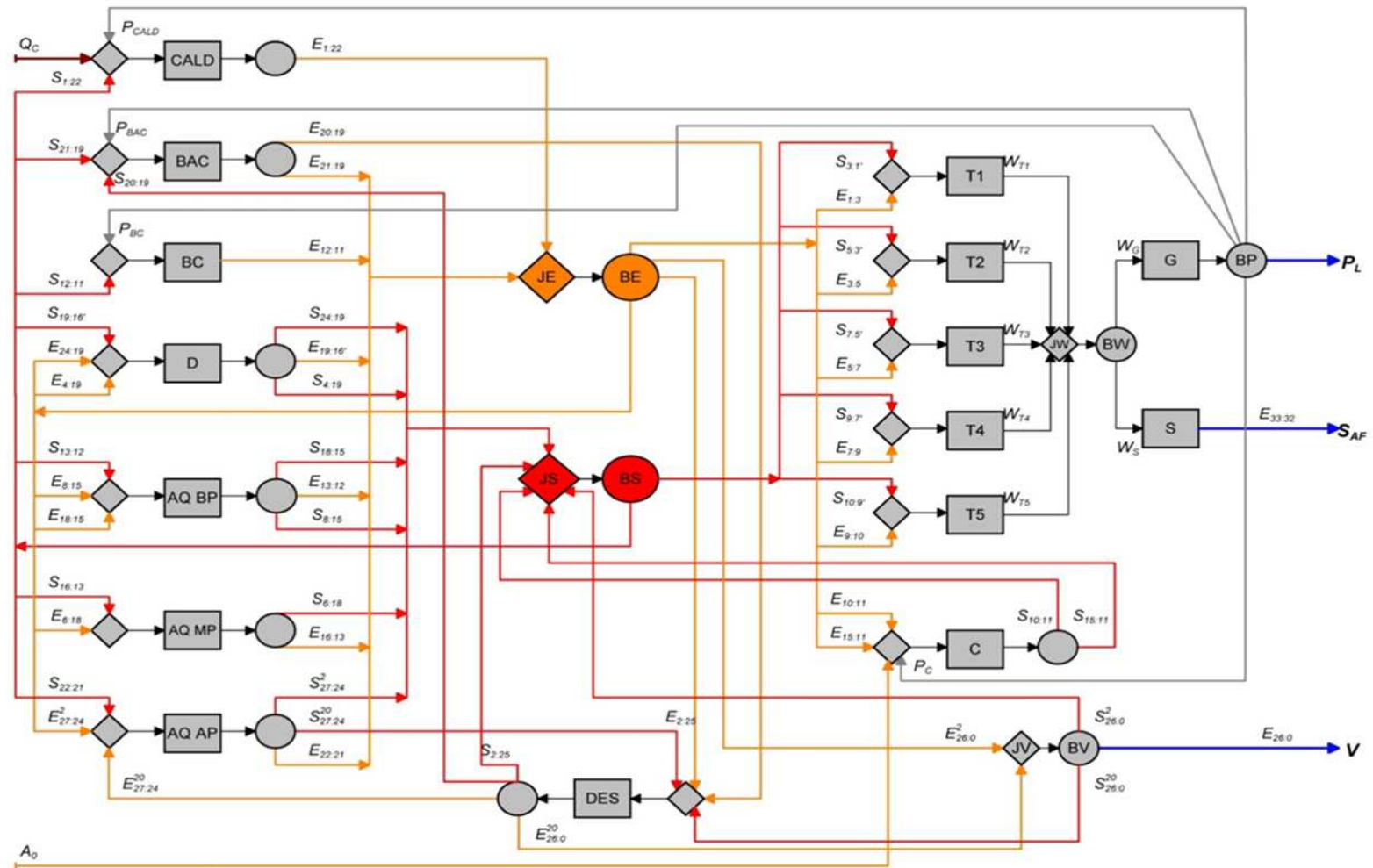


Figura 4.5: Estrutura Produtiva da central de cogeração segundo o Modelo E&S
Fonte: Belisario (2012).

Os dados de exergia dos fluxos físicos da estrutura produtiva do sistema térmico do estudo de caso foram apresentados na Tabela 4.5. Na Tabela 4.6 são apresentados os dados da neguentropia do sistema térmico do estudo de caso.

Tabela 4.6: *Valores de neguentropia dos fluxos físicos do sistema térmico do estudo de caso*

FLUXO FÍSICO DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA [kW]	CONDIÇÃO DE TESTE [kW]
$S_{3:1'}$	3018,0	3068,1
$S_{1:22}$	91932,8	94660,4
$S_{2:25}$	669,8	617,5
$S_{5:3'}$	2400,1	2603,7
$S_{4:19}$	4428,5	5068,3
$S_{7:5'}$	3966,9	3935,3
$S_{6:18}$	6930,1	7080,3
$S_{9:7'}$	1934,0	2449,6
$S_{8:15}$	8164,7	7861,7
$S_{10:9'}$	5521,2	1638,7
$S_{10:11}$	112712,0	111195,4
$S_{12:11}$	238,9	600,0
$S_{13:12}$	10442,7	8878,7
$S_{15:11}$	1767,1	1682,0
$S_{16:13}$	8286,7	8333,2
$S_{18:15}$	993,9	1596,3
$S_{19:16'}$	5780,4	7022,5
$S_{20:19}$	6,8	16,5
$S_{21:19}$	594,9	722,5
$S_{22:21}$	8805,7	8167,0
$S_{24:19}$	1539,6	1709,1
$S_{26:0}^2$	0,0	0,0
$S_{26:0}^{20}$	0,0	0,0
$S_{27:24}^2$	5716,7	5269,3
$S_{27:24}^{20}$	1782,3	1840,9

Os equipamentos (D, AQBP, AQMP, AQAP, DES e JV) além de aumentarem a exergia do fluido de trabalho, também produzem neguentropia. O único equipamento cuja única função produtiva seja somente reduzir a entropia do fluido de trabalho é o condensador (C).

4.2.3 Estrutura Produtiva do modelo H&S

Por último, é aplicado o Modelo H&S no sistema térmico do estudo de caso. Os fluxos de trabalho de neguentropia juntamente com a entalpia são utilizados para se definir a estrutura produtiva do sistema térmico do estudo de caso. A estrutura produtiva utilizando o modelo H&S é apresentada na Figura 4.6.

A estrutura produtiva do Modelo H&S do estudo de caso é semelhante a do Modelo E&S. A única diferença é que os fluxos produtivos de exergia ($E_{i:j}$) são substituídos pelos respectivos fluxos de entalpia ($H_{i:j}$). Os equipamentos que aumentam a entalpia dos fluxos de trabalho (CALD, BAC, BC, D, AQBP, AQMP, AQAP e DES) são os mesmos que aumentam a exergia dos fluxos de trabalho no Modelo E&S. O mesmo ocorre para os equipamentos que consomem entalpia (D, AQBP, AQMP, AQAP, DES, T1, T2, T3, T4, T5). Os fluxos entálpicos produzidos são unidos por uma junção de entalpia (JH) e distribuídos aos equipamentos consumidores por uma bifurcação de entalpia (BH), como pode ser visualizado na Figura 4.6. Para calcular estes fluxos, consideram-se as Equações 4.7, 4.8 e 4.9.

$$H_{i:j} = \dot{m}_i \cdot (h_i - h_j) \quad (4.7)$$

$$H_{i:j'} = \dot{m}_j \cdot (h_i - h_j) \quad (4.8)$$

$$H_{i:j}^k = \dot{m}_k \left(\frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{25}} \right) \cdot (h_i - h_j) \quad (4.9)$$

Conforme já mencionado, para o Modelo H&S, que trata a exergia física desagregada em suas parcelas entálpica e entrópica, os únicos fluxos do sistema que são contabilizados em termos de exergia total são os fluxos externos (Q_C) e produtos finais (P_L , SAF e V).

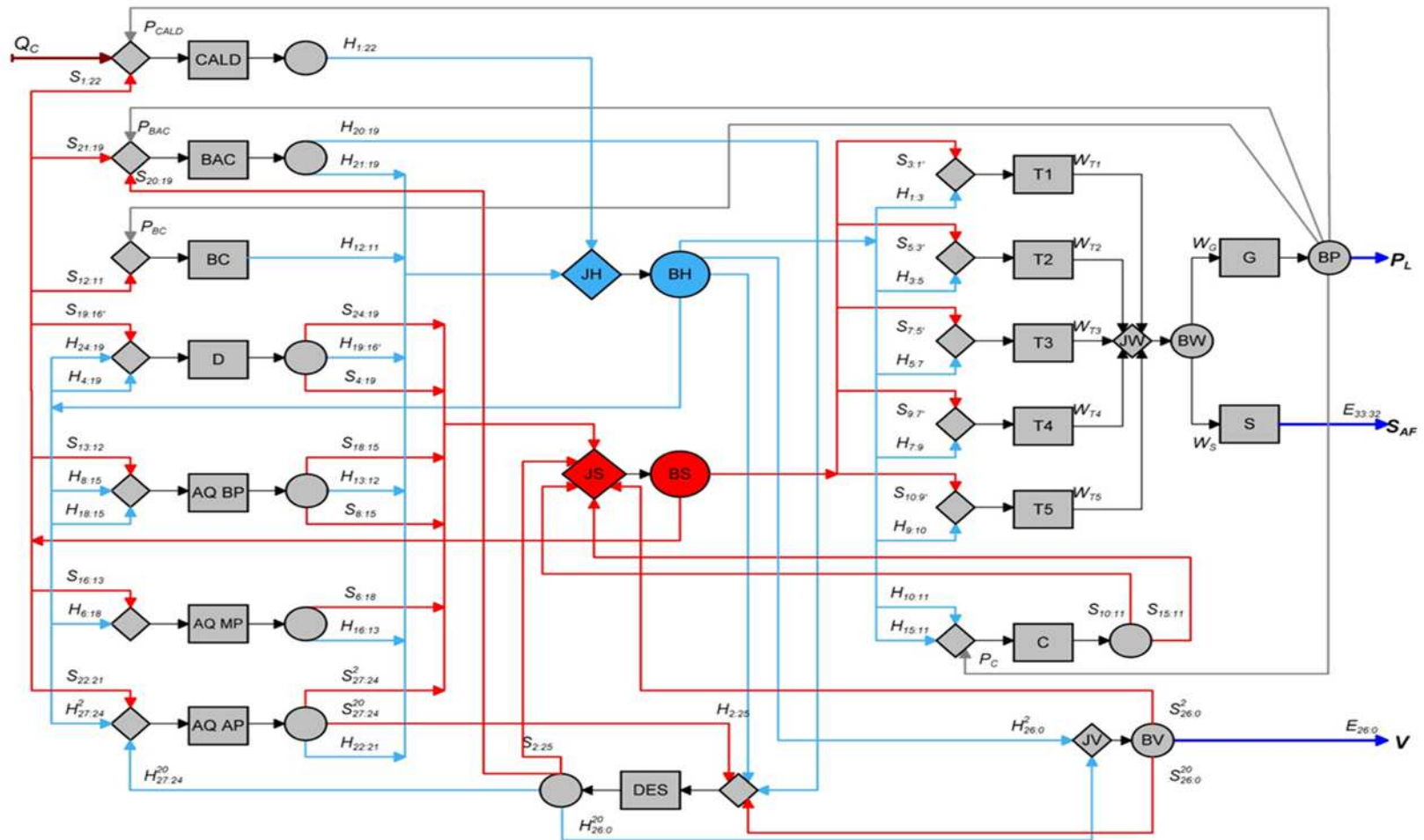


Figura 4.6: Estrutura Produtiva da central de cogeração segundo o Modelo H&S
Fonte: Belisario (2012).

Os dados de neguentropia dos fluxos físicos da estrutura produtiva do sistema térmico do estudo de caso foram apresentados na Tabela 4.6. Na Tabela 4.7 são apresentados os dados entalpia do sistema térmico do estudo de caso.

Tabela 4.7: *Valores de entalpia dos fluxos físicos do sistema térmico do estudo de caso*

FLUXO FÍSICO DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA [kW]	CONDIÇÃO DE TESTE [kW]
$H_{1:3}$	8890,7	8881,6
$H_{1:22}$	179031,0	184640,9
$H_{2:25}$	2512,8	2374,9
$H_{3:5}$	12266,1	12133,1
$H_{4:19}$	7111,4	8191,9
$H_{5:7}$	22070,3	21043,6
$H_{6:18}$	9146,7	9548,2
$H_{7:9}$	10149,4	11967,4
$H_{8:15}$	9760,8	9423,0
$H_{9:10}$	10978,5	14847,9
$H_{10:11}$	116336,8	115693,1
$H_{12:11}$	345,1	730,0
$H_{13:12}$	11563,4	9858,3
$H_{15:11}$	1973,3	1885,9
$H_{16:13}$	10362,5	10323,1
$H_{18:15}$	1285,9	2083,5
$H_{19:16'}$	7844,2	9514,6
$H_{20:19}$	19,0	33,2
$H_{21:19}$	1629,9	1849,0
$H_{22:21}$	13181,6	12211,6
$H_{24:19}$	2375,9	2650,5
$H_{26:0}^2$	0,0	0,0
$H_{26:0}^{20}$	0,0	0,0
$H_{27:24}^2$	9099,2	8403,2
$H_{27:24}^{20}$	2836,8	2935,9

Para a coleta dos dados necessários à realização do Diagnóstico Termoeconômico da planta dos estudo de caso, foi necessário levantar os dados operacionais da planta a partir de literaturas anteriores e de testes de performances realizados para a condição de referência e coleta de dados possíveis de acordo com a instrumentação disponível na planta e simulação de demais dados não disponíveis para encontrar os dados da condição de teste. Na Tabela 4.8 são apresentados os dados das condições de entrada dos combustíveis na caldeira tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste.

Tabela 4.8: *Condição de queima dos combustíveis siderúrgicos*

CONDIÇÃO	COMBUSTÍVEL	P [bar]	T [C]	m [kg/s]	PCI [kJ/kg]	E [kW]
REFERÊNCIA	C2 (BFG)	1,013	43,0	55,2	2.577	142.401
	C1 (COG)	1,013	38,0	0,9	43.132	40.796
	<i>Mix</i>	1,013	42,97	56,1	3.250,7	183196,6
TESTE	C2 (BFG)	1,013	43,0	56,3	2576,9	145.379,4
	C1 (COG)	1,013	38,0	1,1	42554	48.459,8
	<i>Mix</i>	1,013	43,35	57,44	3358,8	193.839,2

Na Tabela 4.9 são apresentados os dados de potência elétrica consumida nos equipamentos auxiliares da planta para as condições de referência e de teste. Todos estes consumos foram considerados no Diagnóstico Termoeconômico realizado e, portanto, estão contemplados na estrutura produtiva do sistema térmico do estudo de caso.

Tabela 4.9: *Consumo elétrico auxiliar dos equipamentos nas condição de referência e de teste*

EQUIPAMENTO	CONSUMO (KW)	
	CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA	CONDIÇÃO DE TESTE
CALD	600,9	625
BC	119,0	138
BAC	1176,5	1210
C	319,3	335

4.3 Diagnóstico Termoeconômico da planta do estudo de caso

Para o desenvolvimento do Diagnóstico Termoeconômico da planta do estudo de caso, aplicaremos a mesma metodologia utilizada no capítulo 3 para o desenvolvimento do Diagnóstico Termoeconômico de um sistema térmico simples.

O Diagnóstico Termoeconômico do sistema térmico do estudo de caso foi realizado utilizando os três modelos termoeconômicos (E, E&S e H&S), ou seja, três Diagnósticos Termoeconômicos foram realizados e ao final deste trabalho os resultados obtidos serão analisados. Neste capítulo apresentaremos em detalhes os resultados de cada etapa do Diagnóstico Termoeconômico do modelo H&S.

4.3.1 Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo E

ETAPA 1 – Definir a condição de referência:

Os dados da condição de referência do sistema térmico do estudo de caso são apresentados na Tabela 4.10.

ETAPA 2 – Definir a condição de teste:

Os dados da condição de teste do sistema térmico do estudo de caso são apresentados na Tabela 4.11.

ETAPA 3 – Representação F-P:

Através da estrutura produtiva e das condições de referência e condição de teste ou real do sistema térmico foi elaborada a matriz F-P para a condição de referência e para a condição de teste e ambas são apresentadas nas Tabelas 4.12 e 4.13.

ETAPA 4 – Obtenção da matriz $\langle KP \rangle$:

A matriz $\langle KP \rangle$ é apresentada tanto pra a condição de referência quanto para a condição de teste do sistema térmico analisado nas Tabelas 4.14 e 4.15.

ETAPA 5 – Elaboração da matriz unitária U_D :

A matriz U_D é uma matriz unitária diagonal e é apresentada na Tabela 4.16.

Tabela 4.10: *Condição de referência do sistema térmico do estudo de caso*

FLUXOS FÍSICOS		p	T	m
Nº	DESCRIÇÃO	[bar]	[°C]	[kg/s]
0	Ambiente	1,01	25,00	0,00
1	Vapor	85,00	510,00	69,44
2	Vapor	41,00	433,00	5,10
3	Vapor	41,00	433,00	64,34
4	Vapor	16,00	329,00	2,88
5	Vapor	16,00	329,00	61,46
6	Vapor	2,00	136,00	4,39
7	Vapor	2,00	136,00	57,07
8	Água/Vapor	0,54	83,00	4,44
9	Água/Vapor	0,54	83,00	52,62
10	Água/Vapor	0,06	34,00	52,62
11	Água	0,06	34,00	61,46
12	Água	16,00	35,00	61,46
13	Água	16,00	80,00	61,46
14	Água/Vapor	0,51	81,40	8,84
15	Água/Vapor	0,51	81,40	8,84
16	Água	16,00	120,00	61,46
17	Água/Vapor	2,00	86,00	4,39
18	Água/Vapor	2,00	86,00	4,39
19	Água	6,00	150,00	70,59
20	Água	60,00	152,00	1,59
21	Água	110,00	154,00	69,00
22	Água	100,00	198,00	69,00
23	Água/Vapor	16,00	159,00	6,25
24	Água/Vapor	16,00	159,00	6,25
25	Vapor	16,00	202,60	6,69
26	Vapor	16,00	202,60	0,00
27	Vapor	16,00	202,60	6,69
28	Ar	1,01	25,00	53,31
29	Combustível	1,01	42,97	56,11
30	Água do Mar	1,85	22,00	2616
31	Água do Mar	1,01	32,00	2616
32	Ar	1,01	25,00	152,00
33	Ar	5,50	225,00	152,00

Tabela 4.11: *Condição de teste do sistema térmico do estudo de caso*

FLUXOS FÍSICOS		p	T	m
Nº	DESCRIÇÃO	[bar]	[°C]	[kg/s]
0	Ambiente	1,01	25,00	0,00
1	Vapor	86,30	515,70	70,95
2	Vapor	42,23	440,42	4,78
3	Vapor	42,23	440,42	66,17
4	Vapor	16,80	340,14	3,30
5	Vapor	16,80	340,14	62,87
6	Vapor	2,51	160,63	4,80
7	Vapor	2,51	160,63	58,07
8	Água/Vapor	0,56	84,19	4,25
9	Água/Vapor	0,56	84,19	53,82
10	Água/Vapor	0,06	37,06	53,82
11	Água	0,06	37,06	62,87
12	Água	16,38	39,49	62,87
13	Água	16,38	77,00	62,87
14	Água/Vapor	0,50	80,50	9,05
15	Água/Vapor	0,50	80,50	9,05
16	Água	16,38	116,00	62,87
17	Água/Vapor	2,11	81,80	4,80
18	Água/Vapor	2,11	81,80	4,80
19	Água	6,70	151,56	72,62
20	Água	59,50	155,43	1,67
21	Água	111,90	156,12	70,95
22	Água	101,10	195,80	70,95
23	Água/Vapor	16,30	164,17	6,45
24	Água/Vapor	16,30	164,17	6,45
25	Vapor	16,30	207,40	6,45
26	Vapor	16,30	207,40	0,00
27	Vapor	16,30	207,40	6,45
28	Ar	1,01	25,00	66,64
29	Combustível	1,01	43,35	70,15
30	Água do Mar	1,90	24,50	2950
31	Água do Mar	1,01	32,00	2950
32	Ar	1,01	25,00	152,00
33	Ar	4,89	227,00	159,50

Tabela 4.12: Matriz F-P para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F ₀	F _{CALD}	F _{BAC}	F _{BC}	F _D	F _{AQBP}	F _{AQMP}	F _{AQAP}	F _{DES}	F _{T1}	F _{T2}	F _{T3}	F _{T4}	F _(T5+C)	F _G	F _S	F _{JE/BE}	F _{JW/BW}	F _{JV}	TOTAL	
P ₀		183.197																			183.196,56
P _{CALD}																	87.098				87.098,15
P _{BAC}									12								1.035				1.047,20
P _{BC}																	106				106,16
P _D																	2.064				2.063,82
P _{AQBP}																	1.121				1.120,74
P _{AQMP}																	2.076				2.075,78
P _{AQAP}																	4.376				4.375,84
P _{DES}									1.055											0	1.054,54
P _{T1}																			8.891		8.891,00
P _{T2}																			12.266		12.266,00
P _{T3}																			22.070		22.070,00
P _{T4}																			10.176		10.176,00
P _(T5+C)																			15.219		15.219,00
P _G	33.100,00	601	1.177	119											319						35.315,74
P _S	29.705,28																				29.705,28
P _{JE/BE}					3.519	1.888	2.217	3.382	1.843	11.909	14.666	26.037	12.083	20.331						0	97.875,48
P _{JW/BW}															37.844	30.778					68.622,00
P _{JV}	0,00																				0,00
TOTAL	62.805,28	183.797,46	1.176,50	119,04	3.519,23	1.888,03	2.216,57	4.437,02	1.855,31	11.908,62	14.666,20	26.037,16	12.083,38	20.650,03	37.844,00	30.778,00	97.875,48	68.622,00	0,00		

Tabela 4.13: Matriz F-P para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F ₀	F _{CALD}	F _{BAC}	F _{BC}	F _D	F _{AQBP}	F _{AQMP}	F _{AQAP}	F _{DES}	F _{T1}	F _{T2}	F _{T3}	F _{T4}	F _(T5+C)	F _G	F _S	F _{JE/BE}	F _{JW/BW}	F _{JV}	TOTAL
P ₀		193.839																		193.839,21
P _{CALD}																	89.981			89.980,55
P _{BAC}									17								1.127			1.143,28
P _{BC}																	130			130,00
P _D																	2.492			2.492,06
P _{AQBP}																	980			979,66
P _{AQMP}																	1.990			1.989,89
P _{AQAP}																	4.045			4.044,54
P _{DES}								1.095											0	1.094,91
P _{T1}																		8.882		8.881,62
P _{T2}																		12.133		12.133,12
P _{T3}																		21.044		21.043,57
P _{T4}																		11.967		11.967,35
P _(T5+C)																		14.848		14.847,85
P _G	33.101,21	625	1.210	138										335						35.409,21
P _S	29.705,28																			29.705,28
P _{JE/BE}					4.065	2.049	2.468	3.134	1.757	11.950	14.737	24.979	14.417	21.188					0	100.743,24
P _{JW/BW}															38.034	30.840				68.873,52
P _{JV}	0,00																			0,00
TOTAL	62.806,49	194.464,21	1.210,00	138,00	4.064,95	2.048,50	2.467,84	4.228,84	1.774,17	11.949,73	14.736,85	24.978,87	14.417,00	21.523,14	38.033,52	30.840,00	100.743,24	68.873,52	0,00	

Tabela 4.14: Matriz KP para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F (T5+C)	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV
P 0	2,103	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P CALD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,890	0,000	0,000
P BAC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000
P BC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
P D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000
P AQBP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000
P AQMP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000
P AQAP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,000	0,000
P DES	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,238
P T1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	0,000
P T2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,179	0,000
P T3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,322	0,000
P T4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,148	0,000
P (T5+C)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,222	0,000
P G	0,007	1,123	1,121	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P JE/BE	0,000	0,000	0,000	1,705	1,685	1,068	0,773	1,748	1,339	1,196	1,180	1,187	1,336	0,000	0,000	0,000	0,000	0,762
P JW/BW	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,072	1,036	0,000	0,000	0,000
P JV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	2,110	1,123	1,121	1,705	1,685	1,068	1,014	1,759	1,339	1,196	1,180	1,187	1,357	1,072	1,036	1,000	1,000	1,000

Tabela 4.15: *Matriz KP para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)*

	F _{CALD}	F _{BAC}	F _{BC}	F _D	F _{AQBP}	F _{AQMP}	F _{AQAP}	F _{DES}	F _{T1}	F _{T2}	F _{T3}	F _{T4}	F _(T5+C)	F _G	F _S	F _{JE/BE}	F _{JW/BW}	F _{JV}
P₀	2,154	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,893	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000
P_{DES}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,271	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,259
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,176	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,306	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,174	0,000
P_(T5+C)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,216	0,000
P_G	0,007	1,058	1,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE/BE}	0,000	0,000	0,000	1,631	2,091	1,240	0,775	1,605	1,345	1,215	1,187	1,205	1,427	0,000	0,000	0,000	0,000	0,741
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,074	1,038	0,000	0,000	0,000
P_{JV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	2,161	1,058	1,062	1,631	2,091	1,240	1,046	1,620	1,345	1,215	1,187	1,205	1,450	1,074	1,038	1,000	1,000	1,000

ETAPA 6 – Cálculo do operador produto [P]:

A matriz do operador produto [P] tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste são apresentadas, respectivamente nas Tabelas 4.17 e 4.18.

