

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Dimas José Rúa Orozco**

**Operadores Exergéticos: uma Nova Abordagem de Diagnóstico  
Termoeconômico para Identificar Anomalias Intrínsecas em Ciclos Térmicos  
de Potência**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Doutor em Ciências em  
Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de  
Fluxo**

**Orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

**Co-Orientador: Prof. Dr. José Carlos Escobar Palácio**

**Julho de 2017  
Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Dimas José Rúa Orozco**

**Operadores Exergéticos: uma Nova Abordagem de Diagnóstico  
Termoeconômico para Identificar Anomalias Intrínsecas em Ciclos Térmicos  
de Potência**

**Tese submetida à banca examinadora em 06 de julho de 2017 como  
parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências  
em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos - UFES

Prof. Dr. Atilio Barbosa Lourenço- IFES

Prof. Dr. Rogério José da Silva - UNIFEI

Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas - UNIFEI

Prof. Dr. Arnaldo Martín Martínez Reyes - UNIFEI

Prof. Dr. Osvaldo José Venturini (Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. José Carlos Escobar Palacio (Co-Orientador) – UNIFEI

**Julho de 2017  
Itajubá**

## DEDICATÓRIA

*Ao meu Deus Todo-Poderoso por tudo o que tem me dado,  
à minha esposa, Yuleimys Paola Escorcia Sierra, pelo seu amor incondicional,  
aos meus filhos, Camilo José, Samuel José e Sara Sofia, por fazer girar meu mundo.  
à minha mãe Emi, pelo esforço de educar seus filhos, e ser mãe e pai ao mesmo tempo,  
ao meu irmão Gerardo, que tem sido a música na minha vida,  
ao meu avô José del Rosario Rúa (in memoriam) por tudo o que me ensinou,  
aos meus tios, tias, primos e sobrinhos pelos bons momentos,  
aos meus amigos.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Ao meu orientador, Prof. Osvaldo José Venturini por me dar a oportunidade de trabalhar com ele.*

*Ao meu Co-Orientador, Prof. José Carlos Escobar Palácio, por todo seu apoio durante meu Doutorado.*

*Aos colegas e professores do NEST pela colaboração durante todo este tempo.*

*Aos meus amigos e conterrâneos pelo companheirismo.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro, através do Programa de bolsas. Da mesma forma agradeço ao projeto APQ-02763-16 – FAPEMIG.*

*Muito Obrigado!*

*"A ciência é uma maneira de pensar, muito mais do que um conjunto de conhecimentos."*

*Carl Sagan*

## RESUMO

**RÚA, O.D.J. (2017).** Operadores Exergéticos: uma Nova Abordagem de Diagnóstico Termoeconômico para Identificar Anomalias Intrínsecas em Ciclos Térmicos de Potência.

Nesta tese uma nova abordagem de diagnóstico termoeconômico é apresentada. A abordagem integra a formulação matemática do método de diagnóstico termoeconômico do impacto no combustível com dois novos conceitos: “Operador exergético” e “Estrutura de Transição” para atingir os três aspectos principais do diagnóstico termoeconômico, que são: detecção, identificação e quantificação das anomalias intrínsecas com uma aplicabilidade geral a qualquer ciclo térmico de potência, dentro de uma complexidade moderada e sem requerer um conhecimento a priori das anomalias. A nova abordagem dos operadores exergéticos permite desagregar o impacto no consumo de combustível de cada equipamento de um ciclo térmico em seus três componentes: anomalia intrínseca, anomalia induzida e disfunção, permitindo identificar o equipamento degradado e seus impactos. Para mostrar o seu funcionamento, a metodologia dos operadores exergéticos é aplicada inicialmente a um sistema hipotético simples e logo a um ciclo com turbina a gás de queima externa EFGT para testar sua efetividade na presença de mais de uma anomalia intrínseca. Para estes dois casos, a metodologia é complementada usando redes de neurônios artificiais. As RNA foram programadas no software comercial MatLab<sup>®</sup>. Logo, a metodologia é aplicada a um ciclo Rankine de potência para testar sua capacidade de identificar anomalias em equipamentos dissipativos, assim como a possibilidade de ser usado com diferentes modelos termoeconômicos. Por último, o diagnóstico usando operadores exergéticos é aplicado ao ciclo combinado do que é conhecido como o problema TADEUS para que possa ser comparado com outras abordagens que têm sido testadas neste ciclo combinado. Nestes dois últimos casos, não foram utilizadas as RNA. Os ciclos EFGT, Rankine e Combinado, e todos os dados necessários para aplicar a metodologia, foram simulados utilizando o software comercial GateCycle<sup>™</sup>. A abordagem proposta nesta tese foi capaz de identificar anomalias intrínsecas, anomalias induzidas e disfunções, e calcular o impacto destas três componentes no consumo adicional de combustível, em todos os casos que foram testados. Foi mostrado, também, que, quando existem degradações em um ou vários dos componentes de um ciclo térmico de potência, os valores obtidos para as anomalias intrínsecas são independentes do modelo termoeconômico usado.