ETAPA 7 – Cálculo do operador de irreversibilidade [I]:

A matriz de irreversibilidades é apresentada para a condição de teste na Tabela 4.19.

ETAPA 8 – Obtenção do consumo exergético unitário dos produtos de cada componente:

Na Tabela 4.20 é apresentado o consumo exergético unitário dos equipamentos do sistema analisado tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste.

Tabela 4.17: Matriz do operador produto (P) para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F (T5+C)	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV
P CALD	1,01	1,583	1,580	1,800	1,779	1,127	1,265	1,864	1,414	1,262	1,246	1,254	1,440	1,409	1,362	1,056	1,315	1,2478
P BAC	0,000	1,019	0,019	0,022	0,021	0,014	0,018	0,034	0,017	0,015	0,015	0,015	0,017	0,017	0,016	0,013	0,016	0,0178
P BC	0,000	0,002	1,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,0015
P D	0,000	0,038	0,037	1,043	0,042	0,027	0,030	0,044	0,034	0,030	0,030	0,030	0,034	0,033	0,032	0,025	0,031	0,0296
P AQBP	0,000	0,020	0,020	0,023	1,023	0,015	0,016	0,024	0,018	0,016	0,016	0,016	0,019	0,018	0,018	0,014	0,017	0,0161
P AQMP	0,000	0,038	0,038	0,043	0,042	1,027	0,030	0,044	0,034	0,030	0,030	0,030	0,034	0,034	0,032	0,025	0,031	0,0297
P AQAP	0,000	0,080	0,079	0,090	0,089	0,057	1,064	0,094	0,071	0,063	0,063	0,063	0,072	0,071	0,068	0,053	0,066	0,0627
P DES	0,000	0,019	0,019	0,022	0,022	0,014	0,256	1,023	0,017	0,015	0,015	0,015	0,017	0,017	0,016	0,013	0,016	0,2528
P T1	0,001	0,162	0,161	0,005	0,005	0,003	0,004	0,007	1,004	0,004	0,004	0,004	0,007	0,144	0,139	0,003	0,134	0,0042
P T2	0,001	0,223	0,222	0,008	0,007	0,005	0,006	0,010	0,006	1,005	0,005	0,005	0,010	0,198	0,192	0,004	0,185	0,0058
P T3	0,002	0,401	0,400	0,014	0,013	0,009	0,011	0,019	0,011	0,010	1,009	0,009	0,018	0,357	0,345	0,008	0,333	0,0105
P T4	0,001	0,185	0,185	0,006	0,006	0,004	0,005	0,009	0,005	0,004	0,004	1,004	0,008	0,165	0,159	0,004	0,154	0,0048
P (T5+C)	0,002	0,277	0,276	0,009	0,009	0,006	0,007	0,013	0,007	0,007	0,006	0,007	1,012	0,246	0,238	0,005	0,230	0,0072
P G	0,007	1,164	1,161	0,039	0,039	0,025	0,031	0,054	0,031	0,028	0,027	0,027	0,053	1,036	0,035	0,023	0,033	0,0304
P S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0
P JE/BE	0,011	1,779	1,775	2,023	1,999	1,267	1,422	2,094	1,589	1,419	1,400	1,409	1,618	1,583	1,531	1,186	1,477	1,4022
P JW/BW	0,008	1,247	1,245	0,042	0,042	0,026	0,033	0,058	0,033	0,030	0,029	0,029	0,056	1,110	1,073	0,025	1,036	0,0326
P JV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1,04	8,23	8,22	5,19	5,14	3,63	4,20	5,39	4,29	3,94	3,90	3,92	4,42	6,44	6,26	2,46	5,08	3,16

Tabela 4.18: *Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)*

	F_{CALD}	F_{BAC}	F_{BC}	F_D	F_{AQBP}	F_{AQMP}	F_{AQAP}	F_{DES}	F_{T1}	F_{T2}	F_{T3}	F_{T4}	F_(T5+C)	F_G	F_S	F_{JE/BE}	F_{JW/BW}	F_{JV}
P_{CALD}	1,010	1,541	1,545	1,735	2,225	1,320	1,293	1,731	1,432	1,292	1,263	1,282	1,551	1,456	1,407	1,064	1,355	1,2367
P_{BAC}	0,000	1,020	0,020	0,022	0,028	0,017	0,021	0,037	0,018	0,016	0,016	0,016	0,020	0,018	0,018	0,014	0,017	0,0197
P_{BC}	0,000	0,002	1,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0018
P_D	0,000	0,043	0,043	1,048	0,062	0,037	0,036	0,048	0,040	0,036	0,035	0,035	0,043	0,040	0,039	0,029	0,038	0,0343
P_{AQBP}	0,000	0,017	0,017	0,019	1,024	0,014	0,014	0,019	0,016	0,014	0,014	0,014	0,017	0,016	0,015	0,012	0,015	0,0135
P_{AQMP}	0,000	0,034	0,034	0,038	0,049	1,029	0,029	0,038	0,032	0,029	0,028	0,028	0,034	0,032	0,031	0,024	0,030	0,0274
P_{AQAP}	0,000	0,069	0,069	0,078	0,100	0,059	1,058	0,078	0,064	0,058	0,057	0,058	0,070	0,065	0,063	0,048	0,061	0,0556
P_{DES}	0,000	0,019	0,019	0,021	0,027	0,016	0,286	1,021	0,017	0,016	0,015	0,016	0,019	0,018	0,017	0,013	0,016	0,274
P_{T1}	0,001	0,152	0,153	0,005	0,007	0,004	0,005	0,008	1,004	0,004	0,004	0,004	0,008	0,144	0,139	0,003	0,134	0,0044
P_{T2}	0,001	0,208	0,208	0,007	0,009	0,006	0,006	0,010	0,006	1,005	0,005	0,005	0,011	0,196	0,190	0,004	0,183	0,006
P_{T3}	0,002	0,360	0,361	0,013	0,016	0,010	0,011	0,018	0,010	0,009	1,009	0,009	0,019	0,340	0,329	0,008	0,317	0,0103
P_{T4}	0,001	0,205	0,206	0,007	0,009	0,005	0,006	0,010	0,006	0,005	0,005	1,005	0,011	0,194	0,187	0,004	0,180	0,0059
P_(T5+C)	0,002	0,254	0,255	0,009	0,011	0,007	0,008	0,013	0,007	0,007	0,006	0,007	1,013	0,240	0,232	0,005	0,224	0,0073
P_G	0,007	1,098	1,101	0,038	0,049	0,029	0,033	0,054	0,032	0,028	0,028	0,028	0,057	1,037	0,036	0,023	0,035	0,0315
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0
P_{JE/BE}	0,011	1,725	1,730	1,943	2,491	1,477	1,448	1,938	1,603	1,447	1,414	1,435	1,737	1,630	1,575	1,191	1,517	1,3847
P_{JW/BW}	0,008	1,179	1,183	0,041	0,053	0,031	0,035	0,058	0,034	0,031	0,030	0,030	0,061	1,114	1,077	0,025	1,037	0,0338
P_{JV}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	1,05	7,93	7,95	5,03	6,16	4,06	4,29	5,08	4,32	4,00	3,93	3,97	4,67	6,54	6,36	2,47	5,16	4,15

Tabela 4.19: Matriz do operador de irreversibilidade $|I|$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F_{CALD}	F_{BAC}	F_{BC}	F_D	F_{AQBP}	F_{AQMP}	F_{AQAP}	F_{DES}	F_{T1}	F_{T2}	F_{T3}	F_{T4}	F_(T5+C)	F_G	F_S	F_{JE/BE}	F_{JW/BW}	F_{JV}
P_{CALD}	1,173	1,789	1,794	2,015	2,583	1,532	1,502	2,010	1,662	1,501	1,466	1,488	1,801	1,690	1,634	1,235	1,574	1,43609
P_{BAC}	7E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0	0,00115
P_{BC}	9E-07	0	0	0	0	0	0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0	0,00011
P_D	2E-04	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,019	0	0,02162
P_{AQBP}	1E-04	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,013	0	0,01469
P_{AQMP}	5E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,006	0	0,00657
P_{AQAP}	2E-05	0	0	0	0	0	0	0	0,003	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0,00253
P_{DES}	8E-05	0	0	0	0	0	0	0,633	0	0	0	0	0	0	0	0,008	0	0,16996
P_{T1}	3E-04	0,053	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00151
P_{T2}	3E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,039	0,00128
P_{T3}	4E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,059	0,00193
P_{T4}	3E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,037	0,0012
P_(T5+C)	8E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,101	0,00328
P_G	5E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00233
P_S	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{JE/BE}	3E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,8E-08
P_{JW/BW}	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{JV}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
	1,18	2,32	2,33	2,74	3,79	1,84	1,79	2,73	2,08	1,78	1,72	1,76	2,34	2,14	2,03	1,29	1,92	1,66

Tabela 4.20: Tabela do consumo exergético unitário nas condições de referência e teste para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

Equipamento	Ki na condição de referência	Ki na condição de teste	ΔKi
CALD	2,110	2,161	0,051
BAC	1,123	1,058	-0,065
BC	1,121	1,062	-0,060
D	1,705	1,631	-0,074
AQBP	1,685	2,091	0,406
AQMP	1,068	1,240	0,172
AQAP	1,014	1,046	0,032
DES	1,759	1,620	-0,139
T1	1,339	1,345	0,006
T2	1,196	1,215	0,019
T3	1,180	1,187	0,007
T4	1,187	1,205	0,017
(T5+C)	1,357	1,450	0,093
G	1,072	1,074	0,003
S	1,036	1,038	0,002
JE/BE	1,000	1,000	0,000
JW/BW	1,000	1,000	0,000
JV	1,000	1,000	0,000

ETAPA 9 – Obtenção da matriz $\Delta\langle KP \rangle$:

Na Tabela 4.21 é apresentada a matriz $\Delta\langle KP \rangle$ do sistema térmico considerando o modelo Termoeconômico E.

Tabela 4.21: Matriz $\Delta(KP)$ para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F (T5+C)	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV
P₀	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,002	0,000	0,000
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,005	0,000	0,000
P_{DES}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,016	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000
P_(T5+C)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	0,000
P_G	0,000	-0,065	-0,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE/BE}	0,000	0,000	0,000	-0,074	0,406	0,172	0,002	-0,143	0,006	0,019	0,007	0,017	0,091	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,021
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000
P_{JV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,051	-0,065	-0,060	-0,074	0,406	0,172	0,032	-0,139	0,006	0,019	0,007	0,017	0,093	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000

ETAPA 10 – Obtenção da matriz de anomalias

Na Tabela 4.22 é apresentada a matriz das malfunções deste sistema considerando o modelo E.

ETAPA 11 – Obtenção da matriz de disfunções

Na Tabela 4.23 é apresentada a matriz das disfunções deste sistema considerando o modelo E.

ETAPA 12 – Cálculo do consumo adicional de combustível

Nesta etapa são somados as malfunções e as disfunções para se obter o desvio no consumo do combustível. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.24 e de forma gráfica o aumento do consumo de combustível é apresentado na Figura 4.7. Na Figura 4.8 é apresentado o gráfico da análise do consumo de combustível para este Diagnóstico Termoeconômico.

Tabela 4.22: *Matriz das malfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)*

	F_{CALD}	F_{BAC}	F_{BC}	F_D	F_{AQBP}	F_{AQMP}	F_{AQAP}	F_{DES}	F_{T1}	F_{T2}	F_{T3}	F_{T4}	F_(T5+C)	F_G	F_S	F_{JE/BE}	F_{JW/BW}	F_{JV}
P₀	4433	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{CALD}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	321	0	0
P_{BAC}	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0
P_{BC}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0
P_D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	357	0	0
P_{AQBP}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-169	0	0
P_{AQMP}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-143	0	0
P_{AQAP}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-446	0	0
P_{DES}	0	0	0	0	0	0	130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{T1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-42	0
P_{T2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-177	0
P_{T3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1103	0
P_{T4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1748	0
P_(T5+C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-425	0
P_G	4	-68	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0
P_S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{JE/BE}	0	0	0	-153	455	358	8	-150	54	232	160	176	1387	0	0	0	0	0
P_{JW/BW}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	62	0	0	0
P_{JV}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	4437	-68	-6	-153	455	358	138	-147	54	232	160	176	1411	89	62	0	0	0

Tabela 4.23: Matriz das disfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F (T5+C)	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV	TOTAL
P CALD	7	-115	-11	-189	563	442	272	-179	66	287	198	217	1754	140	98	-86	-118	0	3.345
P BAC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	6
P BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
P D	0	-2	0	-3	8	7	4	-3	1	4	3	3	26	2	1	219	-2	0	270
P AQBP	0	-1	0	-2	6	5	3	-2	1	3	2	2	18	1	1	-189	-1	0	-154
P AQMP	0	-1	0	-1	3	2	1	-1	0	1	1	1	8	1	0	-36	-1	0	-21
P AQAP	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	3	0	0	-21	0	0	-15
P DES	0	-1	0	-1	4	3	82	-1	0	2	1	1	11	1	1	-78	-1	0	25
P T1	0	-3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	4	3	4	-15	0	-3
P T2	0	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	3	-39	0	-29
P T3	0	-4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4	5	4	5	-207	0	-192
P T4	0	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	3	357	0	367
P (T5+C)	0	-7	-1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	6	9	6	8	-192	0	-167
P G	0	-5	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	4	0	0	6	-1	0	7
P S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P JE/BE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P JW/BW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P JV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	9	-146	-14	-197	588	462	366	-185	69	300	207	227	1844	171	119	-160	-220	0	

Tabela 4.24: Matriz do consumo adicional do combustível (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

	CALD	BAC	BC	D	AQBP	AQMP	AQAP	DES	T1	T2	T3	T4	(T5+C)	G	S	JE/BE	JW/BW	JV	DF	Malfunção	Total
ΔI_{CALD}	6,9	-115,3	-10,7	-188,8	562,7	442,0	271,6	-178,9	66,4	286,7	197,8	216,9	1.754,3	140,3	97,6	-86,1	-118,4	0,0	3.344,9	4.437,4	7.782,3
ΔI_{BAC}	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,4	0,3	0,3	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	1,1	0,1	0,1	3,1	-0,1	0,0	5,6	-68,2	-62,6
ΔI_{BC}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	1,5	-6,3	-4,9
ΔI_D	0,1	-1,7	-0,2	-2,8	8,5	6,7	4,1	-2,7	1,0	4,3	3,0	3,3	26,4	2,1	1,5	218,6	-1,8	0,0	270,3	-152,8	117,5
ΔI_{AQBP}	0,1	-1,2	-0,1	-1,9	5,8	4,5	2,8	-1,8	0,7	2,9	2,0	2,2	17,9	1,4	1,0	-189,0	-1,2	0,0	-153,9	455,5	301,5
ΔI_{AQMP}	0,0	-0,5	0,0	-0,9	2,6	2,0	1,2	-0,8	0,3	1,3	0,9	1,0	8,0	0,6	0,4	-36,3	-0,5	0,0	-20,6	357,8	337,2
ΔI_{AQAP}	0,0	-0,2	0,0	-0,3	1,0	0,8	0,5	-0,3	0,1	0,5	0,3	0,4	3,1	0,2	0,2	-21,2	-0,2	0,0	-15,1	138,2	123,1
ΔI_{DES}	0,0	-0,7	-0,1	-1,2	3,7	2,9	82,5	-1,2	0,4	1,9	1,3	1,4	11,4	0,9	0,6	-78,0	-0,8	0,0	25,0	-146,5	-121,5
ΔI_{T1}	0,2	-3,4	-0,3	-0,2	0,5	0,4	0,3	0,0	0,1	0,3	0,2	0,2	2,8	4,1	2,9	3,7	-15,0	0,0	-3,3	53,7	50,4
ΔI_{T2}	0,2	-2,9	-0,3	-0,1	0,4	0,3	0,3	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	2,3	3,5	2,4	3,1	-38,5	0,0	-28,6	232,0	203,5
ΔI_{T3}	0,3	-4,3	-0,4	-0,2	0,7	0,5	0,4	0,0	0,1	0,3	0,2	0,3	3,5	5,3	3,7	4,7	-207,1	0,0	-192,0	160,1	-31,9
ΔI_{T4}	0,2	-2,7	-0,3	-0,1	0,4	0,3	0,3	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	2,2	3,3	2,3	2,9	357,3	0,0	366,6	175,6	542,2
$\Delta I_{(T5+C)}$	0,4	-7,4	-0,7	-0,4	1,1	0,9	0,8	0,1	0,1	0,6	0,4	0,4	6,0	9,0	6,2	7,9	-192,5	0,0	-167,0	1.411,1	1.244,1
ΔI_G	0,3	-5,2	-0,5	-0,3	0,8	0,6	0,5	0,1	0,1	0,4	0,3	0,3	4,3	0,2	0,2	5,7	-0,9	0,0	6,8	89,1	96,0
ΔI_S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	62,0	62,0
$\Delta I_{JE/BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JW/BW}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ΔI_{JV}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	8,7	-145,6	-13,5	-197,4	588,5	462,3	365,6	-185,3	69,4	299,8	206,8	226,9	1.843,5	171,1	119,0	-159,8	-219,6	0,0	3.440,2		
Malfunção	4.437,4	-68,2	-6,3	-152,8	455,5	357,8	138,2	-146,5	53,7	232,0	160,1	175,6	1.411,1	89,1	62,0	0,0	0,0	0,0		7.198,6	
Consumo adicional de combustível	4.446,1	-213,8	-19,9	-350,2	1.044,0	820,1	503,8	-331,9	123,1	531,9	366,9	402,4	3.254,6	260,2	181,0	-159,8	-219,6	0,0			10.638,9

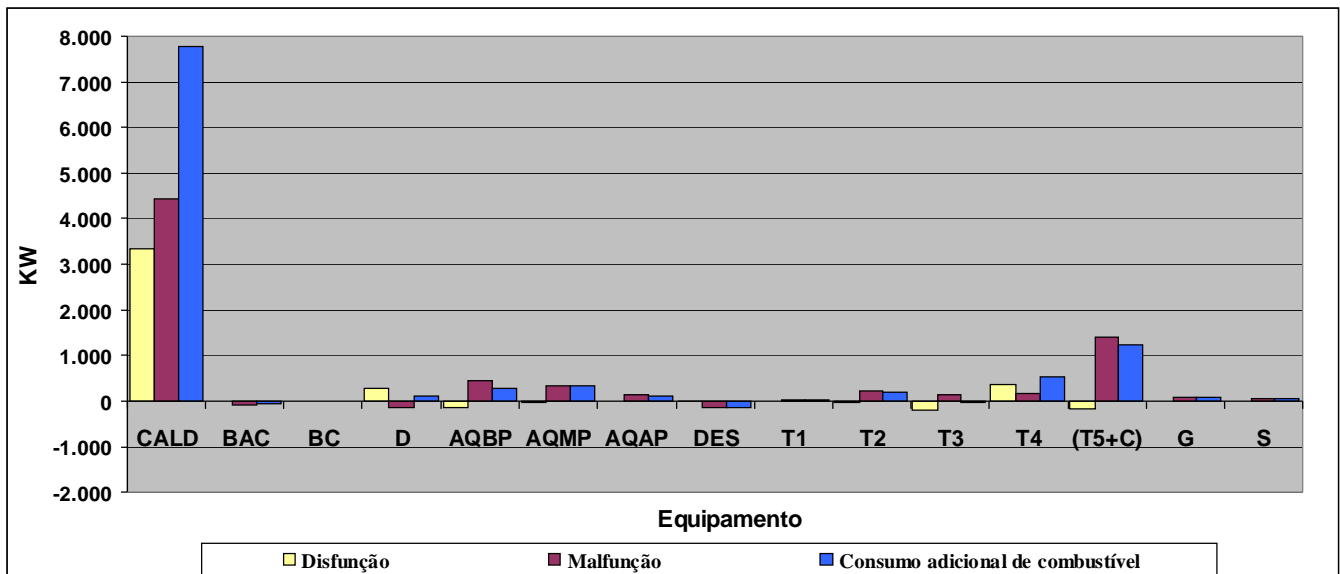


Figura 4.1: Aumento do consumo do combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

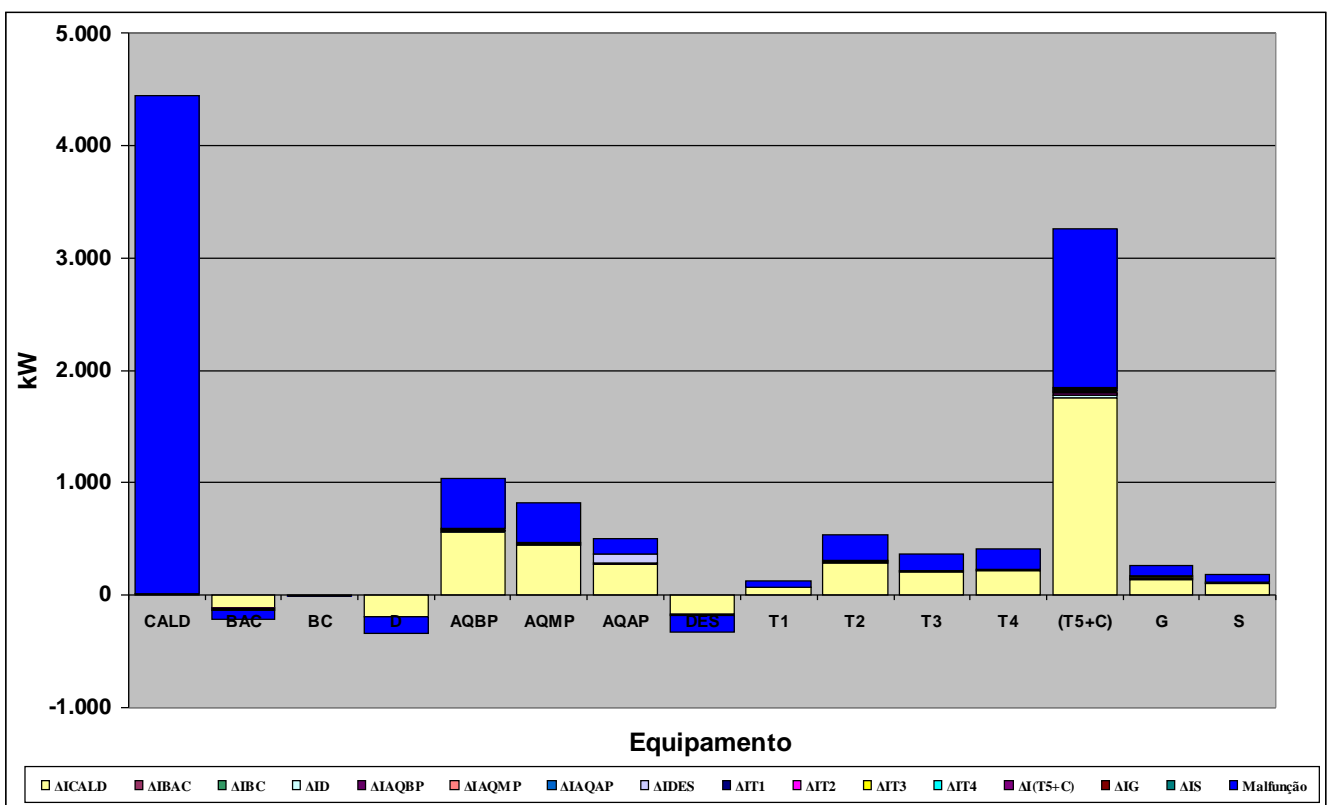


Figura 4.2: Análise do consumo adicional de combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E)

4.3.2 Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo E&S

Na Tabela 4.25 é apresentada a tabela do consumo exerético unitário dos equipamentos tanto na condição de referência quanto na condição de testes para o sistema térmico do estudo de caso utilizando o modelo E&S.

Tabela 4.1: Tabela do consumo exerético unitário nas condições de referência e teste para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

Equipamento	Ki na condição de referência	Ki na condição de teste	ΔKi
CALD	3,166	3,213	0,047
BAC	1,698	1,705	0,007
BC	3,372	5,677	2,305
D	1,158	1,196	0,038
AQBP	1,200	1,047	-0,153
AQMP	1,166	1,191	0,025
AQAP	1,115	1,111	-0,004
DES	2,101	2,091	-0,010
T1	1,679	1,691	0,012
T2	1,391	1,429	0,038
T3	1,359	1,374	0,015
T4	1,377	1,409	0,032
T5	1,447	1,221	-0,226
C	0,036	0,045	0,008
G	1,072	1,074	0,003
S	1,036	1,038	0,002
JE/BE	1,000	1,000	0,000
JW/BW	1,000	1,000	0,000
JV/BV	1,000	1,000	0,000
JS/BS	1,000	1,000	0,000

Na Tabela 4.26 é apresentada a matriz do consumo adicional do combustível do sistema térmico do estudo de caso utilizando o modelo E&S. Estes resultados são apresentados na Figura 4.9 de forma gráfica e na Figura 4.10 é apresentado o gráfico da análise do consumo de combustível para este Diagnóstico Termoeconômico.

As demais tabelas e dados das etapas da realização do Diagnóstico Termoeconômico do modelo E&S, são apresentados no Apêndice B.

Tabela 4.2: Matriz do consumo adicional do combustível (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	CALD	BAC	BC	D	AORP	AQMP	AQAP	DES	T1	T2	T3	T4	T5	C	G	S	JE/BE	JW/BW	JV/BV	JS/BS	DF	Malfunção	Total
ΔI_{CALD}	-82,5	-166,1	58,4	102,9	-216,2	568,7	286,1	-108,2	148,4	641,4	442,5	476,9	-228,8	2.362,3	267,3	186,0	764,7	143,7	0,0	727,8	6.375,4	4.132,6	10.508,0
ΔI_{BAC}	-0,4	-0,6	0,3	0,4	-1,0	2,3	2,0	2,8	0,6	2,6	1,8	1,9	-1,2	9,5	1,1	0,8	41,8	0,6	0,0	2,3	67,7	7,0	74,7
ΔI_{BC}	-0,3	-0,5	0,2	0,3	-0,7	1,7	0,9	-0,3	0,5	2,0	1,4	1,5	-0,7	7,2	0,8	0,6	94,3	0,4	0,0	2,2	111,5	244,7	356,2
ΔI_D	-4,1	-0,7	3,3	4,3	-21,0	4,6	2,2	-0,3	1,8	8,0	5,5	5,7	-45,4	19,8	2,4	1,7	71,9	1,8	0,0	181,1	242,7	307,5	550,2
ΔI_{AORP}	-1,3	-0,1	1,1	1,4	-6,9	1,2	0,6	0,0	0,5	2,3	1,6	1,6	-15,0	5,2	0,7	0,5	-7,4	0,5	0,0	21,1	7,4	-1.569,2	-1.561,8
ΔI_{AQMP}	-4,1	-0,6	3,3	4,3	-21,3	4,4	2,1	-0,2	1,8	7,8	5,4	5,5	-46,0	18,8	2,3	1,6	-25,4	1,7	0,0	50,9	12,2	221,2	233,4
ΔI_{AQAP}	-2,4	0,5	1,9	2,5	-11,9	3,2	16,3	7,3	1,2	5,2	3,6	3,7	-25,4	13,8	1,7	1,2	-54,3	1,2	0,0	-49,3	-80,1	-46,7	-126,9
ΔI_{DES}	-4,3	9,4	3,4	4,5	-21,9	4,8	137,6	7,1	1,9	8,3	5,7	5,9	-47,2	20,6	2,5	1,8	-50,5	1,9	0,0	-94,0	-2,5	-17,8	-20,3
ΔI_{T1}	0,2	-6,7	-0,5	0,2	-0,7	0,6	0,4	0,4	0,2	0,8	0,5	0,6	-1,3	4,5	8,2	5,7	8,3	-28,7	0,0	0,6	-6,6	107,1	100,5
ΔI_{T2}	0,2	-5,7	-0,4	0,2	-0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,6	0,4	0,5	-1,1	3,8	7,0	4,9	7,1	-75,9	0,0	0,5	-57,1	464,2	407,1
ΔI_{T3}	0,3	-8,6	-0,6	0,3	-0,9	0,8	0,6	0,5	0,2	1,0	0,7	0,7	-1,7	5,8	10,6	7,3	10,7	-412,4	0,0	0,8	-384,1	320,5	-63,6
ΔI_{T4}	0,2	-5,3	-0,4	0,2	-0,6	0,5	0,3	0,3	0,1	0,6	0,4	0,4	-1,1	3,6	6,6	4,6	6,7	715,6	0,0	0,5	733,3	324,6	1.057,8
ΔI_{T5}	0,1	-3,6	-0,3	0,1	-0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,3	0,3	-0,7	2,4	4,4	3,1	4,4	-93,8	0,0	0,3	-82,0	-3.442,7	-3.524,7
ΔI_C	318,6	25,1	-257,3	-329,0	1.663,4	-261,8	-124,9	2,5	-120,3	-521,4	-359,9	-366,0	3.636,7	-1.139,4	-144,8	-100,7	-134,5	-116,8	0,0	-137,0	1.532,3	957,8	2.490,1
ΔI_G	0,2	-5,2	-0,4	0,2	-0,6	0,5	0,3	0,3	0,1	0,6	0,4	0,4	-1,0	3,5	0,2	0,2	6,5	0,1	0,0	0,5	6,8	89,1	96,0
ΔI_S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	62,0	62,0
$\Delta I_{JE/BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JW/BW}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JV/BV}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JS/BS}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	220,3	-168,6	-187,9	-207,3	1.358,8	332,4	325,2	-87,5	37,3	160,0	110,3	139,7	3.220,0	1.341,5	171,1	119,0	744,4	139,9	0,0	708,4	8.477,0		
Malfunção	4.132,6	7,0	244,7	307,5	-1.569,2	221,2	-46,7	-17,8	107,1	464,2	320,5	324,6	-3.442,7	957,8	89,1	62,0	0,0	0,0	0,0	0,0		2.161,9	
Consumo adicional de combustíveis	4.352,9	-161,6	56,8	100,2	-210,4	553,6	278,5	-105,3	144,4	624,3	430,7	464,2	-222,7	2.299,3	260,2	181,0	744,4	139,9	0,0	708,4			10.638,9

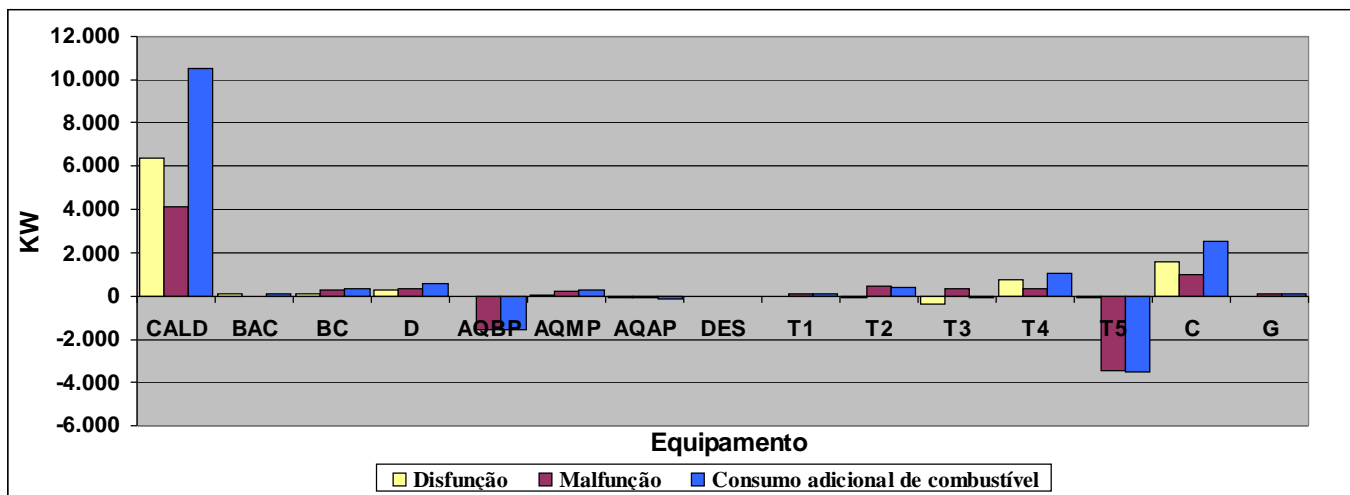


Figura 4.3: Aumento do consumo do combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

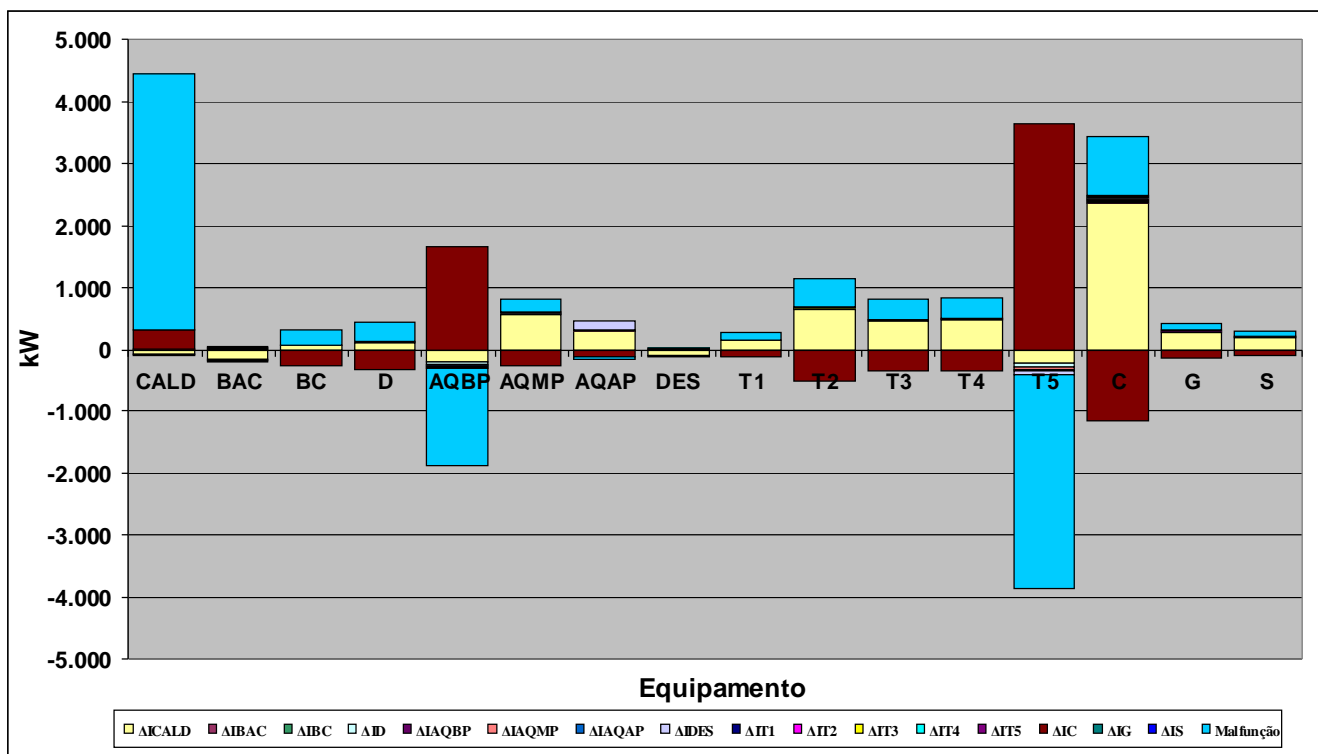


Figura 4.4: Análise do consumo adicional de combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

4.3.3 Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo H&S

Na Tabela 4.27 é apresentada a tabela do consumo exerético unitário dos equipamentos tanto na condição de referência quanto na condição de testes para o sistema térmico do estudo de caso utilizando o modelo E&S. Da mesma forma que nos modelos H&S e E, é importante destacar que as bifurcações e junções não podem apresentar números diferentes da unidade. Entretanto, pequenas variações são constatadas em função de aproximações durante as contas dos fluxos de trabalho.

Tabela 4.3: Tabela do consumo exerético unitário nas condições de referência e teste para o sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

Equipamento	Ki na condição de referência	Ki na condição de teste	ΔKi
CALD	1,540	1,566	0,026
BAC	1,078	1,035	-0,043
BC	1,037	1,011	-0,026
D	1,105	1,097	-0,009
AQBP	1,037	1,055	0,018
AQMP	1,008	1,027	0,019
AQAP	1,003	1,010	0,007
DES	1,228	1,190	-0,038
T1	1,339	1,345	0,006
T2	1,196	1,215	0,019
T3	1,180	1,187	0,007
T4	1,187	1,205	0,017
T5	1,084	1,110	0,026
C	1,036	1,045	0,008
G	1,072	1,074	0,003
S	1,036	1,038	0,002
JE/BE	1,000	1,000	0,000
JW/BW	1,000	1,000	0,000
JV/BV	1,000	1,000	0,000
JS/BS	1,000	1,000	0,000

Na Tabela 4.28 é apresentada a matriz do consumo adicional do combustível do sistema térmico do estudo de caso utilizando o modelo H&S. Estes resultados são apresentados na Figura 4.11 de forma gráfica e na Figura 4.12 é apresentado o gráfico da análise do consumo de combustível para este Diagnóstico Termoeconômico.

As demais tabelas e dados das etapas da realização do Diagnóstico Termoeconômico do modelo H&S, são apresentados no Apêndice B.

Tabela 4.4: Matriz do consumo adicional do combustível (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	CALD	BAC	BC	D	AQBP	AQMP	AQAP	DES	T1	T2	T3	T4	T5	C	G	S	JE/BE	JW/BW	JV/BV	JS/BS	DF	Malfunção	Total
ΔI_{CALD}	-194,9	-132,6	-29,7	-146,6	430,0	434,3	262,8	-165,1	73,6	318,0	219,4	238,8	252,8	1.254,2	140,3	97,6	-28,3	71,3	0,0	76,7	3.172,5	4.609,8	7.782,3
ΔI_{BAC}	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,8	0,1	0,1	5,7	0,0	0,0	0,0	8,3	-70,8	-62,6
ΔI_{BC}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	4,2	-9,1	-4,9
ΔI_D	-3,6	-1,8	-0,3	-1,2	1,5	6,2	3,8	-2,3	1,3	5,8	4,0	4,2	-15,9	18,1	2,1	1,5	129,3	1,3	0,0	85,2	239,4	-121,9	117,5
ΔI_{AQBP}	-2,5	-1,2	-0,2	-0,7	0,4	4,2	2,6	-1,5	0,9	4,0	2,8	2,9	-13,2	12,2	1,4	1,0	-114,1	0,9	0,0	22,1	-77,8	379,3	301,5
ΔI_{AQMP}	-1,1	-0,6	-0,1	-0,4	0,5	1,9	1,2	-0,7	0,4	1,7	1,2	1,3	-4,7	5,5	0,6	0,4	-10,9	0,4	0,0	6,2	3,0	334,1	337,2
ΔI_{AQAP}	-0,4	-0,2	0,0	-0,2	0,3	0,7	2,1	0,0	0,1	0,6	0,4	0,5	-1,3	2,1	0,2	0,2	-14,2	0,1	0,0	-4,2	-13,0	136,1	123,1
ΔI_{DES}	-1,5	0,8	-0,1	-0,5	0,6	2,7	64,7	0,0	0,6	2,5	1,7	1,8	-7,2	7,8	0,9	0,6	-43,6	0,6	0,0	-21,7	10,7	-132,2	-121,5
ΔI_{T1}	0,0	-5,7	-2,6	-0,1	0,3	0,5	0,4	0,3	0,1	0,4	0,2	0,3	-0,2	2,3	4,1	2,9	8,1	-14,4	0,0	0,0	-3,3	53,7	50,4
ΔI_{T2}	0,0	-4,8	-2,2	-0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	-0,2	1,9	3,5	2,4	6,9	-38,0	0,0	0,0	-28,6	232,0	203,5
ΔI_{T3}	0,0	-7,3	-3,3	-0,2	0,4	0,6	0,5	0,3	0,1	0,5	0,3	0,3	-0,3	2,9	5,3	3,7	10,4	-206,2	0,0	0,0	-192,0	160,1	-31,9
ΔI_{T4}	0,0	-4,6	-2,1	-0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	-0,2	1,8	3,3	2,3	6,5	357,8	0,0	0,0	366,6	175,6	542,2
ΔI_{T5}	0,0	-3,0	-1,4	-0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	-0,1	1,2	2,2	1,5	4,3	-46,9	0,0	0,0	-41,0	398,9	357,9
ΔI_C	-14,2	-5,2	0,0	0,4	-17,3	18,5	11,7	-6,3	5,3	22,8	15,8	16,2	-139,3	54,4	6,8	4,7	-29,1	5,1	0,0	-21,9	-71,6	957,8	886,2
ΔI_G	0,0	-8,8	-4,0	-0,2	0,5	0,7	0,6	0,4	0,1	0,6	0,4	0,4	-0,4	3,5	0,2	0,2	12,6	0,1	0,0	-0,1	6,8	89,1	96,0
ΔI_S	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	62,0	62,0
$\Delta I_{JE/BE}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JW/BW}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JV/BV}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta I_{JS/BS}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DI	-218,2	-175,2	-46,0	-150,1	418,4	471,6	351,5	-174,0	82,8	357,9	247,0	267,4	70,1	1.369,0	171,1	119,0	-52,5	132,2	0,0	142,2	3.384,4		
Malfunção	4.609,8	-70,8	-9,1	-121,9	379,3	334,1	136,1	-132,2	53,7	232,0	160,1	175,6	398,9	957,8	89,1	62,0	0,0	0,0	0,0	0,0		7.254,5	
Consumo adicional de combustível	4.391,6	-246,1	-55,0	-272,0	797,7	805,7	487,6	-306,2	136,5	590,0	407,1	443,0	469,0	2.326,8	260,2	181,0	-52,5	132,2	0,0	142,2			10.638,9

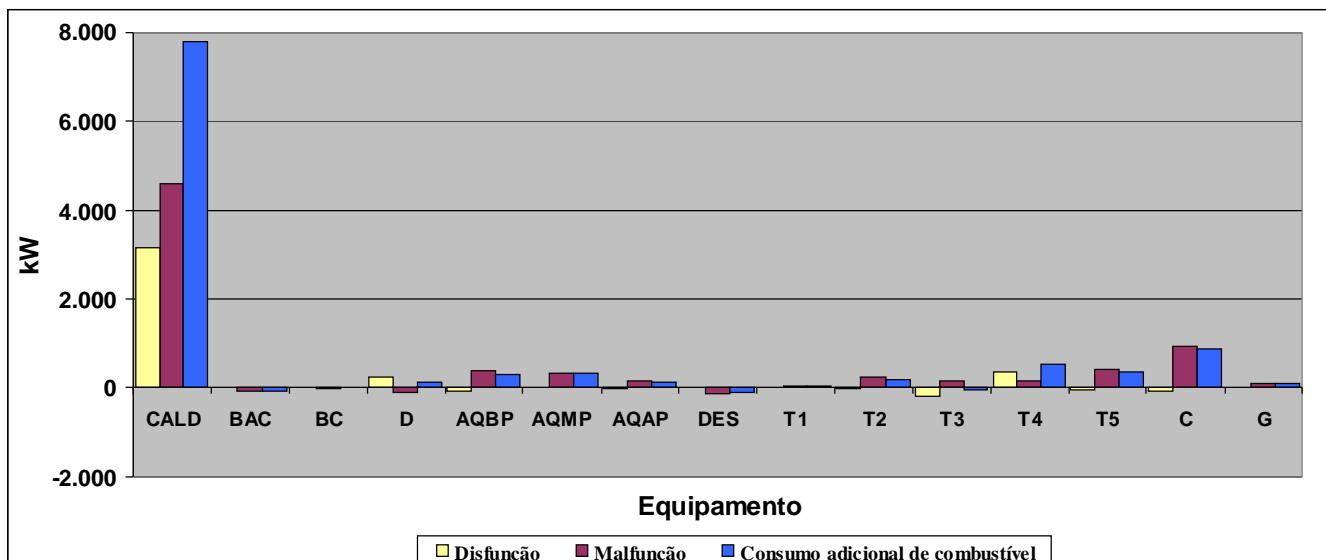


Figura 4.5: Aumento do consumo do combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