**Palavras chave:** *anomalias intrínsecas, diagnóstico termodinâmico, estrutura de transição, impacto no combustível, operador exergético.*

# ABSTRACT

**RÚA, O.D.J. (2017).** Exergetic Operators: a Novel Thermoeconomic Diagnostic Approach to Identify Intrinsic malfunctions in Power Thermal Cycles.

In this thesis a novel approach to thermoeconomic diagnosis is presented. The approach integrates the thermoeconomic method with two new concepts: "Exergetic Operator" and "Transition Structure" to reach the three main aspects of thermoeconomic diagnosis that are: detection, identification and quantification of intrinsic malfunctions with a general applicability to any thermal system, with a moderate complexity and without requiring an a priori knowledge of the malfunctions. The novel approach of exergetic operators allows to disaggregate the fuel impact of each equipment of a thermal cycle, in its three components: intrinsic malfunction, induced malfunction and dysfunction, allowing to identify the equipment degraded and its fuel impact. In order to show its operation, the methodology of exergetic operators is applied initially to simple hypothetical system and soon to an externally fired gas turbine EFGT to test its effectiveness in the presence of more of one intrinsic malfunction. For these two cases, the methodology is complemented using Artificial Neural networks. ANNs were programmed in commercial software MatLab<sup>®</sup>. Therefore, the methodology is applied to a cycle Rankine of power for tests his ability to identify intrinsic malfunctions in dissipative equipment, as well as the possibility of being used with different thermoeconomic models. Finally, the diagnosis using exergetic operators is applied to the combined cycle of what is known as the TADEUS problem so that it can be compared with other approaches that have been tested in this combined cycle. The EFGT, Rankine and combined cycle, and all the data necessary to apply the methodology, were simulated using commercial software GateCycle<sup>™</sup>. The approach proposed in this thesis was able to identify intrinsic malfunctions, induced malfunctions and dysfunctions, and to calculate the impact of these three components on the additional consumption of fuel, in all cases that were tested. It was also shown that when there are degradations in one or more of the components of a power thermal cycle, the values obtained for the intrinsic malfunctions are independent of the thermoeconomic model used.

**Keywords:** *exergetic operator, fuel impact, intrinsic malfunction, thermodynamic diagnosis, transition structure.*

## Sumário

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xxi
SIMBOLOGIA.....	xxv
Letras Latinas.....	xxv
Letras Gregas .....	xxvi
Sobrescritos.....	xxvii
Subscritos.....	xxvii
Abreviaturas.....	xxvii
Siglas.....	xxvii
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Justificativa .....	5
1.2. Objetivo Geral.....	7
1.3. Objetivos específicos .....	8
1.4. Organização .....	8
CAPÍTULO II.....	10
2. DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO E REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS .....	10
2.1. DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO .....	10
2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO.....	11
2.3. FORMULAS MATEMÁTICAS PARA O DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO CONVENCIONAL.....	25
2.3.1. A Fórmula do impacto no combustível .....	28
2.3.2. Anomalia e disfunção .....	29