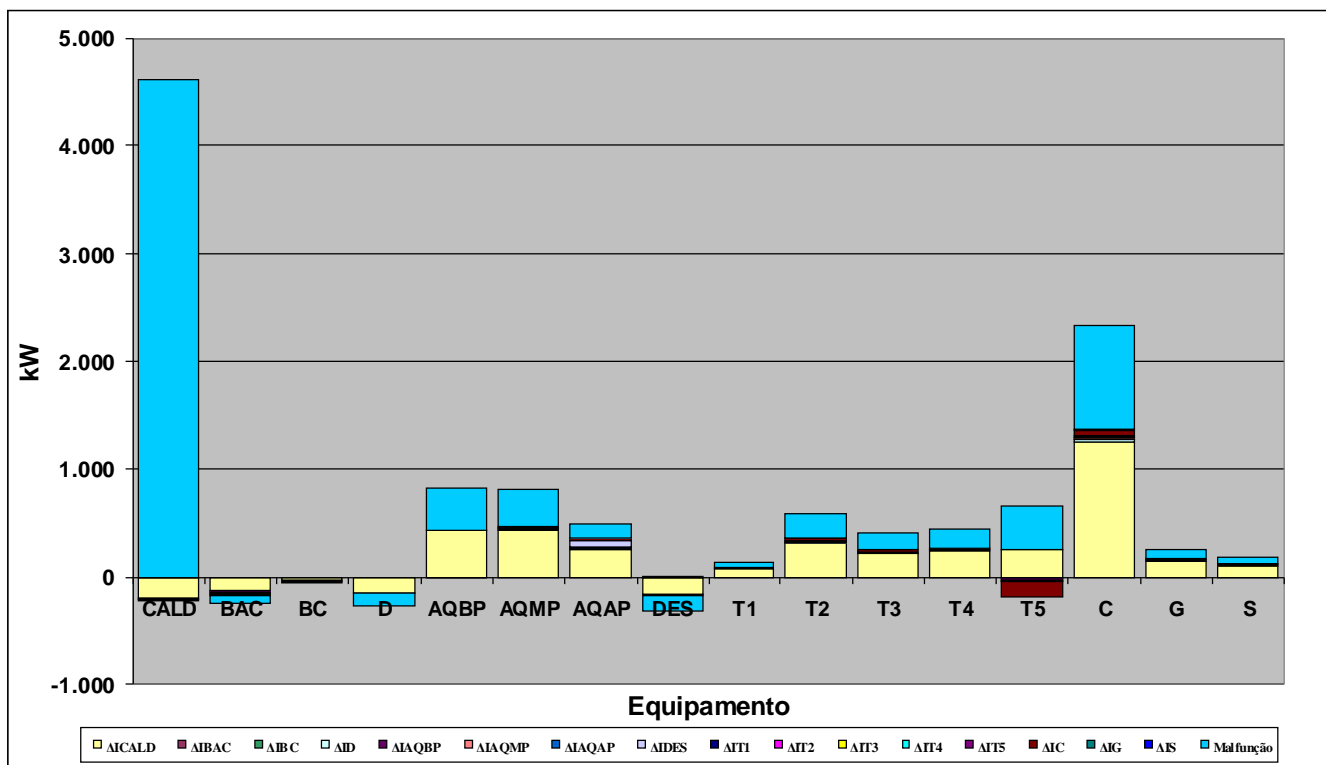


Figura 4.6: Análise do consumo adicional de combustível do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados da aplicação da metodologia de Diagnóstico Termoeconômico no sistema térmico do estudo de caso são analisados de acordo com referências na literatura, aspectos da Termoeconomia e de acordo com os dados obtidos nos Diagnósticos Termoeconômicos utilizando os três diferentes modelos Termoeconômicos (Modelo E, E&S e H&S).

Através dos resultados obtidos com a realização do Diagnóstico Termoeconômico e apresentados no capítulo 4, é possível verificar os equipamentos que tiveram aumento do consumo exergético unitário e que conseqüentemente contribuíram para o aumento do consumo adicional do combustível.

É importante destacar que a estrutura física adotada para a realização deste Diagnóstico representa uma simplificação da planta e que não estão representados todos os equipamentos do sistema térmico, exatamente para simplificar a análise de um sistema térmico real e complexo como o analisado no estudo de caso desta dissertação para alcançar o objetivo principal que é a realização do Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo H&S e analisar a vantagens em sua utilização. Um exemplo disso, é que a Caldeira foi representada como sendo um único equipamento quando na verdade trata-se de vários equipamentos (Fornalha, Super aquecedor primário e secundário, banco de tubos, tubulão de vapor, economizador, pré-aquecedor de ar regenerativo, pré-aquecedor de ar a vapor, chaminé, etc.).

A fim de realizar uma comparação entre os resultados dos Diagnósticos Termoeconômicos encontrados nos diferentes modelos (E, E&S e H&S), são apresentados na Tabela 5.1 os dados de consumo exergéticos unitários para a condição de referência e condição de testes e consumo adicional de combustível para cada equipamento do sistema térmico do estudo de caso para cada modelo Termoeconômico (E, E&S e H&S).

Tabela 5.1: Comparação do consumo exergético unitário e do consumo adicional dos equipamentos entre os modelos E, E&S e H&S

EQUIPAMENTO	CONSUMO EXERGÉTICO UNITÁRIO [kW]						CONSUMO ADICIONAL DE INSUMOS [kW]		
	CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA			CONDIÇÃO DE TESTE			E	E&S	H&S
	E	E&S	H&S	E	E&S	H&S			
C	2,110	3,166	1,540	2,161	3,2132	1,5659	7.782,3	10.508,0	7.782,3
BAC	1,123	1,698	1,078	1,058	1,7047	1,0354	-62,6	74,7	-62,6
BC	1,121	3,372	1,037	1,062	5,6772	1,0110	-4,9	356,2	-4,9
D	1,705	1,158	1,105	1,631	1,1961	1,0965	117,5	550,2	117,5
AQBP	1,685	1,200	1,037	2,091	1,0469	1,0553	301,5	-1.561,8	301,5
AQMP	1,068	1,166	1,008	1,240	1,1908	1,0275	337,2	233,4	337,2
AQAP	1,014	1,115	1,003	1,046	1,1113	1,0095	123,1	-126,9	123,1
DES	1,759	2,101	1,228	1,620	2,0910	1,1903	-121,5	-20,3	-121,5
T1	1,339	1,679	1,339	1,345	1,6909	1,3454	50,4	100,5	50,4
T2	1,196	1,391	1,196	1,215	1,4292	1,2146	203,5	407,1	203,5
T3	1,180	1,359	1,180	1,187	1,3740	1,1870	-31,9	-63,6	-31,9
T4	1,187	1,377	1,187	1,205	1,4094	1,2047	542,2	1.057,8	542,2
T5	1,357	1,447	1,084	1,450	1,2207	1,1104	1.244,1	-3.524,7	357,9
C	-	0,036	1,036	-	0,0446	1,0446	-	2.490,1	886,2
G	1,072	1,072	1,072	1,074	1,0741	1,0741	96,0	96,0	96,0
S	1,036	1,036	1,036	1,038	1,0382	1,0382	62,0	62,0	62,0

Como já foi abordado nesta dissertação e é constatado nos resultados apresentados na Tabela 5.1, a ideia de juntar o condensador à turbina a vapor, formando uma única unidade produtiva, considerando assim que a função do condensador é um equipamento auxiliar da turbina se faz necessário no modelo E, pois de forma contrária, o condensador não poderia ser tratado de forma independente em função da inexistência de produto para tal equipamento quando tratado em termos de exergia total. Portanto, com a utilização do modelo E na realização de Diagnóstico Termoeconômicos de sistemas térmicos, verifica-se dificuldade no tratamento dos equipamentos dissipativos em função da não definição de produtos para estes equipamentos.

De forma similar, os resultados obtidos no Diagnóstico Termoeconômico utilizando o modelo E&S, reforçam e evidenciam a falha do modelo E&S, pois considera, de forma implícita, o fluxo de neguentropia duas vezes nas estruturas produtivas do sistema térmico. Quando a neguentropia é utilizada como fluxo fictício os equipamentos que aumentam a entropia do fluido (consomem neguentropia) são penalizados por consumirem o mesmo fluxo duas vezes, tendo aumentado seus consumos exergéticos. O resultado deste aumento pode ser verificado na Tabela 5.1 comparando-se os valores de consumo exergético dos equipamentos entre os modelos E&S e H&S tanto para a condição de referência quanto para a condição de teste. Verifica-se que para os equipamentos que aumentam a entropia do fluido de trabalho, ocorre significativo aumento nos seus consumos exergéticos unitários.

Por outro lado, ainda pelo modelo E&S, os equipamentos que diminuem a entropia do fluido (produzem neguentropia), em especial o condensador, que é o equipamento responsável por anular toda a entropia do fluido de trabalho aumentada pelos equipamentos no sistema térmico, apresenta arbitrariedade em relação à segunda lei da termodinâmica, pois considera que o seu produto é maior que o insumo. Este fato pode ser verificado nos resultados dos consumos exergéticos unitários do condensador (condição de referência e de teste) menores do que um. Este resultado de consumos exergéticos menores do que a unidade fica evidente nos resultados de consumo adicional de combustível encontradas do condensador para o modelo E&S e apresentados na Tabela 5.1.

Desta forma, em função das limitações dos modelos E e E&S no tratamento de equipamentos dissipativos no desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos, principalmente para sistemas térmicos reais e complexos como é a planta de Cogeração do nosso estudo de caso, constata-se que a utilização do modelo H&S apresenta grandes vantagens quando aplicado para o desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos em função de apresentar resultados coerentes para futuras tomadas de decisões a fim de restabelecer a condição de operação da planta sem anomalias.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho foi possível aplicar a metodologia de Diagnóstico Termoeconômico em uma Central de Cogeração do Setor Siderúrgico utilizando o Modelo H&S e avaliar os efeitos das malfunções presentes no sistema térmico e apresentar como resultado a quantificação desses efeitos. Para realização do Diagnóstico Termoeconômico e quantificação desses efeitos foi necessário ter como base a estrutura produtiva do sistema térmico, onde cada componente ou subsistema foi definido de acordo com a função desempenhada no ciclo (produto) e de acordo com os recursos que consomem (insumos) para que possam exercer suas funções.

Desta forma, é necessário reforçar a importância do Diagnóstico Termoeconômico como uma boa ferramenta de análise de quantificação das degradações existentes no sistema térmico. Adicionalmente, foi possível aplicar e constatar as vantagens do modelo Termodinâmico H&S em uma planta real e de maior complexidade e verificar sua aplicabilidade no desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos. Foi possível também, verificar a robustez e vantagens do modelo H&S no desenvolvimento de Diagnósticos Termoeconômicos quando comparados aos modelos E e E&S.

Adicionalmente, o Diagnóstico Termoeconômico realizado permite observar o comportamento da planta em outros aspectos da análise Termoeconômica, como a variação da destruição das exergias, variação nos recursos adicionais de insumos e variação no produto para os equipamentos do sistema térmico.

Porém, esta metodologia de realização do Diagnóstico Termoeconômico por se basear na análise de dois pontos da operação da planta, ou seja, na comparação entre a condição de referência e a condição de teste, limita a abrangência da análise para avaliação do comportamento dos equipamentos fora destes dois pontos de operação. Assim, não é possível diferenciar as malfunções induzidas das malfunções intrínsecas dos equipamentos, pois nas

condições de teste, as condições físicas dos insumos e produtos são normalmente diferentes das condições de referência, o que obviamente resulta em desempenhos diferentes dos equipamentos mesmo que os mesmos estejam isentos de anomalias intrínsecas.

Outro fator importante a ser destacado e que implica na diminuição da precisão e acurácia do Diagnóstico Termoeconômico, são as simplificações matemáticas realizadas na consideração de que o desempenho dos equipamentos é linear e não considera a curva de desempenho de cada equipamento de forma individual, ou seja, não utiliza equações para as curvas de desempenho dos equipamentos.

Também é importante destacar que a instrumentação da planta também acarretou em menor precisão dos resultados do Diagnóstico, haja vista que a instrumentação disponível na unidade não supriu todos dados necessários para sua realização de acordo com a estrutura produtiva da análise, sendo necessário o cálculo dos dados não disponíveis no programa *thermoflex*[®] buscando sempre a convergência do modelo com os dados já conhecidos e disponíveis.

Sendo assim, tendo em vista as limitações apresentadas, as seguintes sugestões para trabalhos futuros são propostas:

- 1) Realização do estudo do comportamento dos equipamentos fora dos pontos de operação adotados como a condição de referência e condição de teste do sistema térmico para que seja possível a diferenciação entre as malfunções intrínsecas e malfunções induzidas. A implementação de curvas de desempenho individuais para cada equipamento serão uma ferramenta importante para diferenciação entre malfunções intrínsecas e induzidas.
- 2) Realizar estudo para melhora na instrumentação da planta de modo que se possibilite a obtenção no sistema supervisorio de todos os dados necessários para a realização do Diagnóstico Termoeconômico com resultados mais precisos e com possibilidade ainda a atualização de testes de desempenhos dos equipamentos principais e periféricos da unidade.
- 3) Desenvolvimento de um programa de monitoramento online de desempenho da unidade com apresentação dos resultados do Diagnóstico Termoeconômico realizado para servir de base na tomada de decisão no planejamento das manutenções nos equipamentos a fim de eliminar as malfunções detectadas, aumentando assim a eficiência do ciclo.

REFERÊNCIAS

Arranz, A., Cruz, A., Sanz-Bobi, M. A., Ruíz, P., Coutinho, J. (2008). *DADICC: Intelligent system for anomaly detection in a combined cycle gas turbine plant*. Expert Systems with Applications, vol 34, pp 2267 - 2277.

Arrieta, F. R. P. (2006), *Simulação do Esquema térmico de centrais termelétricas para estudos paramétricos, monitoração e Diagnóstico preliminar do desempenho*. Tese de doutorado, IEM, UNIFEI.

Balestieri, J. A. P. (2002). *Cogeração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor*. Florianópolis: UFSC.

Barelli, L., Bidini, G., Bonucci, F. (2009a). *Development of the regulation mapping of 1 MW internal combustion engine for diagnostic scopes*. Applied Energy, n. 86, pp 1087 - 1104.

Barelli, L., Bidini, G., Bonucci, F. (2009b). *Diagnosis methodology for the turbocharger groups installed on a 1 MW internal combustion engine*. Applied Energy, n. 86, pp 2721 - 2730.

Barelli, L., Barluzzi, E., Bidini, G. (2011). *Modeling of a 1 MW cogenerative internal combustion engine for diagnostic scopes*. Applied Energy, n. 88, pp 2702 - 2712.

Barelli, L., Bidini, G., Bonucci, F. (2013). *Diagnosis of a turbocharging system of 1 MW internal combustion engine*. Energy Conversion and Management, n. 68, pp 28 - 39.

Barja, G. J. A. (2006). *A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico*. Dissertação de Mestrado: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Barreda del Campo, E. R., Cerqueira, S. A. A. G. e Nebra, S. A. (1998). *Thermoeconomic analysis of the cogeneration system of a cuban sugar mill*. Energy Conversion & Management. v. 39, n. 16-18, p. 1773-1780.

Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M. (1996). *Thermal Design & Optimization*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Belisario, I. C. (2012). *Análise Termoeconômica de uma Central de Cogeração de uma Indústria Siderúrgica*. Dissertação (Mestrado em Termofluidos) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.

- Cafaro, S., Napoli, L., Traverso, A., Massardo, A. F. (2010). *Monitoring of the thermoeconomic performance in an actual combined cycle power plant bottoming cycle*. Energy, n. 35, pp 902 - 910.
- Cai Z., Sun, S., Si, S., Yonnou, B. (2011). “*Identifying product Failure Rate Based on a Conditional Bayesian Network Classifier*”. Expert Systems with Applications, Vol. 38, pp. 5036–5043, 2011.
- Capra, B., Le, D., Wolff, J. (2006). “*Reinforced Concrete Corrosion: Application of Bayesian Networks to the Risk Management of a Cooling Tower*”. Journal. Physics and Sciences, Vol. 136, pp. 213–222, 2006.
- Carvalho, F. R. e Horta Nogueira, L. (1996). *Thermoeconomic studies applied to maintenance of power plants*. In Efficiency, costs, Optimization, simulation and environmental Aspects of energy Systems (ECOS'96). Stockholm, Sweden. p. 91-91.
- Celik, M. B., Bayir, R. (2007). *Fault detection in internal combustion engines using fuzzy logic*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D – Journal of Automobile Engineering, 221(D5), 579–587.
- Cerqueira, S. A. A. D. G. (1999) *Metodologias de análise termoeconômica de sistemas*. Tese de Doutorado: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Chávez, V., Zaleta, A., Verda, V., Ledesma, E., Pacheco, I., Rangel, V., Garcia, O. (2006). *SIX SIGMA methodology applied to the thermoeconomic diagnosis of a power plant*. ECOS. Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, Mexico. Department of Energy Engineering, Politecnico di Torino, Italy. pp 775-782.
- Correas, L.C. (2004). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Suitability to real-time monitoring*. Int J Thermodyn;7(2). pp. 85–94.
- Denève, S., Duhamel, J., Pouget, A. (2007). *Optimal Sensorimotor Integration in Recurrent Cortical Networks: A Neural Implementation of Kalman Filters*. The Journal of Neuroscience, Vol. 27(21), pp. 5744–5756.
- Donatelli, J. L. M. (1993). *Análise termodinâmica aplicada a central termelétrica da CIA Siderúrgica de Tubarão - CST*. Dissertação de Mestrado: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, MG.
- El-Sayed, Y.M., Evans, R.B. (1970). *Thermoeconomics and the design of heat systems*. Journal of Engineering for Power. v. 92, n. 1, p.27-35.
- Escobar, P.J.C. (2010). *Análise Termoeconômica Integrada das Plantas de Cogeração e Etanol em uma Destilaria Autônoma*. Tese de Doutorado: Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.
- Faria, P. R. (2014). *Uma Avaliação das Metodologias de Desagregação da Exergia Física para a Modelagem Termoeconômica de Sistemas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES.

Fast, M., Palmè, T. (2010). *Application of artificial neural networks to the condition monitoring and diagnosis of a combined heat and power plant*. Energy, n. 35, pp 1114 - 1120.

Frangopoulos, C. A. (1983). *Thermoeconomic Functional Analysis: A Method for Optimal Design or Improvement of Complex Thermal Systems*. Tese de Doutorado, Institute of Technology, Atlanta, USA.

Frangopoulos, C. A. (1987). *Thermo-Economic Functional Analysis and Optimization*. Energy Vol. 12, No. 7, pp. 563-571.

Frangopoulos, C. A., Lyegeros, A.I., Markou, C.T. e Kaloritis, P. (1996). *Thermoeconomic operation optimization of the Hellenic Aspropyrgos refinery combined-cycle cogeneration system*. Applied Therma Engineering, , v. 16, n. 12, p. 949-958.

Gallo, W. L. R. (1997). *A comparison between the HAT cycle and other gas-turbne based cycles: Efficiency, specific power and water consumption*. Energy Conversion & Management, v. 38, n. 15-17, p. 1595-1604.

Gallo, W. L. R., Llagostera, J. e Walter, A. C. S. (1997). *HAT cycle exergetic analisys and thermoeconomic evaluation of fuel costs*. In ME'97: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAN'97), p. 231-238.

Guarinelo Júnior, F. F. (1997). *Avaliação termoeconomica de um sistema de cogeração proposto para um pólo industrial*. Dissertação de Mestrado: Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

Guarinelo, F., Cerqueira, S. A. .d. G e Nebra, S. A (1998). *Thermoeconomic Evaluation of a gas turbine cogeneration system*. In International Mechanical Engineering Congress & Exposition, CA, USA.

Krause, A.; Tsatsaronis, G. (1997). *Thermoeconomic and exergoeconomic evaluation of the humid-air turbine cycle*. TIES 97 - Thermodynamic analysis and improvement of energy systems, Beijing, China.

Lourenço, A. B. (2012), *Uma Nova Abordagem Termoeconômica para o Tratamento de Equipamentos Dissipativos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo.

Lozano, M. A. e Valero, A. (1986). *Determinación de la Exergia para Sustancias de Interes Industrial*. Departamento de Termodinámica y Fisicoquímica. ETSII. Universidad de Zaragoza.

Lozano, M. e Valero, A. (1993). *Thermoeconomic Analysis of a Gas Turbine Cogeneration System*. ASME Book no. H00874, WAM 1993, AES, vol. 30, p. 312-20.

Lozano, M. A., Valero, A. e Serra, L. (1993). *Theory of Exergetic Cost and Thermoeconomic Optimization*. Energy Systems and Ecology. Eds. J. Szargut, Z. Kolenda, G. Tsatsaronis and A. Ziebig. Vol. 1, pp. 339-350. July 5-9, Cracow, Poland.

- Lozano, M. A., Valero, A. e Serra, L. (1996). *Local Optimization of Energy Systems. Energy Systems Division*. Eds. A.B. Duncan, J. Fiszdon, D. O'Neal and K. Den Braven, ASME Book No. G0122, pp. 241-250. Atlanta.
- Lazzaretto, A., Toffolo, A., Reini, M., Taccani, R., Zaleta, A., Rangel, V., Verda, V. (2006), *Four approaches compared on the TADEUS (Thermoeconomic approach to the diagnosis of energy utility systems) test case*. Energy. pp 1586-1613.
- Luz Silveira, J. e Horta Nogueira, L. (1992). *Thermoeconomic functional analysis applied in cogeneration systems associated to cellulose plants*. In International Symposium on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation os Energy Systems (ECOS'92), p. 381-390. zaragoza, Spain.
- Mendes, T. (2012). *Diagnóstico Termodinâmico Aplicado a um Sistema de Refrigeração por Compressão de Vapor. Dissertação de Mestrado*, IEM, UNIFEI, pp 204.
- Ministério das Minas e Energia. (2011). *Balanço Energético Nacional 2011: ano base 2010*. Brasília, DF.
- Nerger, L., Hiller, W., Schroter, J. (2005). “*A comparison of Error Subspace Kalman Filters*”. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Vol.57A, pp.715–735, 2005.
- Ogaji, S. O. T., Marinai, L., Sampath, S., Singh, R., Prober, S. D. (2005a). *Gas-turbine fault diagnostics: a fuzzy-logic approach*. Applied Energy, n. 82, pp 81-89.
- Ogaji, S. O. T., Sampath, S., Marinai, L., Singh, R., Prober, S. D. (2005b). *Evolution strategy for gas-turbine fault-diagnoses*. Applied Energy, n.81, pp 222-230.
- Orozco, D. J. R. (2013). *Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Monitoração e Diagnóstico de Centrais Termelétricas de Ciclo Combinado Utilizando o Método Termoeconômico*. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- Ibarra, J. J. P.; Hernández, V. H. R., Zaleta, A., Valero, A. (2010). *Hybrid Fuel Impact Reconciliation Method: An integral tool for thermoeconomic diagnosis*. Energy, n. 35, pp 2079-2087.
- Plano Nacional de Energia 2030. (2006), Ministério das Minas e energia - MME/EPE.
- Pousa, A. C. (2009). *Análise termo-exergoeconômica e financeira de um sistema de cogeração, eletricidade e água gelada, aplicado a um centro comercial*. Dissertação de Mestrado - Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- Reini, M., Taccani, R. (2004). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. The role of the fuel impact formula*. Int J Thermodyn 7(2), pp 61–72.
- Ribeiro, C. C. (2014). *Desenvolvimento de um Sistema de Informação para Monitoramento e Diagnóstico de Desempenho Termodinâmico de uma Central Termelétrica com Motores de Combustão Interna*. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES.

Robles Vertiola, S. e Oliveira Júnior, S. (1995). *Exergetic and thermoeconomic analysis of the steam cycle of a medium sized sugar and alcohol mill*. In efficiency, costs Optimization, simulation an Environmental Impact of Energy Systems (ECOS'95), p. 231-236, Istanbul, Turkey.

Royo, J., Valero, A., Zaleta, A. (1997). *The dissipation temperature: a tool for the analysis of malfunctions in thermomechanical systems*. Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza, Maria de Luna, Zaragoza Spain. Energy Convers. Vol. 38, n. 15-17, pp 1557-1566.

Sampath, S., Ogaji, S., Singh, R., Prober, D. (2002). *Engine-fault diagnostics: an optimisation procedure*. Applied Energy, n.73, p. 47-70.

Santaló, J. M. G., Lopez, M., Diaz, G. (2007). *Diagnosis of the operation of power plants*. ECOS. Instituto de Investigaciones Electricas, Mechanical System Division, Cuernavaca, Morelos, México.

Santos, J. J. C. S. (2005). *Avaliação Exergoeconômica das Tecnologias para a Produção Combinada de Eletricidade e Água Dessalinizada*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. Brasil.

Santos, J. J. C. S.; do Nascimento, M. A. R.; Lora, E. E. S. (2006). *On the thermoeconomic modeling for cost allocation in a dual-purpose power and desalination plant*. ECOS 2006, Crete, Greece, v. 1, p. 441-448.

Santos, J. J. C. S. et al. (2008a). *On the neguentropy application in thermoeconomics: a fictitious or an exergy component flow*. ECOS 2008, Cracow, Poland, v. 1, p. 253-260.

Santos, J. J. C. S. et al. (2008b). *On the productive structure for the residues cost allocation in a gas turbine cogeneration plant*. ECOS 2008, Cracow, Poland, v. 2, p. 641-648.

Santos, J. J. C. S. (2009). *Aplicação da Neguentropia na Modelagem Termoeconômica de Sistemas*. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Itajubá, Brasil.

Schwarz, P., Lozano, M. A., Von Spakovsky, M. R. e Valero, A. (1997). *Diagnostic analysis of a PFBC power plant using a thermoeconomic methodology*. In TAIES'97 - Thermodynamic analysis and improvement of energy systems. Beijing, China. p. 240-249.

Serra, L. (1994). *Optimización exergoeconômica de Sistemas Térmicos*. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza.

Silva, J. A. M. (2009). *Sistema de Informação para a Monitoração e Diagnóstico de Desempenho de Unidades Termelétricas de Ciclo Combinado*. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Silva, J. A. M., Venturini, O. J, Lora, E. E. S, Nascimento, M. A. R., Santo, J. J. C. (2009a). *Thermoeconomic Daignosis System Using Negetropy as an Exergy Component Flow*. In ECOS 2009 - 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2009, Foz do Iguacu, Paraná, Brazil. Proceeding of ECOS 2009.

Silva, J. A. M., Venturini, O. J, Lora, E. E. S, Nascimento, M. A. R., Santo, J. J. C., Pinho, A. F. (2009b). *Thermodynamic Diagnosis and Prognosis System of s Gas Turbine Combined Cycle*. In ECOS 2009 - 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2009, Foz do Iguacu, Paraná, Brazil. Proceeding of ECOS 2009.

Silva, J. A. M., Venturini, O. J, Lora, E. E. S, Nascimento, M. A. R., Pinho, A. F., Santo, J. J. C. (2011). *Thermodynamic information system for diagnosis and prognosis of power plant operation condition*. Energy, n. 36, pp 4072-4079.

Silva, T. J. e Nebra, S. A. (1996). *Thermoeconomic comparative analysis of different process of cement production*. In Efficiency, costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of energy Systems (ECOS'96). Stockholm, Sweden. p. 119-125.

Tanaka, N. (2009). *CO2 Emissions from Fuel Combustion*. International Energy Agency. Disponível em: < <http://ccsl.iccip.net/co2highlights.pdf> >. Acesso em: 20 nov. 2014.

Tillerson, R. W. (2012). *The Outlook for Energy: A View to 2040*. ExxonMobil. Disponível em: < http://www.exxonmobil.com/Corporate/files/news_pub_eo.pdf >. Acesso em: 21 nov. 2012.

Torres, C., Serra, L., Valero, A. e Lozano, M. A. (1996). *The Productive Structure and Thermoeconomic Theories of System Optimization*. ME'96: International Mechanical Engineering Congress & Exposition (ASME WAN' 96).

Torres, E. A. e Nebra, S. (1997). *Avaliação Termoeconômica de um sistema de cogeração de indústrias petroquímicas*. In XIV congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 97). Bauru, SP, Brasil. p. 24.

Torres, C., Valero, A., Serra, L., Royo, J. (2002). *Structural theory and thermoeconomic diagnosis Part I. On malfunction and dysfunction analysis*. Energy Conversion and Management, p. 1503–1518.

Tsatsatronis, G. et al. (1994). *Exergetic compariosn of 2 KRW-based IGCC power-plants*. Journal of Engeneering for Gas Turbines and Power, v. 116, n. 2, p. 300-306.

Uche, J. (2000). *Análisis termoconómica y simulación de una planta combinada de producción de agua y energía*. Tesis Doctoral: Deapartamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

Usón, S., Correias, L., Valero, A. (2006). *Anamnesis for Improving Thermoeconomic Diagnosis*. The Case of a 3x350 MW coal-fired Power Plant. CIRCE – Centre of Research for Energy Resources and Consumptions, Maria de Luna St. Zaragoza, Spain.

Usón, S., Valero, A., Correas, L., Verda, V. (2007). *Quantitative causality analysis for the diagnosis of energy system*. ECOS. CIRCE - Centre of Research of energy resources and consumptions, University of Zaragoza, Zaragoza, Spain.

Usón, S. (2008). *Comparative analysis of causal diagnosis methods of malfunctions in power cycles*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza, Spain.

Usón, S., Valero, A., Correas, L. (2009). *Quantitative causality analysis for the diagnosis of energy systems*. Int. J. Thermodynamics, Vol 12, n. 1, pp. 9–16. ISSN 1301-9724.

Usón, S. e Valero, A. (2010). *Thermoeconomic Diagnosis of Energy Systems*. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, Espanha. ISBN 978-84-15031-86-4.

Usón, S. e Valero, A. (2011). *Thermoeconomic diagnosis for improving the operation of energy intensive systems: Comparison of methods*. Applied Energy. V. 88, p. 699–711.

Valero, A., Serra, L., Lozano, M. A. (1993). *Structural theory of thermoeconomics*. In AES-Vol30/HTD-vol266, thermodynamics and design, analysis and improvement of energy systems.

Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C. e von Spakovsky, M. R. (1994a). *CGAM problem: definition and conventional solution*. Energy volume 19, n. 3, p. 279-286.

Valero, A., Lozano, M. A. e Bartolome, J. L. (1996). *On-line monitoring of power-plant performance, using exergetic cost techniques*. Applied Thermal engineering, v. 16, n. 12, p. 933-948.

Valero, A., Correas, L., Zaleta, A., Lazzareto, A., Verda, V., Reini, M., Rangel, V. (2004). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part 1: the TADEUS problem*. Energy, v. 29, p. 1875-1887.

Valero, A., Correas, L., Zaleta, A., Lazzareto, A., Verda, V., Reini, M., Rangel, V. (2004a). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part 1: the TADEUS problem*. Energy. Vol. 29. 2004a. p. 1875- 1887.

Valero, A., Correas, L., Zaleta, A., Lazzareto, A., Verda, V., Reini, M., Rangel, V. (2004b). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part 2: malfunction definition and assessment*. Energy. Vol. 29, pp. 1889-1907.

Valero, A., Serra, L. e Uche, J. (2006). *Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part I: Theory*. Journal of Energy Resources Technology. Vol. 128, p. 1-8.

Verda, V., Valero, A., Serra, L., Rangel, V., Zaleta, A., Lazzaretto, A. (2003). *On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 3: approaches to the diagnosis problem*. In: Proceedings of ECOS 2003, Copenhagen, Denmark, June 30–July 2.

Verda, V. (2004). *Thermoeconomic Analysis and Diagnosis of Energy Utility Systems – From Diagnosis to Prognosis*. Int. J. Thermodynamics, v. 7, n. 2, p. 73-83.

Verma, R., Roy, N., Ganguli, R. (2006). *Gas turbine diagnostics using a soft computing approach*. Applied Mathematics and Computation. n.172, p. 1342-1363.

Walter, A. e Llagostera, J. (1995). *Exergetic and thermoeconomic analysis of biomass integrated gasifier/gas turbine power cycles*. In ASME Cogen turbo Power Conference. Vienna, austria. ASME Paper, 95-CTP-14.

Wu, J. D., Huang, C. K., Chang, Y. W., Shiao, Y. J. (2010). *Fault diagnosis for internal combustion engines using intake manifold pressure and artificial neural network*. Expert Systems with Applications, n. 37, pp 949-958.

Zaleta, A., Royo, A., Rangel, V. e Reyes, E. (2004a). *Thermo-characterization of power systems components: a tool to diagnose their malfunctions*. Department of mechanical engineering, university of Guanajuato, Mexico. CIRCE – Department of mechanical engineering, university of Zaragoza, Spain. Research Scientific Institute, University of Guanajuato, Mexico. Energy, n. 29, pp 361-377.

Zaleta, A., Muñoz, G., Rangel, V., Valero, A. (2004b). *A reconciliation method based on a module simulator, an approach to the diagnosis of energy system malfunctions*. Department of mechanical engineering, university of Guanajuato, Mexico. CIRCE – Department of mechanical engineering, university of Zaragoza, Spain. Int. J. Thermodynamics. pp 51-60.

Zaleta, A. A., Dominguéz, R. V., Olivares, A. A., Rangel, V. H., Pacheco, J. J. P., Gallegos, A. M., Belman, J. F. (2010). *Thermoeconomic Diagnosis Theory Based on Thermo-characterization*. Department of Mechanical Engineering, University of Guanajuato, Mexico. Superior Polytechnic Centre, University of Zaragoza, Spain. Int. J. of Thermodynamics. Vol. 13 (N° 4), pp 143-152.

Zhang, L., Xiong, G., Liu, H., Zou, H., Guo W. (2010). *Bearing Fault Diagnosis Using Multi-scale Entropy and Adaptive Neuro-fuzzy Inference*. Expert Systems with Applications, Vol.37, pp. 6077–6085.

APENDICÊ A
RESULTADOS DAS ETAPAS DO DIAGNÓSTICO
TERMOECONÔMICO DO SISTEMA TÉRMICO DO
EXEMPLO

Tabela A.1: Matriz F-P para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		70.000							70.000
P _{GV}						26.672			26.672
P _B						125			125
P _{TV-GE}								20.230	20.230
P _C							40.367,71		40.368
P _{JE&BE}				24.900	1.897				26.797
P _{B_s}		36.728	24	3.615					40.368
P _{B_p}	20000		155		75				20.230
TOTAL	20.000	106.728	179	28.515	1.972	26.797	40.368	20.230	

Tabela A.2: Matriz F-P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		78.688							78.688
P _{GV}						26.672			26.672
P _B						125			125
P _{TV-GE}								20.230	20.230
P _C							40.367,71		40.368
P _{JE&BE}				24.900	1.897				26.797
P _{B_s}		36.728	24	3.615					40.368
P _{B_p}	20000		155		75				20.230
TOTAL	20.000	115.416	179	28.515	1.972	26.797	40.368	20.230	

Tabela A.3: Matriz KP para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P ₀	2,624	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P _{JE&BE}	0,000	0,000	1,231	0,047	0,000	0,000	0,000
P _{B_s}	1,377	0,194	0,179	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	1,244	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL	4,001	1,438	1,410	0,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.4: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P ₀	2,950	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P _{JE&BE}	0,000	0,000	1,231	0,047	0,000	0,000	0,000
P _{B_s}	1,377	0,194	0,179	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	1,244	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL	4,327	1,438	1,410	0,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.5: Matriz unitária U_D do Ciclo Rankine de potência para o modelo E&S

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	1						
P	B		1					
P	TV-GE			1				
P	C				1			
P	JE&BE					1		
P	B _s						1	
P	B _p							1

Tabela A.6: Matriz do operador produto $\langle P \rangle$ para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	1,073	1,669	1,334	0,053	1,076	0,053	1,334
P	B	0,000	1,008	0,006	0,000	0,005	0,000	0,006
P	TV-GE	0,003	1,258	1,012	0,002	0,009	0,002	1,012
P	C	1,478	2,718	2,018	1,073	1,484	1,073	2,018
P	JE&BE	0,073	1,677	1,340	0,053	1,081	0,053	1,340
P	B _s	1,478	2,718	2,018	0,073	1,484	1,073	2,018
P	B _p	0,003	1,258	0,012	0,002	0,009	0,002	1,012
TOTAL		4,109	12,307	7,739	1,258	5,148	2,258	8,739

Tabela A.7: Matriz do operador produto $\langle P \rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	1,073	1,669	1,334	0,053	1,076	0,053	1,334
P	B	0,000	1,008	0,006	0,000	0,005	0,000	0,006
P	TV-GE	0,003	1,258	1,012	0,002	0,009	0,002	1,012
P	C	1,478	2,718	2,018	1,073	1,484	1,073	2,018
P	JE&BE	0,073	1,677	1,340	0,053	1,081	0,053	1,340
P	B _s	1,478	2,718	2,018	0,073	1,484	1,073	2,018
P	B _p	0,003	1,258	0,012	0,002	0,009	0,002	1,012
TOTAL		4,109	12,307	7,739	1,258	5,148	2,258	8,739

Tabela A.8: Matriz do operador de irreversibilidade $\langle I \rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 1)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	3,327	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,438	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,410	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	-0,951	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		3,327	0,438	0,410	-0,951	0,000	0,000	0,000

Tabela A.13: Matriz F-P para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		70.000							70.000
P _{GV}						63.401			63.401
P _B						149			149
P _{TV-GE}								20.230	20.230
P _C							40.367,71		40.368
P _{JH&BH}				21.285	42.264				63.550
P _{B_s}		36.728	24	3.615					40.368
P _{B_p}	20000		155		75				20.230
TOTAL	20.000	106.728	179	24.900	42.339	63.550	40.368	20.230	

Tabela A.14: Matriz F-P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		78.688							78.688
P _{GV}						63.401			63.401
P _B						149			149
P _{TV-GE}								20.230	20.230
P _C							40.367,71		40.368
P _{JH&BH}				21.285	42.264				63.550
P _{B_s}		36.728	24	3.615					40.368
P _{B_p}	20000		155		75				20.230
TOTAL	20.000	115.416	179	24.900	42.339	63.550	40.368	20.230	

Tabela A.15: Matriz KP para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P ₀	1,104	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,998	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P _{JH&BH}	0,000	0,000	1,052	1,047	0,000	0,000	0,000
P _{B_s}	0,579	0,162	0,179	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	1,042	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,683	1,204	1,231	1,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.16: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P ₀	1,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,998	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P _{JH&BH}	0,000	0,000	1,052	1,047	0,000	0,000	0,000
P _{B_s}	0,579	0,162	0,179	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	1,042	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,820	1,204	1,231	1,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.17: Matriz unitária U_D do Ciclo Rankine de potência para o modelo H&S

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	F_{JH&BH}	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	1						
P	B		1					
P	TV-GE			1				
P	C				1			
P	JH&BH					1		
P	B _s						1	
P	B _p							1

Tabela A.18: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de referência do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	F_{JH&BH}	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	2,554	3,738	3,170	2,683	2,557	2,683	3,170
P	B	0,004	1,009	0,007	0,006	0,006	0,006	0,007
P	TV-GE	0,007	1,055	1,012	0,011	0,009	0,011	1,012
P	C	1,482	2,518	2,018	2,557	1,484	2,557	2,018
P	JH&BH	1,558	3,747	3,177	2,689	2,563	2,689	3,177
P	B _s	1,482	2,518	2,018	1,557	1,484	2,557	2,018
P	B _p	0,007	1,055	0,012	0,011	0,009	0,011	1,012
TOTAL		7,092	15,640	11,415	9,516	8,112	10,516	12,415

Tabela A.19: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	F_{JH&BH}	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	2,554	3,738	3,170	2,683	2,557	2,683	3,170
P	B	0,004	1,009	0,007	0,006	0,006	0,006	0,007
P	TV-GE	0,007	1,055	1,012	0,011	0,009	0,011	1,012
P	C	1,482	2,518	2,018	2,557	1,484	2,557	2,018
P	JH&BH	1,558	3,747	3,177	2,689	2,563	2,689	3,177
P	B _s	1,482	2,518	2,018	1,557	1,484	2,557	2,018
P	B _p	0,007	1,055	0,012	0,011	0,009	0,011	1,012
TOTAL		7,092	15,640	11,415	9,516	8,112	10,516	12,415

Tabela A.20: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 1)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	F_{JH&BH}	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	2,096	3,067	2,601	2,201	2,098	2,201	2,601
P	B	0,001	0,206	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
P	TV-GE	0,002	0,244	0,234	0,003	0,002	0,003	0,234
P	C	0,072	0,123	0,099	0,125	0,072	0,125	0,099
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		2,170	3,639	2,934	2,330	2,174	2,330	2,934

Tabela A.25: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F_0	F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}	TOTAL
P	0		79.427					79.427
P	GV					30.264		30.264
P	B					141		141
P	TV-C-GE						20251	20.251
P	JE&P				30.481			30.481
P	B_p	20000		176		75		20.251
TOTAL		20.000	79.427	176	30.481	30.481	20.251	

Tabela A.26: Matriz K - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	0	2,624	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,993	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	JE&P	0,000	0,000	1,505	0,000	0,000
P	B_p	0,000	1,244	0,000	0,002	0,000
TOTAL		2,624	1,244	1,505	1,000	1,000

Tabela A.27: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	GV	1,000	1,882	1,513	1,005	1,513
P	B	0,000	1,009	0,007	0,005	0,007
P	TV-C-GE	0,000	1,259	1,013	0,008	1,013
P	JE&P	0,000	1,895	1,524	1,013	1,524
P	B_p	0,000	1,259	0,013	0,008	1,013
TOTAL		1,000	7,305	4,069	2,039	5,069

Tabela A.28: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	GV	1,624	3,057	2,458	1,633	2,458
P	B	0,000	0,246	0,002	0,001	0,002
P	TV-C-GE	0,000	0,636	0,511	0,004	0,511
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,624	3,939	2,971	1,638	2,971

Tabela A.29: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 2) para o exemplo utilizando o modelo E

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	2,6244	2,6244	0,0000
B	1,2437	1,2437	0,0000
TV-C-GE	1,3283	1,5052	0,1768

Tabela A.30: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&P	0,000	0,000	0,177	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	TOTAL	0,000	0,000	0,177	0,000	0,000

Tabela A.31: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	8,839	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,041	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&P	0,000	0,000	3577,394	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	-8,880	0,000
	TOTAL	0,000	0,000	3.577,394	0,000	0,000

Tabela A.32: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 2)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	0,000	0,000	5842,380	-7,344	0,000	5.835,036
P	B	0,000	0,000	4,095	-0,005	0,000	4,090
P	TV-C-GE	0,000	0,000	15,060	-4,516	0,000	10,545
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	TOTAL	0,000	0,000	5.861,535	11,865	0,000	

Tabela A.33: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F_0	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}	TOTAL
P_0		79.427							79.427
P_{GV}						30.264			30.264
P_B						141			141
P_{TV-GE}								20.251	20.251
P_C							48.521,05		48.521
$P_{JE\&BE}$				28.126	2.280				30.406
P_{B_s}		41.675	27	6.819					48.521
P_{B_p}	20000		176		75				20.251
TOTAL	20.000	121.102	203	34.945	2.355	30.406	48.521	20.251	

Tabela A.34: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P_0	2,624	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000
P_B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
P_{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P_C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
$P_{JE\&BE}$	0,000	0,000	1,389	0,047	0,000	0,000	0,000
P_{B_s}	1,377	0,194	0,337	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{B_p}	0,000	1,244	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL	4,001	1,438	1,726	0,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.35: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P_{GV}	1,073	1,892	1,513	0,053	1,077	0,053	1,513
P_B	0,000	1,009	0,007	0,000	0,005	0,000	0,007
P_{TV-GE}	0,003	1,260	1,013	0,002	0,009	0,002	1,013
P_C	1,478	3,225	2,426	1,074	1,486	1,074	2,426
$P_{JE\&BE}$	0,073	1,901	1,520	0,053	1,082	0,053	1,520
P_{B_s}	1,478	3,225	2,426	0,074	1,486	1,074	2,426
P_{B_p}	0,003	1,260	0,013	0,002	0,009	0,002	1,013
TOTAL	4,109	13,772	8,918	1,257	5,154	2,257	9,918

Tabela A.36: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P_{GV}	3,220	5,679	4,542	0,159	3,232	0,159	4,542
P_B	0,000	0,442	0,003	0,000	0,002	0,000	0,003
P_{TV-GE}	0,002	0,914	0,735	0,001	0,006	0,001	0,735
P_C	-1,407	-3,069	-2,308	-1,021	-1,414	-1,021	-2,308
$P_{JE\&BE}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{B_s}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{B_p}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,816	3,966	2,971	-0,861	1,826	-0,861	2,971

Tabela A.37: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 2) para o exemplo utilizando o modelo E&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	4,0015	4,0015	0,0000
B	1,4376	1,4376	0,0000
TV-GE	1,4096	1,7256	0,3160
C	0,0488	0,0485	-0,0003

Tabela A.38: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_S}	F _{B_P}
P ₀	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{JE&BE}	0,000	0,000	0,158	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_S}	0,000	0,000	0,158	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	0,000	0,316	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela A.39: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_S}	F _{B_P}
P ₀	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{JE&BE}	0,000	0,000	3196,745	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_S}	0,000	0,000	3196,745	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_P}	0,000	0,000	0,000	-12,603	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	0,000	6.393,490	-12,603	0,000	0,000	0,000

Tabela A.40: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 2)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_S}	F _{B_P}	TOTAL
P _{GV}	0,000	0,001	10838,586	-57,240	0,000	0,000	0,000	10.781,346
P _B	0,000	0,000	7,385	-0,039	0,000	0,000	0,000	7,346
P _{TV-GE}	0,000	0,000	24,406	-9,259	0,000	0,000	0,000	15,146
P _C	0,000	0,000	-7786,751	29,091	0,000	0,000	0,000	-7.757,660
P _{JE&BE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_S}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	0,000	3.083,625	-37,447	0,000	0,000	0,000	

Tabela A.41: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F_0	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}	TOTAL
P	0		79.427							79.427
P	GV						71.939			71.939
P	B						169			169
P	TV-GE								20.251	20.251
P	C							48.521,05		48.521
P	JH&BH				21.307	50.801				72.108
P	B_s		41.675	27	6.819					48.521
P	B_p	20000		176		75				20.251
TOTAL		20.000	121.102	203	28.126	50.876	72.108	48.521	20.251	

Tabela A.42: Matriz K P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	0	1,104	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,998	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	1,052	1,047	0,000	0,000	0,000
P	B_s	0,579	0,162	0,337	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	1,042	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,683	1,204	1,389	1,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.43: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	2,556	4,183	3,597	2,685	2,559	2,685	3,597
P	B	0,004	1,010	0,008	0,006	0,006	0,006	0,008
P	TV-GE	0,006	1,056	1,013	0,011	0,009	0,011	1,013
P	C	1,483	2,943	2,426	2,560	1,486	2,560	2,426
P	JH&BH	1,559	4,193	3,605	2,691	2,565	2,691	3,605
P	B_s	1,483	2,943	2,426	1,560	1,486	2,560	2,426
P	B_p	0,006	1,056	0,013	0,011	0,009	0,011	1,013
TOTAL		7,097	17,384	13,088	9,524	8,121	10,524	14,088

Tabela A.44: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	1,746	2,859	2,458	1,835	1,749	1,835	2,458
P	B	0,001	0,206	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
P	TV-GE	0,002	0,411	0,394	0,004	0,003	0,004	0,394
P	C	0,072	0,143	0,118	0,124	0,072	0,124	0,118
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,822	3,618	2,971	1,965	1,826	1,965	2,971

Tabela A.45: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 2) para o exemplo utilizando o modelo H&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	1,6834	1,6834	0,0000
B	1,2041	1,2041	0,0000
TV-GE	1,2309	1,3889	0,1580
C	1,0488	1,0485	-0,0003

Tabela A.46: Matriz $\Delta \langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,158	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,000	0,000	0,158	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela A.47: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	3196,745	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	-12,603	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,000	0,000	3.196,745	-12,603	0,000	0,000	0,000

Tabela A.48: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 2)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	0,000	0,000	5866,015	-30,979	0,000	0,000	0,000	5.835,036
P	B	0,000	0,000	4,112	-0,022	0,000	0,000	0,000	4,090
P	TV-GE	0,000	0,000	13,080	-4,962	0,000	0,000	0,000	8,118
P	C	0,000	0,000	397,163	-1,484	0,000	0,000	0,000	395,679
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,000	0,000	6.280,369	-37,447	0,000	0,000	0,000	

Tabela A.49: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

		F_0	F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}	TOTAL
P	0		70.052					70.052
P	GV					26.700		26.700
P	B					126		126
P	TV-C-GE						20251	20.251
P	JE&P				26.900			26.900
P	B_p	20000		176		75		20.251
TOTAL		0	70.052	0	26.900	26.825	20.251	

Tabela A.50: Matriz K P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	0	2,624	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,993	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	JE&P	0,000	0,000	1,328	0,000	0,000
P	B_p	0,000	1,403	0,000	0,003	0,000
TOTAL		2,624	1,403	1,328	1,000	1,000

Tabela A.51: Matriz do operador produto $\{P\}$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	GV	1,000	1,873	1,335	1,005	1,335
P	B	0,000	1,009	0,006	0,005	0,006
P	TV-C-GE	0,000	1,421	1,013	0,009	1,013
P	JE&P	0,000	1,888	1,345	1,013	1,345
P	B_p	0,000	1,421	0,013	0,009	1,013
TOTAL		1,000	7,612	3,711	2,041	4,711

Tabela A.52: Matriz do operador de irreversibilidade $\{I\}$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	GV	1,624	3,042	2,168	1,632	2,168
P	B	0,000	0,407	0,003	0,002	0,003
P	TV-C-GE	0,000	0,467	0,332	0,003	0,332
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,624	3,915	2,503	1,637	2,503

Tabela A.53: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 3) para o exemplo utilizando o modelo E

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	2,6244	2,6237	-0,0008
B	1,2437	1,4034	0,1597
TV-C-GE	1,3283	1,3283	0,0000

Tabela A.54: Matriz $\Delta \langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P ₀	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{TV-C-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{JE&P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000
TOTAL	-0,001	0,160	0,000	0,000	0,000

Tabela A.55: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P ₀	-20,013	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	-0,875	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,954	0,000
P _{TV-C-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{JE&P}	0,000	0,000	-0,079	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	19,903	0,000	-0,079	0,000
TOTAL	-20,013	19,903	-0,079	0,000	0,000

Tabela A.56: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 3)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}	TOTAL
P _{GV}	0,000	43,141	-0,129	1,310	0,000	44,322
P _B	0,000	0,050	0,000	0,388	0,000	0,438
P _{TV-C-GE}	0,000	6,617	0,000	0,419	0,000	7,035
P _{JE&P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	49,809	-0,130	2,116	0,000	

Tabela A.57: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F_0	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}	TOTAL
P	0		70.052							70.052
P	GV						26.700			26.700
P	B						126			126
P	TV-GE								20.251	20.251
P	C							40.410,46		40.410
P	JE&BE				24.927	1.899				26.825
P	B_s		36.748	44	3.619					40.410
P	B_p	20000		176		75				20.251
TOTAL		20.000	106.800	220	28.546	1.974	26.825	40.410	20.251	

Tabela A.58: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	0	2,624	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	1,231	0,047	0,000	0,000	0,000
P	B_s	1,376	0,347	0,179	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	1,403	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL		4,000	1,751	1,410	0,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.59: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	1,073	1,892	1,335	0,053	1,077	0,053	1,335
P	B	0,000	1,009	0,006	0,000	0,005	0,000	0,006
P	TV-GE	0,003	1,422	1,013	0,002	0,010	0,002	1,013
P	C	1,478	3,208	2,021	1,074	1,486	1,074	2,021
P	JE&BE	0,073	1,901	1,341	0,053	1,082	0,053	1,341
P	B_s	1,478	3,208	2,021	0,074	1,486	1,074	2,021
P	B_p	0,003	1,422	0,013	0,002	0,010	0,002	1,013
TOTAL		4,108	14,062	7,749	1,258	5,155	2,258	8,749

Tabela A.60: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JE\&BE}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	3,219	5,676	4,005	0,159	3,231	0,159	4,005
P	B	0,000	0,757	0,005	0,000	0,004	0,000	0,005
P	TV-GE	0,001	0,582	0,415	0,001	0,004	0,001	0,415
P	C	-1,405	-3,052	-1,922	-1,021	-1,413	-1,021	-1,922
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,815	3,964	2,503	-0,861	1,825	-0,861	2,503

Tabela A.61: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 3) para o exemplo utilizando o modelo E&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	4,0015	4,0000	-0,0014
B	1,4376	1,7506	0,3130
TV-GE	1,4096	1,4096	0,0000
C	0,0488	0,0488	0,0000

Tabela A.62: Matriz $\Delta \langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-0,001	0,153	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-0,001	0,313	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela A.63: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	-20,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,953	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,953	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-18,126	19,108	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	19,903	0,000	-0,079	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-38,140	39,010	0,000	-0,079	0,000	0,000	0,000

Tabela A.64: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 3)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	-2,886	82,753	0,000	-0,318	2,342	0,000	0,000	81,891
P	B	-0,003	0,097	0,000	0,000	0,722	0,000	0,000	0,816
P	TV-GE	-0,017	8,272	0,000	-0,033	0,554	0,000	0,000	8,776
P	C	18,509	-57,761	0,000	0,153	-1,570	0,000	0,000	-40,669
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		15,602	33,362	0,000	-0,199	2,048	0,000	0,000	

Tabela A.65: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F_0	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}	TOTAL
P	0		70.052							70.052
P	GV						63.448			63.448
P	B						169			169
P	TV-GE								20.251	20.251
P	C							40.410,46		40.410
P	JH&BH				21.308	42.309				63.617
P	B_s		36.748	44	3.619					40.410
P	B_p	20000		176		75				20.251
TOTAL		20.000	106.800	220	24.927	42.384	63.617	40.410	20.251	

Tabela A.66: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	0	1,104	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,997	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	1,052	1,047	0,000	0,000	0,000
P	B_s	0,579	0,258	0,179	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	1,042	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,683	1,299	1,231	1,049	1,000	1,000	1,000

Tabela A.67: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	2,555	3,997	3,172	2,685	2,559	2,685	3,172
P	B	0,004	1,011	0,008	0,007	0,007	0,007	0,008
P	TV-GE	0,007	1,058	1,013	0,012	0,010	0,012	1,013
P	C	1,482	2,764	2,021	2,559	1,486	2,559	2,021
P	JH&BH	1,559	4,007	3,181	2,692	2,566	2,692	3,181
P	B_s	1,482	2,764	2,021	1,559	1,486	2,559	2,021
P	B_p	0,007	1,058	0,013	0,012	0,010	0,012	1,013
TOTAL		7,097	16,659	11,428	9,528	8,123	10,528	12,428

Tabela A.68: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	GV	1,746	2,731	2,168	1,835	1,749	1,835	2,168
P	B	0,001	0,303	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003
P	TV-GE	0,002	0,244	0,234	0,003	0,002	0,003	0,234
P	C	0,072	0,135	0,099	0,125	0,073	0,125	0,099
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,821	3,413	2,503	1,965	1,825	1,965	2,503

Tabela A.69: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 3) para o exemplo utilizando o modelo H&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	1,6834	1,6833	-0,0001
B	1,2041	1,2994	0,0953
TV-GE	1,2309	1,2309	0,0000
C	1,0488	1,0488	0,0000

Tabela A.70: Matriz $\Delta \langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,095	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,000	0,095	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela A.71: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	-20,392	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	20,392	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-7,628	14,182	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	-0,079	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-7,628	14,182	0,000	-0,079	0,000	0,000	0,000

Tabela A.72: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 3)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	-13,995	26,020	0,000	-0,172	20,083	0,000	0,000	31,936
P	B	-0,016	0,030	0,000	0,000	6,145	0,000	0,000	6,159
P	TV-GE	-0,022	0,040	0,000	-0,019	4,947	0,000	0,000	4,947
P	C	-0,953	1,773	0,000	-0,008	1,277	0,000	0,000	2,088
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-14,986	27,863	0,000	-0,199	32,452	0,000	0,000	

Tabela A.73: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F₀	F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{Bp}	TOTAL
P	0		74.564					74.564
P	GV					28.930		28.930
P	B					138		138
P	TV-C-GE						20245	20.245
P	JE&P				29.143			29.143
P	B _p	20000		170		75		20.245
TOTAL		0	74.564	0	29.143	29.068	20.245	

Tabela A.74: Matriz K P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{Bp}
P	0	2,577	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,993	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	JE&P	0,000	0,000	1,440	0,000	0,000
P	B _p	0,000	1,231	0,000	0,003	0,000
TOTAL		2,577	1,231	1,440	1,000	1,000

Tabela A.75: Matriz do operador produto $\{P\}$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{Bp}
P	GV	1,000	1,781	1,447	1,005	1,447
P	B	0,000	1,008	0,007	0,005	0,007
P	TV-C-GE	0,000	1,247	1,012	0,009	1,012
P	JE&P	0,000	1,794	1,457	1,012	1,457
P	B _p	0,000	1,247	0,012	0,009	1,012
TOTAL		1,000	7,077	3,935	2,039	4,935

Tabela A.76: Matriz do operador de irreversibilidade $\{I\}$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{Bp}
P	GV	1,577	2,810	2,282	1,585	2,282
P	B	0,000	0,233	0,002	0,001	0,002
P	TV-C-GE	0,000	0,548	0,445	0,004	0,445
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,577	3,591	2,728	1,590	2,728

Tabela A.77: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 4) para o exemplo utilizando o modelo E

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	2,6244	2,5774	-0,0471
B	1,2437	1,2315	-0,0122
TV-C-GE	1,3283	1,4395	0,1112

Tabela A.78: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	0	-0,047	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&P	0,000	0,000	0,111	0,000	0,000
P	B _p	0,000	-0,012	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-0,047	-0,012	0,111	0,000	0,000

Tabela A.79: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}
P	0	-1255,633	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	3,395	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	2,450	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&P	0,000	0,000	2249,963	0,000	0,000
P	B _p	0,000	-1,517	0,000	-5,845	0,000
TOTAL		-1.255,633	-1,517	2.249,963	0,000	0,000

Tabela A.80: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-C-GE}	F _{JE&P}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	0,000	-3,461	3566,203	-1,097	0,000	3.561,645
P	B	0,000	-0,002	2,493	0,563	0,000	3,054
P	TV-C-GE	0,000	-0,675	8,406	-1,258	0,000	6,473
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,000	-4,138	3.577,103	-1,792	0,000	

Tabela A.81: Matriz *F-P* para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	0		74.564							74.564
P	GV						28.930			28.930
P	B						138			138
P	TV-GE								20.245	20.245
P	C							42.063,24		42.063
P	JE&BE				24.735	4.333				29.068
P	B _s		38.604	25	3.434					42.063
P	B _p	20000		170		75				20.245
TOTAL		20.000	113.168	195	28.169	4.408	29.068	42.063	20.245	

Tabela A.82: Matriz *KP* para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	2,577	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	1,222	0,103	0,000	0,000	0,000
P	B _s	1,334	0,182	0,170	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	1,231	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL		3,912	1,414	1,391	0,105	1,000	1,000	1,000

Tabela A.83: Matriz do operador produto *|P*) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	1,164	1,804	1,447	0,123	1,167	0,123	1,447
P	B	0,001	1,009	0,007	0,001	0,006	0,001	0,007
P	TV-GE	0,004	1,247	1,012	0,003	0,010	0,003	1,012
P	C	1,554	2,802	2,103	1,164	1,560	1,164	2,103
P	JE&BE	0,165	1,812	1,453	0,123	1,172	0,123	1,453
P	B _s	1,554	2,802	2,103	0,164	1,560	1,164	2,103
P	B _p	0,004	1,247	0,012	0,003	0,010	0,003	1,012
TOTAL		4,444	12,723	8,138	1,581	5,484	2,581	9,138

Tabela A.84: Matriz do operador de irreversibilidade *|I*) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	3,389	5,252	4,212	0,358	3,398	0,358	4,212
P	B	0,000	0,417	0,003	0,000	0,002	0,000	0,003
P	TV-GE	0,001	0,488	0,396	0,001	0,004	0,001	0,396
P	C	-1,391	-2,509	-1,883	-1,042	-1,396	-1,042	-1,883
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		2,000	3,649	2,728	-0,684	2,008	-0,684	2,728

Tabela A.85: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 4) para o exemplo utilizando o modelo E&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	4,0015	3,9117	-0,0897
B	1,4376	1,4138	-0,0239
TV-GE	1,4096	1,3914	-0,0182
C	0,0488	0,1048	0,0560

Tabela A.86: Matriz $\Delta \langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	-0,047	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	-0,009	0,056	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-0,043	-0,012	-0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	-0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-0,090	-0,024	-0,018	0,056	0,000	0,000	0,000

Tabela A.87: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	-1255,633	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,423	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	2,423	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	-183,662	2262,153	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-1137,260	-1,456	-183,662	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	-1,517	0,000	-3,023	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-2.392,893	-2,973	-367,324	2.259,130	0,000	0,000	0,000

Tabela A.88: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	-406,626	-6,910	-689,695	7673,369	4,514	0,000	0,000	6.574,652
P	B	-0,275	-0,005	-0,467	5,195	1,010	0,000	0,000	5,458
P	TV-GE	-1,245	-0,603	-0,893	7,326	1,179	0,000	0,000	5,765
P	C	1185,477	4,374	447,888	-3152,862	-2,708	0,000	0,000	-1.517,830
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		777,330	-3,143	-243,166	4.533,028	3,996	0,000	0,000	

Tabela A.89: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

		F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	0		74.564							74.564
P	GV						67.535			67.535
P	B						163			163
P	TV-GE								20.245	20.245
P	C							42.063,24		42.063
P	JH&BH				21.301	46.397				67.697
P	B _s		38.604	25	3.434					42.063
P	B _p	20000		170		75				20.245
TOTAL		20.000	113.168	195	24.735	46.472	67.697	42.063	20.245	

Tabela A.90: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	1,104	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,998	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	1,052	1,103	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,572	0,154	0,170	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	1,042	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,676	1,196	1,222	1,105	1,000	1,000	1,000

Tabela A.91: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	2,721	3,981	3,377	3,011	2,724	3,011	3,377
P	B	0,004	1,010	0,008	0,007	0,007	0,007	0,008
P	TV-GE	0,007	1,056	1,012	0,012	0,010	0,012	1,012
P	C	1,557	2,611	2,103	2,724	1,560	2,724	2,103
P	JH&BH	1,725	3,991	3,385	3,018	2,731	3,018	3,385
P	B _s	1,557	2,611	2,103	1,724	1,560	2,724	2,103
P	B _p	0,007	1,056	0,012	0,012	0,010	0,012	1,012
TOTAL		7,579	16,316	12,001	10,509	8,600	11,509	13,001

Tabela A.92: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	1,839	2,690	2,282	2,034	1,841	2,034	2,282
P	B	0,001	0,198	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
P	TV-GE	0,002	0,234	0,224	0,003	0,002	0,003	0,224
P	C	0,163	0,274	0,220	0,286	0,163	0,286	0,220
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		2,004	3,396	2,728	2,324	2,008	2,324	2,728

Tabela A.93: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 4) para o exemplo utilizando o modelo H&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	1,6834	1,6757	-0,0077
B	1,2041	1,1958	-0,0083
TV-GE	1,2309	1,2218	-0,0091
C	1,0488	1,1048	0,0560

Tabela A.94: Matriz $\Delta \langle KP \rangle$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{Bs}	F_{Bp}
P 0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,056	0,000	0,000	0,000
P B_s	-0,008	-0,008	-0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
P B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	-0,008	-0,008	-0,009	0,056	0,000	0,000	0,000

Tabela A.95: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{Bs}	F_{Bp}
P 0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P GV	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,156	0,000	0,000
P B	0,000	0,000	0,000	0,000	4,156	0,000	0,000
P TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P JH&BH	0,000	0,000	0,000	2262,153	0,000	0,000	0,000
P B_s	-487,177	-1,232	-183,662	0,000	0,000	0,000	0,000
P B_p	0,000	0,000	0,000	-3,023	0,000	0,000	0,000
TOTAL	-487,177	-1,232	-183,662	2.259,130	0,000	0,000	0,000

Tabela A.96: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 4)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{Bs}	F_{Bp}	TOTAL
P GV	-991,067	-2,506	-373,624	4156,846	3,539	0,000	0,000	2.793,189
P B	-0,693	-0,002	-0,261	2,906	0,818	0,000	0,000	2,769
P TV-GE	-1,342	-0,003	-0,506	4,151	0,967	0,000	0,000	3,266
P C	-139,093	-0,352	-52,437	369,124	0,459	0,000	0,000	177,701
P JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P B_s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	-1.132,195	-2,863	-426,828	4.533,028	5,783	0,000	0,000	

Tabela A.97: Matriz F - P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

		F_0	F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}	TOTAL
P	0		95.116					95.116
P	GV					32.830		32.830
P	B					156		156
P	TV-C-GE						20268	20.268
P	JE&P				33.061			33.061
P	B_p	20000		193		75		20.268
TOTAL		0	95.116	0	33.061	32.986	20.268	

Tabela A.98: Matriz K P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	0	2,897	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,993	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
P	TV-C-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	JE&P	0,000	0,000	1,631	0,000	0,000
P	B_p	0,000	1,231	0,000	0,002	0,000
TOTAL		2,897	1,231	1,631	1,000	1,000

Tabela A.99: Matriz do operador produto $\{P\}$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	GV	1,000	2,021	1,641	1,006	1,641
P	B	0,000	1,010	0,008	0,005	0,008
P	TV-C-GE	0,000	1,248	1,013	0,008	1,013
P	JE&P	0,000	2,036	1,653	1,013	1,653
P	B_p	0,000	1,248	0,013	0,008	1,013
TOTAL		1,000	7,563	4,329	2,041	5,329

Tabela A.100: Matriz do operador de irreversibilidade $\{I\}$ para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

		F_{GV}	F_B	$F_{TV-C-GE}$	$F_{JE\&P}$	F_{B_p}
P	GV	1,897	3,835	3,114	1,909	3,114
P	B	0,000	0,234	0,002	0,001	0,002
P	TV-C-GE	0,000	0,788	0,640	0,005	0,640
P	JE&P	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,897	4,857	3,756	1,915	3,756

Tabela A.101: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 5) para o exemplo utilizando o modelo E

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	2,6244	2,8972	0,2728
B	1,2437	1,2315	-0,0122
TV-C-GE	1,3283	1,6312	0,3029

Tabela A.102: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{B_p}
P₀	0,273	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{TV-C-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE&P}	0,000	0,000	0,303	0,000	0,000
P_{B_p}	0,000	-0,012	0,000	-0,001	0,000
TOTAL	0,273	-0,012	0,303	0,000	0,000

Tabela A.103: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{B_p}
P₀	7276,344	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{GV}	0,000	0,000	0,000	11,551	0,000
P_B	0,000	0,000	0,000	2,489	0,000
P_{TV-C-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE&P}	0,000	0,000	6127,840	0,000	0,000
P_{B_p}	0,000	-1,517	0,000	-14,040	0,000
TOTAL	7.276,344	-1,517	6.127,840	0,000	0,000

Tabela A.104: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E (Anomalia 5)

	F_{GV}	F_B	F_{TV-C-GE}	F_{JE&P}	F_{B_p}	TOTAL
P_{GV}	0,000	-4,724	11699,112	-12,264	0,000	11.682,124
P_B	0,000	-0,003	6,801	0,556	0,000	7,354
P_{TV-C-GE}	0,000	-0,970	31,728	-7,020	0,000	23,737
P_{JE&P}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{B_p}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	-5,697	11.737,640	-18,728	0,000	

Tabela A.105: Matriz F-P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

	F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P ₀		95.116							95.116
P _{GV}						32.830			32.830
P _B						156			156
P _{TV-GE}								20.268	20.268
P _C							50.313,92		50.314
P _{JE&BE}				27.803	5.183				32.986
P _{B_s}		43.808	29	6.478					50.314
P _{B_p}	20000		193		75				20.268
TOTAL	20.000	138.923	221	34.281	5.258	32.986	50.314	20.268	

Tabela A.106: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P ₀	2,897	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{GV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,995	0,000	0,000
P _B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
P _{TV-GE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P _C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P _{JE&BE}	0,000	0,000	1,372	0,103	0,000	0,000	0,000
P _{B_s}	1,334	0,182	0,320	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	1,231	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
TOTAL	4,232	1,414	1,691	0,105	1,000	1,000	1,000

Tabela A.107: Matriz do operador produto (P) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P _{GV}	1,164	2,044	1,641	0,123	1,168	0,123	1,641
P _B	0,001	1,010	0,008	0,001	0,006	0,001	0,008
P _{TV-GE}	0,003	1,248	1,013	0,002	0,009	0,002	1,013
P _C	1,554	3,310	2,516	1,165	1,563	1,165	2,516
P _{JE&BE}	0,165	2,054	1,649	0,123	1,174	0,123	1,649
P _{B_s}	1,554	3,310	2,516	0,165	1,563	1,165	2,516
P _{B_p}	0,003	1,248	0,013	0,002	0,009	0,002	1,013
TOTAL	4,444	14,225	9,357	1,581	5,491	2,581	10,357

Tabela A.108: Matriz do operador de irreversibilidade (I) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P _{GV}	3,761	6,605	5,305	0,397	3,775	0,397	5,305
P _B	0,000	0,418	0,003	0,000	0,002	0,000	0,003
P _{TV-GE}	0,002	0,863	0,701	0,002	0,006	0,002	0,701
P _C	-1,392	-2,964	-2,253	-1,043	-1,399	-1,043	-2,253
P _{JE&BE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_s}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{B_p}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	2,372	4,922	3,756	-0,644	2,384	-0,644	3,756

Tabela A.109: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 5) para o exemplo utilizando o modelo E&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	4,0015	4,2316	0,2302
B	1,4376	1,4138	-0,0239
TV-GE	1,4096	1,6914	0,2818
C	0,0488	0,1045	0,0557

Tabela A.110: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	0,273	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	0,141	0,056	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-0,043	-0,012	0,141	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	-0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,230	-0,024	0,282	0,056	0,000	0,000	0,000

Tabela A.111: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	7276,344	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,423	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	2,423	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JE&BE	0,000	0,000	2850,757	2262,153	0,000	0,000	0,000
P	B _s	-1137,260	-1,456	2850,757	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	-1,517	0,000	-14,826	0,000	0,000	0,000
TOTAL		6.139,084	-2,973	5.701,515	2.247,327	0,000	0,000	0,000

Tabela A.112: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo E&S (Anomalia 5)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JE&BE}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	GV	-451,234	-8,624	11891,467	8459,992	6,890	0,000	0,000	19.898,491
P	B	-0,275	-0,005	7,254	5,160	1,011	0,000	0,000	13,145
P	TV-GE	-1,932	-1,065	22,939	3,972	2,086	0,000	0,000	26,000
P	C	1186,157	4,936	-6962,150	-3131,839	-3,810	0,000	0,000	-8.906,706
P	JE&BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		732,716	-4,759	4.959,509	5.337,286	6,177	0,000	0,000	

Tabela A.113: Matriz F-P para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F ₀	F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}	TOTAL
P	0		95.116							95.116
P	GV						76.637			76.637
P	B						185			185
P	TV-GE								20.268	20.268
P	C							50.313,92		50.314
P	JH&BH				21.325	55.497				76.822
P	B _s		43.808	29	6.478					50.314
P	B _p	20000		193		75				20.268
TOTAL		20.000	138.923	221	27.803	55.572	76.822	50.314	20.268	

Tabela A.114: Matriz KP para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	0	1,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,998	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	1,052	1,103	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,572	0,154	0,320	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	1,042	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
TOTAL		1,813	1,196	1,372	1,105	1,000	1,000	1,000

Tabela A.115: Matriz do operador produto |P) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	2,722	4,456	3,832	3,013	2,727	3,013	3,832
P	B	0,004	1,011	0,009	0,007	0,007	0,007	0,009
P	TV-GE	0,007	1,057	1,013	0,012	0,009	0,012	1,013
P	C	1,559	3,041	2,516	2,727	1,563	2,727	2,516
P	JH&BH	1,727	4,467	3,841	3,020	2,733	3,020	3,841
P	B _s	1,559	3,041	2,516	1,727	1,563	2,727	2,516
P	B _p	0,007	1,057	0,013	0,012	0,009	0,012	1,013
TOTAL		7,584	18,130	13,740	10,519	8,610	11,519	14,740

Tabela A.116: Matriz do operador de irreversibilidade |I) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F _{GV}	F _B	F _{TV-GE}	F _C	F _{JH&BH}	F _{B_s}	F _{B_p}
P	GV	2,213	3,622	3,114	2,449	2,216	2,449	3,114
P	B	0,001	0,198	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
P	TV-GE	0,002	0,393	0,377	0,004	0,003	0,004	0,377
P	C	0,163	0,318	0,263	0,285	0,163	0,285	0,263
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B _p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		2,379	4,530	3,756	2,740	2,384	2,740	3,756

Tabela A.117: Tabela do consumo exergético nas condições de referência e teste (Anomalia 5) para o exemplo utilizando o modelo H&S

Equipamento	K_i na condição de referência	K_i na condição de teste	ΔK_i
GV	1,6834	1,8127	0,1293
B	1,2041	1,1958	-0,0083
TV-GE	1,2309	1,3718	0,1409
C	1,0488	1,1045	0,0557

Tabela A.118: Matriz $\Delta(KP)$ para o Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	0	0,137	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,056	0,000	0,000	0,000
P	B_s	-0,008	-0,008	0,141	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		0,129	-0,008	0,141	0,056	0,000	0,000	0,000

Tabela A.119: Matriz das malfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}
P	0	8687,816	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	GV	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,156	0,000	0,000
P	B	0,000	0,000	0,000	0,000	4,156	0,000	0,000
P	TV-GE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	2262,153	0,000	0,000	0,000
P	B_s	-487,177	-1,232	2850,757	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	-14,826	0,000	0,000	0,000
TOTAL		8.200,639	-1,232	2.850,757	2.247,327	0,000	0,000	0,000

Tabela A.120: Matriz das disfunções (kW) para a condição de teste do Ciclo Rankine de potência utilizando o modelo H&S (Anomalia 5)

		F_{GV}	F_B	F_{TV-GE}	F_C	$F_{JH\&BH}$	F_{B_s}	F_{B_p}	TOTAL
P	GV	-1193,064	-3,016	6981,313	4966,742	5,855	0,000	0,000	10.757,829
P	B	-0,694	-0,002	4,058	2,887	0,819	0,000	0,000	7,069
P	TV-GE	-2,108	-0,005	12,335	2,136	1,623	0,000	0,000	13,981
P	C	-138,862	-0,351	812,561	365,521	0,644	0,000	0,000	1.039,512
P	JH&BH	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_s	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P	B_p	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL		-1.334,728	-3,375	7.810,266	5.337,286	8,941	0,000	0,000	

APENDICÊ B
RESULTADOS DAS ETAPAS DO DIAGNÓSTICO
TERMOECONÔMICO DO ESTUDO DE CASO

Tabela B.1: Matriz F-P para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F 0	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS	TOTAL
P 0		183.197																				183.196,56
P CALD																		87.098				87.098,15
P BAC									12									1.035				1.047,20
P BC																		106				106,16
P D																		2.064			5.968	8.031,87
P AQBP																		1.121			9.159	10.279,33
P AQMP																		2.076			6.930	9.005,87
P AQAP									1.782									4.376			5.717	11.874,81
P DES			7					1.055												0	670	1.731,07
P T1																			8.891			8.891,00
P T2																			12.266			12.266,00
P T3																			22.070			22.070,00
P T4																			10.176			10.176,00
P T5																			15.219			15.219,00
P C																					114.479,04	114.479,04
P G	33.100,00	601	1.177	119											319							35.315,74
P S	29.705,28																					29.705,28
P JE/BE					3.519	1.888	2.217	3.382	1.843	11.909	14.666	26.037	12.083	16.500	3.831					0		97.875,48
P JW/BW																37.844	30.778					68.622,00
P JV/BV	0,00								0												0	0,00
P JS/BS		91.933	594,90	239	5.780	10.443	8.287	8.806		3.018	2.400	3.967	1.934	5.521								142.922,24
TOTAL	62.805,28	275.730,30	1.778,18	357,99	9.299,62	12.330,73	10.503,24	13.242,73	3.637,57	14.926,58	17.066,25	30.004,03	14.017,38	22.020,94	4.150,29	37.844,00	30.778,00	97.875,48	68.622,00	0,00	142.922,23	

Tabela B.2: Matriz F-P para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F 0	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS	TOTAL	
P 0		193.839																					193.839,21
P CALD																		89.981					89.980,55
P BAC									17									1.127					1.143,28
P BC																		130					130,00
P D																		2.492			6.777		9.269,48
P AQBP																		980			9.458		10.437,59
P AQMP																		1.990			7.080		9.070,20
P AQAP									1.841									4.045			5.289		11.154,78
P DES			16					1.095												0	617		1.728,86
P T1																			8.882				8.881,62
P T2																			12.133				12.133,12
P T3																			21.044				21.043,57
P T4																			11.967				11.967,35
P T5																			14.848				14.847,85
P C																					112.877,36		112.877,36
P G	33.101,21	625	1.210	138											335								35.409,21
P S	29.705,28																						29.705,28
P JE/BE					4.065	2.049	2.468	3.134	1.757	11.950	14.737	24.979	14.417	16.487	4.702					0			100.743,24
P JW/BW																38.034	30.840						68.873,52
P JV/BV	0,00								0												0		0,00
P JS/BS		94.660	722,47	600	7.023	8.879	8.333	8.167		3.068	2.604	3.935	2.450	1.639									142.079,76
TOTAL	62.806,49	289.124,61	1.948,96	738,04	11.087,47	10.927,16	10.801,05	12.395,88	3.615,12	15.017,83	17.340,58	28.914,17	16.866,65	18.125,17	5.036,63	38.033,52	30.840,00	100.743,24	68.873,52	0,00	142.079,76		

Tabela B.3: Matriz KP para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P₀	2,103	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,890	0,000	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,042
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,064
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,048
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,030	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,000	0,000	0,040
P_{DES}	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,089	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,005
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	0,000	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,179	0,000	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,322	0,000	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,148	0,000	0,000
P_{T5}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,222	0,000	0,000
P_C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,801
P_G	0,007	1,123	1,121	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE/BE}	0,000	0,000	0,000	0,438	0,184	0,246	0,285	1,065	1,339	1,196	1,180	1,187	1,084	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,072	1,036	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	1,056	0,568	2,251	0,720	1,016	0,920	0,742	0,000	0,339	0,196	0,180	0,190	0,363	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	3,166	1,698	3,372	1,158	1,200	1,166	1,115	2,101	1,679	1,391	1,359	1,377	1,447	0,036	1,072	1,036	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela B.4: *Matriz KP para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)*

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P₀	2,154	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,893	0,000	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000	0,048
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,067
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,000	0,050
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,065	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040	0,000	0,000	0,037
P_{DES}	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,098	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,004
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	0,000	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,176	0,000	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,306	0,000	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,174	0,000	0,000
P_{T5}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,216	0,000	0,000
P_C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,794
P_G	0,007	1,058	1,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE/BE}	0,000	0,000	0,000	0,439	0,196	0,272	0,281	1,017	1,345	1,215	1,187	1,205	1,110	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,074	1,038	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	1,052	0,632	4,616	0,758	0,851	0,919	0,732	0,000	0,345	0,215	0,187	0,205	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	3,213	1,705	5,677	1,196	1,047	1,191	1,111	2,091	1,691	1,429	1,374	1,409	1,221	0,045	1,074	1,038	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela B.6: Matriz do operador produto $\{P\}$ para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P _{CALD}	1,14	1,666	1,863	0,566	0,327	0,383	0,557	1,740	1,496	1,322	1,303	1,312	1,222	0,040	1,409	1,362	1,085	1,315	1,413	0,126
P _{BAC}	0,002	1,020	0,023	0,007	0,004	0,005	0,007	0,029	0,018	0,016	0,016	0,016	0,015	0,000	0,017	0,016	0,013	0,016	0,021	0,002
P _{BC}	0,000	0,002	1,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,000
P _D	0,065	0,182	0,283	1,083	0,079	0,078	0,088	0,187	0,141	0,119	0,117	0,118	0,120	0,003	0,130	0,126	0,090	0,121	0,138	0,061
P _{AQBP}	0,097	0,240	0,391	0,115	1,113	0,111	0,121	0,246	0,181	0,152	0,149	0,151	0,155	0,004	0,166	0,161	0,112	0,155	0,179	0,091
P _{AQMP}	0,075	0,205	0,322	0,095	0,090	1,090	0,100	0,211	0,158	0,134	0,131	0,132	0,134	0,004	0,146	0,141	0,100	0,136	0,155	0,071
P _{AQAP}	0,081	0,268	0,386	0,114	0,102	0,103	1,219	1,402	0,208	0,177	0,174	0,176	0,175	0,005	0,192	0,186	0,136	0,179	0,769	0,076
P _{DES}	0,014	0,046	0,061	0,018	0,017	0,017	0,117	1,141	0,030	0,026	0,025	0,025	0,026	0,001	0,028	0,027	0,019	0,026	0,580	0,013
P _{T1}	0,002	0,162	0,163	0,002	0,002	0,002	0,002	0,008	1,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,001	0,144	0,139	0,004	0,134	0,006	0,001
P _{T2}	0,003	0,224	0,225	0,003	0,002	0,002	0,003	0,010	0,007	1,006	0,006	0,006	0,006	0,001	0,198	0,192	0,005	0,185	0,008	0,001
P _{T3}	0,005	0,402	0,405	0,006	0,004	0,004	0,006	0,019	0,013	0,012	1,011	0,011	0,011	0,001	0,357	0,345	0,009	0,333	0,014	0,002
P _{T4}	0,002	0,186	0,187	0,003	0,002	0,002	0,003	0,009	0,006	0,005	0,005	1,005	0,005	0,001	0,165	0,159	0,004	0,154	0,006	0,001
P _{T5}	0,003	0,277	0,279	0,004	0,003	0,003	0,004	0,013	0,009	0,008	0,008	0,008	1,007	0,001	0,246	0,238	0,006	0,230	0,010	0,001
P _C	1,190	2,732	4,588	1,342	1,359	1,329	1,426	2,796	2,025	1,688	1,651	1,671	1,737	1,046	1,852	1,790	1,229	1,728	2,012	1,116
P _G	0,013	1,167	1,175	0,016	0,011	0,012	0,017	0,054	0,038	0,033	0,033	0,033	0,031	0,004	1,036	0,035	0,027	0,033	0,041	0,006
P _S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P _{JE/BE}	0,160	1,872	2,093	0,636	0,368	0,430	0,626	1,956	1,681	1,486	1,464	1,475	1,373	0,045	1,583	1,531	1,219	1,477	1,588	0,141
P _{JW/BW}	0,014	1,251	1,259	0,017	0,012	0,013	0,018	0,058	0,041	0,036	0,035	0,036	0,034	0,004	1,110	1,073	0,029	1,036	0,044	0,006
P _{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P _{JS/BS}	1,486	3,411	5,727	1,675	1,697	1,659	1,78	3,49	2,528	2,107	2,061	2,087	2,169	0,058	2,312	2,235	1,534	2,157	2,512	1,393
TOTAL	2,87	11,90	14,70	4,03	3,49	3,58	4,31	9,88	7,06	6,23	6,13	6,18	6,06	1,16	8,78	8,52	4,09	7,26	6,99	1,71

Tabela B.7: Matriz do operador produto $|P\rangle$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P_{CALD}	1,159	1,656	2,200	0,593	0,338	0,431	0,588	1,768	1,538	1,375	1,340	1,363	1,245	0,050	1,456	1,407	1,107	1,355	1,437	0,142
P_{BAC}	0,002	1,021	0,028	0,008	0,004	0,006	0,009	0,033	0,020	0,017	0,017	0,017	0,016	0,001	0,018	0,018	0,014	0,017	0,024	0,002
P_{BC}	0,000	0,002	1,003	0,001	0,000	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000
P_D	0,076	0,207	0,487	1,100	0,081	0,094	0,103	0,218	0,165	0,142	0,138	0,141	0,124	0,005	0,150	0,145	0,105	0,140	0,161	0,071
P_{AQBP}	0,101	0,243	0,619	0,123	1,104	0,119	0,127	0,255	0,188	0,161	0,155	0,158	0,139	0,005	0,169	0,163	0,115	0,157	0,185	0,095
P_{AQMP}	0,078	0,205	0,494	0,100	0,082	1,095	0,103	0,216	0,162	0,139	0,135	0,138	0,121	0,005	0,147	0,142	0,102	0,137	0,159	0,073
P_{AQAP}	0,078	0,258	0,527	0,111	0,087	0,102	1,231	1,443	0,197	0,171	0,166	0,169	0,150	0,006	0,180	0,174	0,128	0,168	0,786	0,073
P_{DES}	0,014	0,055	0,091	0,019	0,015	0,018	0,129	1,158	0,031	0,027	0,026	0,026	0,023	0,001	0,028	0,027	0,020	0,026	0,589	0,013
P_{T1}	0,002	0,153	0,157	0,002	0,002	0,002	0,003	0,008	1,006	0,005	0,005	0,005	0,004	0,001	0,144	0,139	0,004	0,134	0,006	0,001
P_{T2}	0,003	0,209	0,214	0,003	0,002	0,003	0,003	0,011	0,008	1,007	0,007	0,007	0,006	0,001	0,196	0,190	0,005	0,183	0,008	0,001
P_{T3}	0,005	0,362	0,371	0,006	0,004	0,004	0,006	0,019	0,013	0,012	1,011	0,011	0,010	0,001	0,340	0,329	0,009	0,317	0,014	0,002
P_{T4}	0,003	0,206	0,211	0,003	0,002	0,003	0,003	0,011	0,007	0,007	0,006	1,007	0,006	0,001	0,194	0,187	0,005	0,180	0,008	0,001
P_{T5}	0,003	0,255	0,262	0,004	0,003	0,003	0,004	0,014	0,009	0,008	0,008	0,008	1,007	0,001	0,240	0,232	0,006	0,224	0,010	0,002
P_C	1,190	2,680	7,103	1,388	1,194	1,363	1,442	2,814	2,045	1,737	1,672	1,714	1,492	1,057	1,826	1,765	1,233	1,700	2,023	1,119
P_G	0,014	1,103	1,131	0,017	0,011	0,014	0,018	0,059	0,040	0,035	0,034	0,035	0,032	0,004	1,037	0,036	0,028	0,035	0,043	0,007
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE/BE}	0,178	1,854	2,463	0,664	0,378	0,483	0,659	1,979	1,722	1,539	1,501	1,526	1,394	0,056	1,630	1,575	1,239	1,517	1,609	0,159
P_{JW/BW}	0,015	1,185	1,215	0,018	0,012	0,015	0,020	0,063	0,043	0,038	0,037	0,038	0,034	0,005	1,114	1,077	0,030	1,037	0,046	0,007
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P_{JS/BS}	1,498	3,374	8,94	1,747	1,502	1,716	1,815	3,542	2,574	2,187	2,105	2,157	1,878	0,071	2,299	2,222	1,551	2,14	2,547	1,408
TOTAL	4,42	15,03	27,52	5,91	4,82	5,47	6,26	13,61	9,77	8,61	8,36	8,52	7,68	1,27	11,17	10,83	5,70	9,47	10,66	3,18

Tabela B.8: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P_{CALD}	2,566	3,665	4,869	1,312	0,748	0,955	1,302	3,912	3,405	3,043	2,967	3,016	2,755	0,112	3,222	3,114	2,450	2,999	3,181	0,314
P_{BAC}	0,002	0,720	0,020	0,005	0,003	0,004	0,006	0,023	0,014	0,012	0,012	0,012	0,011	0,000	0,013	0,013	0,010	0,012	0,017	0,001
P_{BC}	0,001	0,011	4,692	0,004	0,002	0,003	0,004	0,012	0,010	0,009	0,009	0,009	0,008	0,000	0,010	0,010	0,007	0,009	0,010	0,001
P_D	0,015	0,041	0,096	0,216	0,016	0,018	0,020	0,043	0,032	0,028	0,027	0,028	0,024	0,001	0,029	0,028	0,021	0,027	0,032	0,014
P_{AQBP}	0,005	0,011	0,029	0,006	0,052	0,006	0,006	0,012	0,009	0,008	0,007	0,007	0,006	0,000	0,008	0,008	0,005	0,007	0,009	0,004
P_{AQMP}	0,015	0,039	0,094	0,019	0,016	0,209	0,020	0,041	0,031	0,027	0,026	0,026	0,023	0,001	0,028	0,027	0,019	0,026	0,030	0,014
P_{AQAP}	0,009	0,029	0,059	0,012	0,010	0,011	0,137	0,161	0,022	0,019	0,018	0,019	0,017	0,001	0,020	0,019	0,014	0,019	0,087	0,008
P_{DES}	0,015	0,060	0,099	0,020	0,017	0,019	0,141	1,263	0,034	0,029	0,028	0,029	0,025	0,001	0,031	0,029	0,021	0,028	0,642	0,014
P_{T1}	0,001	0,106	0,108	0,002	0,001	0,001	0,002	0,006	0,695	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	0,099	0,096	0,003	0,092	0,004	0,001
P_{T2}	0,001	0,090	0,092	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,003	0,432	0,003	0,003	0,003	0,000	0,084	0,081	0,002	0,078	0,004	0,001
P_{T3}	0,002	0,135	0,139	0,002	0,001	0,002	0,002	0,007	0,005	0,004	0,378	0,004	0,004	0,001	0,127	0,123	0,003	0,119	0,005	0,001
P_{T4}	0,001	0,084	0,086	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,003	0,003	0,003	0,412	0,002	0,000	0,079	0,077	0,002	0,074	0,003	0,000
P_{T5}	0,001	0,056	0,058	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,222	0,000	0,053	0,051	0,001	0,049	0,002	0,000
P_C	-1,137	-2,561	-6,786	-1,326	-1,140	-1,302	-1,377	-2,688	-1,954	-1,660	-1,598	-1,637	-1,425	-1,010	-1,745	-1,686	-1,178	-1,624	-1,933	-1,069
P_G	0,001	0,082	0,084	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,000	0,077	0,003	0,002	0,003	0,003	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JE/BE}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,50	2,57	3,74	0,28	-0,27	-0,07	0,27	2,81	2,31	1,96	1,89	1,94	1,68	-0,89	2,14	2,03	1,38	1,92	2,10	-0,69

Tabela B.9: Matriz $\Delta(KP)$ para o sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P 0	0,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P CALD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
P BAC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
P BC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,006
P AQBP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,002	0,000	0,002
P AQMP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001
P AQAP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,005	0,000	-0,003
P DES	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P T1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000
P T2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,000
P T3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,016	0,000
P T4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000
P T5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	0,000
P C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,007
P G	0,000	-0,065	-0,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P JE/BE	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,026	-0,004	-0,048	0,006	0,019	0,007	0,017	0,026	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P JW/BW	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
P JV/BV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P JS/BS	-0,003	0,064	2,365	0,038	-0,165	-0,001	-0,009	0,000	0,006	0,019	0,007	0,015	-0,252	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,047	0,007	2,305	0,038	-0,153	0,025	-0,004	-0,010	0,012	0,038	0,015	0,032	-0,226	0,008	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela B.10: Matriz das malfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P 0	4433	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P CALD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	321	0	0	0
P BAC	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0
P BC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0
P D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	357	0	0	850
P AQBP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-169	0	0	355
P AQMP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-143	0	0	192
P AQAP	0	0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	-446	0	0	-416
P DES	0	8	0	0	0	0	111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-49
P T1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-42	0	0
P T2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-177	0	0
P T3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1103	0	0
P T4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1748	0	0
P T5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-425	0	0
P C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-932
P G	4	-68	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0
P S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P JE/BE	0	0	0	3	129	234	-46	-83	54	232	160	176	399	937	0	0	0	0	0	0
P JW/BW	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	62	0	0	0	0
P JV/BV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P JS/BS	-305	67	251	305	-1699	-13	-112	0	53	232	160	149	-3842	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	4133	7	245	308	-1569	221	-47	-18	107	464	320	325	-3443	958	89	62	0	0	0	0

Tabela B.11: Matriz das disfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo E&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JE/BE	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS	TOTAL
P _{CALD}	-83	-166	58	103	-216	569	286	-108	148	641	443	477	-229	2362	267	186	765	144	0	728	6.375
P _{BAC}	0	-1	0	0	-1	2	2	3	1	3	2	2	-1	10	1	1	42	1	0	2	68
P _{BC}	0	-1	0	0	-1	2	1	0	0	2	1	1	-1	7	1	1	94	0	0	2	111
P _D	-4	-1	3	4	-21	5	2	0	2	8	6	6	-45	20	2	2	72	2	0	181	243
P _{AQBP}	-1	0	1	1	-7	1	1	0	1	2	2	2	-15	5	1	0	-7	1	0	21	7
P _{AQMP}	-4	-1	3	4	-21	4	2	0	2	8	5	5	-46	19	2	2	-25	2	0	51	12
P _{AQAP}	-2	1	2	3	-12	3	16	7	1	5	4	4	-25	14	2	1	-54	1	0	-49	-80
P _{DES}	-4	9	3	4	-22	5	138	7	2	8	6	6	-47	21	3	2	-50	2	0	-94	-2
P _{T1}	0	-7	0	0	-1	1	0	0	0	1	1	1	-1	5	8	6	8	-29	0	1	-7
P _{T2}	0	-6	0	0	-1	1	0	0	0	1	0	0	-1	4	7	5	7	-76	0	1	-57
P _{T3}	0	-9	-1	0	-1	1	1	0	0	1	1	1	-2	6	11	7	11	-412	0	1	-384
P _{T4}	0	-5	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	-1	4	7	5	7	716	0	1	733
P _{T5}	0	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	2	4	3	4	-94	0	0	-82
P _C	319	25	-257	-329	1663	-262	-125	3	-120	-521	-360	-366	3637	-1139	-145	-101	-134	-117	0	-137	1.532
P _G	0	-5	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	-1	4	0	0	6	0	0	0	7
P _S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JE/BE}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JW/BW}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JV/BV}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JS/BS}	7E-06	6E-07	-0	-0	4E-05	-0	-0	6E-08	-0	-0	-0	-0	8E-05	-0	-3E-06	-0	-0	-2,64E-06	0	0	0
TOTAL	220	-169	-188	-207	1359	332	325	-87	37	160	110	140	3220	1342	171	119	744	140	0	708	

Tabela B.12: Matriz F-P para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F 0	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW&BW	F JV&BV	F JS&BS	TOTAL	
P 0		183.197																					183.196,56
P CALD																		179.031					179.030,97
P BAC									19									1.630					1.648,88
P BC																		345					345,11
P D																		7.844			5.968		13.812,27
P AQBP																		11.563			9.159		20.722,04
P AQMP																		10.362			6.930		17.292,54
P AQAP									1.782									13.182				5.717	20.680,51
P DES			7					2.837												0	670		3.513,33
P T1																			8.891				8.891,00
P T2																			12.266				12.266,00
P T3																			22.070				22.070,00
P T4																			10.176				10.176,00
P T5																			15.219				15.219,00
P C																						114.479,04	114.479,04
P G	33.100,00	601	1.177	119											319								35.315,74
P S	29.705,28																						29.705,28
P JH&BH					9.487	11.047	9.147	9.099	2.513	8.891	12.266	22.070	10.149	10.979	118.310					0			223.957,64
P JW&BW																37.844	30.778						68.622,00
P JV&BV	0,00								0												0		0,00
P JS&BS		91.933	594,90	239	5.780	10.443	8.287	8.806		3.018	2.400	3.967	1.934	5.521									142.922,24
TOTAL	62.805,28	275.730,30	1.778,18	357,99	15.267,67	21.489,32	17.433,33	20.741,69	4.314,10	11.908,62	14.666,20	26.037,16	12.083,38	16.499,73	118.629,33	37.844,00	30.778,00	223.957,64	68.622,00	0,00	142.922,23		

Tabela B.13: Matriz F-P para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F 0	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW&BW	F JV&BV	F JS&BS	TOTAL
P 0		193.839																				193.839,21
P CALD																		184.641				184.640,95
P BAC									33									1.849				1.882,24
P BC																		730				730,04
P D																		9.515		6.777		16.292,00
P AQBP																		9.858		9.458		19.316,24
P AQMP																		10.323		7.080		17.403,41
P AQAP									1.841									12.212			5.269	19.321,81
P DES			16					2.936												0	617	3.569,80
P T1																			8.882			8.881,62
P T2																			12.133			12.133,12
P T3																			21.044			21.043,57
P T4																			11.967			11.967,35
P T5																			14.848			14.847,85
P C																					112.877,36	112.877,36
P G	33.101,21	625	1.210	138												335						35.409,21
P S	29.705,28																					29.705,28
P JH&BH					10.842	11.506	9.548	8.403	2.375	8.882	12.133	21.044	11.967	14.848	117.579					0		229.127,56
P JW&BW																38.034	30.840					68.873,52
P JV&BV	0,00								0												0	0,00
P JS&BS		94.660	722,47	600	7.023	8.879	8.333	8.167		3.068	2.604	3.935	2.450	1.639								142.079,76
TOTAL	62.806,49	289.124,61	1.948,96	738,04	17.864,89	20.385,09	17.881,36	19.506,12	4.249,07	11.949,73	14.736,85	24.978,87	14.417,00	16.486,51	117.913,98	38.033,52	30.840,00	229.127,56	68.873,52	0,00	142.079,76	

Tabela B.14: Matriz KP para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P₀	1,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,799	0,000	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,042
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,052	0,000	0,000	0,064
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,046	0,000	0,000	0,048
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,507	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,000	0,000	0,040
P_{DES}	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,137	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,005
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	0,000	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,179	0,000	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,322	0,000	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,148	0,000	0,000
P_{T5}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,222	0,000	0,000
P_C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,801
P_G	0,003	0,714	0,345	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JH&BH}	0,000	0,000	0,000	0,687	0,533	0,529	0,440	0,715	1,000	1,000	1,000	0,997	0,721	1,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,072	1,036	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	0,514	0,361	0,692	0,418	0,504	0,479	0,426	0,000	0,339	0,196	0,180	0,190	0,363	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,540	1,078	1,037	1,105	1,037	1,008	1,003	1,228	1,339	1,196	1,180	1,187	1,084	1,036	1,072	1,036	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela B.15: *Matriz KP para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)*

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P₀	1,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,806	0,000	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,000	0,000	0,048
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,067
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,000	0,000	0,050
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,516	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000	0,000	0,037
P_{DES}	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,004
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	0,000	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,176	0,000	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,306	0,000	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,174	0,000	0,000
P_{T5}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,216	0,000	0,000
P_C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,794
P_G	0,003	0,643	0,189	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JH&BH}	0,000	0,000	0,000	0,666	0,596	0,549	0,435	0,665	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,074	1,038	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	0,513	0,384	0,822	0,431	0,460	0,479	0,423	0,000	0,345	0,215	0,187	0,205	0,110	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,566	1,035	1,011	1,097	1,055	1,027	1,010	1,190	1,345	1,215	1,187	1,205	1,110	1,045	1,074	1,038	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela B.17: Matriz do operador produto $\{P\}$ para a condição de referência do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P_{CALD}	2,22	2,930	2,634	2,543	2,397	2,329	2,392	2,848	3,065	2,726	2,688	2,707	2,490	2,347	2,896	2,800	2,264	2,702	2,556	2,362
P_{BAC}	0,011	1,027	0,024	0,023	0,022	0,021	0,023	0,032	0,028	0,025	0,025	0,025	0,023	0,022	0,027	0,026	0,021	0,025	0,026	0,022
P_{BC}	0,002	0,006	1,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005
P_D	0,113	0,239	0,228	1,205	0,198	0,192	0,196	0,219	0,239	0,208	0,204	0,206	0,198	0,171	0,223	0,216	0,165	0,208	0,192	0,218
P_{AQBP}	0,170	0,359	0,343	0,308	1,298	0,289	0,294	0,328	0,359	0,312	0,307	0,309	0,298	0,257	0,335	0,324	0,247	0,313	0,288	0,329
P_{AQMP}	0,140	0,298	0,284	0,256	0,247	1,239	0,244	0,274	0,299	0,261	0,256	0,258	0,248	0,215	0,280	0,270	0,208	0,261	0,241	0,270
P_{AQAP}	0,161	0,355	0,332	0,303	0,291	0,282	1,363	0,873	0,357	0,312	0,307	0,310	0,294	0,260	0,335	0,323	0,251	0,312	0,562	0,312
P_{DES}	0,029	0,065	0,058	0,052	0,050	0,049	0,197	1,130	0,061	0,053	0,052	0,052	0,051	0,044	0,057	0,055	0,042	0,053	0,586	0,056
P_{T1}	0,003	0,104	0,053	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	1,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,144	0,139	0,004	0,134	0,005	0,004
P_{T2}	0,004	0,144	0,073	0,006	0,006	0,006	0,006	0,008	0,007	1,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,198	0,192	0,005	0,185	0,006	0,006
P_{T3}	0,007	0,259	0,131	0,011	0,010	0,010	0,011	0,014	0,013	0,012	1,011	0,011	0,011	0,011	0,357	0,345	0,009	0,333	0,012	0,011
P_{T4}	0,003	0,119	0,060	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,005	0,005	1,005	0,005	0,005	0,165	0,159	0,004	0,154	0,005	0,005
P_{T5}	0,005	0,178	0,090	0,008	0,007	0,007	0,007	0,009	0,009	0,008	0,008	0,008	1,007	0,007	0,246	0,238	0,007	0,230	0,008	0,007
P_C	1,138	2,124	2,165	1,792	1,786	1,726	1,742	1,801	2,014	1,697	1,662	1,681	1,713	2,313	1,852	1,790	1,266	1,728	1,533	2,204
P_G	0,020	0,751	0,379	0,032	0,030	0,029	0,031	0,039	0,038	0,034	0,033	0,033	0,031	0,031	1,036	0,035	0,027	0,033	0,033	0,031
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JH&BH}	1,529	3,665	3,295	3,181	2,998	2,914	2,993	3,563	3,834	3,410	3,363	3,386	3,115	2,936	3,623	3,503	2,832	3,381	3,197	2,955
P_{JW/BW}	0,021	0,804	0,406	0,034	0,033	0,032	0,033	0,042	0,041	0,036	0,035	0,036	0,033	0,034	1,110	1,073	0,029	1,036	0,036	0,033
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P_{JS/BS}	1,421	2,652	2,703	2,237	2,229	2,155	2,175	2,248	2,514	2,119	2,075	2,099	2,138	1,64	2,312	2,235	1,58	2,157	1,914	2,752
TOTAL	5,58	13,43	11,56	9,77	9,39	9,14	9,55	11,20	11,38	10,11	9,97	10,05	9,53	8,67	12,89	12,49	7,39	11,09	9,29	8,83

Tabela B.18: Matriz do operador produto (P) para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P_{CALD}	2,252	2,875	2,555	2,574	2,483	2,421	2,452	2,821	3,136	2,819	2,752	2,795	2,567	2,404	2,987	2,887	2,299	2,781	2,560	2,422
P_{BAC}	0,013	1,029	0,026	0,026	0,025	0,025	0,027	0,039	0,032	0,029	0,028	0,028	0,026	0,024	0,030	0,029	0,023	0,028	0,031	0,025
P_{BC}	0,005	0,011	1,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,011	0,012	0,011	0,011	0,011	0,010	0,010	0,012	0,011	0,009	0,011	0,010	0,010
P_D	0,133	0,270	0,261	1,240	0,234	0,230	0,231	0,251	0,283	0,249	0,242	0,247	0,223	0,203	0,264	0,255	0,194	0,245	0,223	0,257
P_{AQBP}	0,162	0,324	0,317	0,287	1,280	0,276	0,277	0,298	0,337	0,296	0,287	0,293	0,263	0,239	0,312	0,302	0,228	0,291	0,263	0,314
P_{AQMP}	0,141	0,288	0,278	0,256	0,250	1,245	0,247	0,268	0,302	0,266	0,259	0,264	0,238	0,217	0,282	0,272	0,208	0,262	0,238	0,274
P_{AQAP}	0,151	0,321	0,299	0,281	0,273	0,268	1,355	0,857	0,334	0,296	0,288	0,293	0,265	0,244	0,313	0,302	0,233	0,291	0,545	0,292
P_{DES}	0,029	0,069	0,058	0,053	0,051	0,050	0,216	1,140	0,062	0,055	0,053	0,054	0,049	0,044	0,058	0,056	0,042	0,054	0,591	0,057
P_{T1}	0,003	0,094	0,031	0,005	0,004	0,004	0,004	0,006	1,005	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,144	0,139	0,004	0,134	0,005	0,004
P_{T2}	0,004	0,129	0,042	0,006	0,006	0,006	0,006	0,008	0,007	1,007	0,007	0,007	0,006	0,006	0,196	0,190	0,005	0,183	0,007	0,006
P_{T3}	0,007	0,223	0,073	0,011	0,010	0,010	0,011	0,014	0,013	0,012	1,011	0,011	0,010	0,011	0,340	0,329	0,009	0,317	0,012	0,011
P_{T4}	0,004	0,127	0,042	0,006	0,006	0,006	0,006	0,008	0,007	0,007	0,006	1,007	0,006	0,006	0,194	0,187	0,005	0,180	0,007	0,006
P_{T5}	0,005	0,157	0,052	0,008	0,007	0,007	0,008	0,010	0,009	0,008	0,008	0,008	1,007	0,008	0,240	0,232	0,007	0,224	0,008	0,008
P_C	1,137	2,036	2,158	1,790	1,765	1,748	1,748	1,760	2,023	1,735	1,674	1,713	1,505	2,320	1,826	1,765	1,262	1,700	1,511	2,205
P_G	0,020	0,680	0,223	0,033	0,032	0,031	0,032	0,042	0,040	0,035	0,034	0,035	0,032	0,033	1,037	0,036	0,028	0,035	0,035	0,032
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JH&BH}	1,553	3,567	3,171	3,194	3,081	3,005	3,043	3,501	3,892	3,498	3,415	3,469	3,185	2,983	3,707	3,583	2,853	3,451	3,177	3,005
P_{JW/BW}	0,022	0,730	0,239	0,035	0,034	0,033	0,035	0,045	0,042	0,038	0,037	0,038	0,034	0,035	1,114	1,077	0,030	1,037	0,038	0,035
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
P_{JS/BS}	1,431	2,562	2,716	2,253	2,222	2,2	2,2	2,215	2,547	2,184	2,107	2,156	1,894	1,661	2,299	2,222	1,588	2,14	1,902	2,776
TOTAL	7,07	15,49	13,55	12,07	11,77	11,57	11,91	13,29	14,08	12,55	12,22	12,43	11,33	10,45	15,35	14,87	9,03	13,36	12,16	11,74

Tabela B.19: Matriz do operador de irreversibilidade $|I\rangle$ para a condição de teste do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P_{CALD}	1,274	1,627	1,446	1,457	1,405	1,370	1,388	1,596	1,775	1,595	1,557	1,582	1,452	1,360	1,690	1,634	1,301	1,574	1,449	1,370
P_{BAC}	0,000	0,036	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
P_{BC}	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_D	0,013	0,026	0,025	0,120	0,023	0,022	0,022	0,024	0,027	0,024	0,023	0,024	0,021	0,020	0,025	0,025	0,019	0,024	0,021	0,025
P_{AQBP}	0,009	0,018	0,018	0,016	0,071	0,015	0,015	0,016	0,019	0,016	0,016	0,016	0,015	0,013	0,017	0,017	0,013	0,016	0,015	0,017
P_{AQMP}	0,004	0,008	0,008	0,007	0,007	0,034	0,007	0,007	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007	0,006	0,008	0,007	0,006	0,007	0,007	0,008
P_{AQAP}	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,013	0,008	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,005	0,003
P_{DES}	0,006	0,013	0,011	0,010	0,010	0,010	0,041	0,217	0,012	0,010	0,010	0,010	0,009	0,008	0,011	0,011	0,008	0,010	0,113	0,011
P_{T1}	0,001	0,033	0,011	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,347	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,050	0,048	0,001	0,046	0,002	0,002
P_{T2}	0,001	0,028	0,009	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,216	0,001	0,001	0,001	0,001	0,042	0,041	0,001	0,039	0,001	0,001
P_{T3}	0,001	0,042	0,014	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,189	0,002	0,002	0,002	0,064	0,062	0,002	0,059	0,002	0,002
P_{T4}	0,001	0,026	0,009	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,206	0,001	0,001	0,040	0,038	0,001	0,037	0,001	0,001
P_{T5}	0,001	0,017	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,111	0,001	0,027	0,026	0,001	0,025	0,001	0,001
P_C	0,051	0,091	0,096	0,080	0,079	0,078	0,078	0,079	0,090	0,077	0,075	0,076	0,067	0,103	0,081	0,079	0,056	0,076	0,067	0,098
P_G	0,001	0,050	0,017	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,077	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JH&BH}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	1,36	2,02	1,68	1,70	1,61	1,54	1,57	1,96	2,29	1,96	1,89	1,93	1,69	1,52	2,14	2,03	1,41	1,92	1,69	1,54

Tabela B.20: Matriz $\Delta(KP)$ para o sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P₀	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{CALD}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
P_{BAC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
P_{BC}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
P_D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,006
P_{AQBP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,009	0,000	0,002
P_{AQMP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001
P_{AQAP}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	0,000	-0,003
P_{DES}	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{T1}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000
P_{T2}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,000
P_{T3}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,016	0,000
P_{T4}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000
P_{T5}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,006	0,000
P_C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,007
P_G	0,000	-0,071	-0,156	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JH&BH}	0,000	0,000	0,000	-0,021	0,063	0,020	-0,005	-0,050	0,000	0,000	0,000	0,003	0,279	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JW/BW}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JV/BV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P_{JS/BS}	-0,001	0,023	0,130	0,013	-0,044	0,000	-0,003	0,000	0,006	0,019	0,007	0,015	-0,252	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,026	-0,043	-0,026	-0,009	0,018	0,019	0,007	-0,038	0,006	0,019	0,007	0,017	0,026	0,008	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela B.21: Matriz das malfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F JH&BH	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS
P₀	4753	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{CALD}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1444	0	0	0
P_{BAC}	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	177	0	0	0
P_{BC}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	368	0	0	0
P_D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1456	0	0	850
P_{AQBP}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1928	0	0	355
P_{AQMP}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-272	0	0	192
P_{AQAP}	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	-1246	0	0	-416
P_{DES}	0	8	0	0	0	0	306	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-49
P_{T1}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-42	0	0
P_{T2}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-177	0	0
P_{T3}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1103	0	0
P_{T4}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1748	0	0
P_{T5}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-425	0	0
P_C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-932
P_G	5	-117	-54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0
P_S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{JH&BH}	0	0	0	-295	1297	341	-105	-176	0	0	0	27	4240	937	0	0	0	0	0	0
P_{JW/BW}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	62	0	0	0	0
P_{JV/BV}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_{JS/BS}	-149	38	45	173	-918	-7	-64	0	53	232	160	149	-3842	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	4610	-71	-9	-122	379	334	136	-132	54	232	160	176	399	958	89	62	0	0	0	0

Tabela B.22: Matriz das disfunções (KW) do sistema térmico do estudo de caso (modelo H&S)

	F CALD	F BAC	F BC	F D	F AQBP	F AQMP	F AQAP	F DES	F T1	F T2	F T3	F T4	F T5	F C	F G	F S	F _{JH&BH}	F JW/BW	F JV/BV	F JS/BS	TOTAL
P _{CALD}	-195	-133	-30	-147	430	434	263	-165	74	318	219	239	253	1254	140	98	-28	71	0	77	3.172
P _{BAC}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	6	0	0	0	8
P _{BC}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4
P _D	-4	-2	0	-1	2	6	4	-2	1	6	4	4	-16	18	2	1	129	1	0	85	239
P _{AQBP}	-2	-1	0	-1	0	4	3	-2	1	4	3	3	-13	12	1	1	-114	1	0	22	-78
P _{AQMP}	-1	-1	0	0	0	2	1	-1	0	2	1	1	-5	6	1	0	-11	0	0	6	3
P _{AQAP}	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	-1	2	0	0	-14	0	0	-4	-13
P _{DES}	-2	1	0	-1	1	3	65	0	1	3	2	2	-7	8	1	1	-44	1	0	-22	11
P _{T1}	0	-6	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	3	8	-14	0	0	-3
P _{T2}	0	-5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	7	-38	0	0	-29
P _{T3}	0	-7	-3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	5	4	10	-206	0	0	-192
P _{T4}	0	-5	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	6	358	0	0	367
P _{T5}	0	-3	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	4	-47	0	0	-41
P _C	-14	-5	0	0	-17	19	12	-6	5	23	16	16	-139	54	7	5	-29	5	0	-22	-72
P _G	0	-9	-4	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	4	0	0	13	0	0	0	7
P _S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JH&BH}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JW/BW}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JV/BV}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P _{JS/BS}	7E-06	2E-06	-0	-0	8E-06	-0	-0	3E-06	-0	-0	-0	-0	7E-05	-0	-3E-06	-0	1E-05	-2,48E-06	0	0	0
TOTAL	-218	-175	-46	-150	418	472	351	-174	83	358	247	267	70	1369	171	119	-52	132	0	142	