2.4. REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS (RNA).....	44
2.4.1. Caraterísticas das RNA.....	44
CAPÍTULO III .....	49
3. DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM PROPOSTA .....	49
CAPÍTULO IV .....	73
4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA A UM CICLO COM TURBINA A GÁS DE QUEIMA EXTERNA .....	73
4.1. DESCRIÇÃO DO CICLO EFGT .....	73
4.2. ELABORAÇÃO DA ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO DO CICLO EFGT.....	75
4.3. RESULTADOS: ANOMALIAS INTRÍNSECAS .....	78
4.3.1. Caso 1. Compressor com <b>MFint</b> .....	80
4.3.2. Caso 2. Turbina com <b>MFint</b> .....	84
4.3.3. Caso 3. Queimador com <b>MFint</b> .....	87
4.3.4. Caso 4. Trocador de calor com <b>MFint</b> .....	90
4.3.5. Caso 5. Compressor e turbina com <b>MFint</b> .....	93
4.3.6. Caso 6. Compressor e queimador com <b>MFint</b> .....	96
4.3.7. Caso 7. Compressor e trocador de calor com <b>MFint</b> .....	99
4.3.8. Caso 8. Turbina e queimador com <b>MFint</b> .....	102
4.3.9. Caso 9. Turbina e trocador de calor com <b>MFint</b> .....	105
4.3.10. Caso 10. Queimador e trocador de calor com <b>MFint</b> .....	108
4.3.11. Caso 11. Compressor, turbina e queimador com <b>MFint</b> .....	111
4.3.12. Caso 12. Compressor, turbina e trocador de calor com <b>MFint</b> .....	115
4.3.13. Caso 13. Compressor, queimador e trocador de calor com <b>MFint</b> .....	118
4.3.14. Caso 14. Turbina, queimador e trocador com <b>MFint</b> .....	121
4.3.15. Caso 15. Compressor, turbina, queimador e trocador de calor com <b>MFint</b>	124
CAPÍTULO V .....	128

5. OPERADORES EXERGÉTICOS, EQUIPAMENTOS DISSIPATIVOS E DESAGREGAÇÃO DA EXERGIA .....	128
5.1. Descrição do ciclo Rankine de potência utilizado .....	129
5.2. Aplicação da metodologia de diagnóstico dos operadores exergéticos a um ciclo Rankine de potência usando os modelos termoeconômicos E, E&S e H&S.....	133
5.2.1. Operadores exergéticos e o modelo E (exergia total).....	134
5.2.2. Operadores exergéticos e o modelo E&S.....	136
5.2.3. Operadores exergéticos e o modelo H&S .....	139
5.3. Algumas considerações sobre o impacto no consumo de combustível .....	143
5.3.1. O impacto dos resíduos no consumo de combustível.....	145
CAPÍTULO VI.....	147
6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DOS OPERADORES EXERGÉTICOS DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO A UM CICLO COMBINADO.....	147
6.1. Descrição do ciclo combinado do problema TADEUS .....	147
CAPÍTULO VI.....	169
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	169
7.1. Conclusões .....	169
7.2. Sugestões .....	170
APÊNDICE A. DADOS PARA TREINAR AS REDES DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA SIMPLES DA SEÇÃO 3.1.4.....	175
APÊNDICE B. PROCEDIMENTO PARA CRIAR, TREINAR E SIMULAR AS REDES DE NEURÔNIOS ARTIFICIAIS (RNA) DO SISTEMA SIMPLES DA SEÇÃO 3.1.4. ....	182
APÊNDICE C. DESCRIÇÃO DAS REDES USADAS PARA SIMULAR UM CICLO EFGT NUM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO .....	200
APÊNDICE D. COMPARATIVA DOS FLUXOS DE EXERGIA PARA O CICLO EFGT TEMDO EM CONTA OU NÃO A EXERGIA QUÍMICA DO AR E GASES DE COMBUSTÃO .....	204
APÊNDICE E. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CICLO RANKINE DE POTÊNCIA MODELO E.....	221

APÊNDICE F. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CICLO RANKINE DE POTÊNCIA MODELO E&S .....	229
APÊNDICE G. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CICLO RANKINE DE POTÊNCIA MODELO H&S.....	237
APÊNDICE H. NOMENCLATURA E FLUXOS DE EXERGIA PARA O DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO DO CICLO COMBINADO TADEUS.....	245
REFERÊNCIAS .....	249

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Compendio das Falhas das principais metodologias de diagnóstico termoeconômico. ....	7
Tabela 2.1. Valor dos fluxos de exergia do sistema térmico hipotético para as condições de referência e real .....	34
Tabela 2.2. Relação de insumos e produtos para os equipamentos do sistema hipotético.....	35
Tabela 2.3. Insumos e produtos dos elementos fictícios da estrutura produtiva do sistema simples.....	36
Tabela 2.4. Insumos e produtos para o sistema hipotético na condição de referência e real. ..	36
Tabela 2.5. Representação simbólica da matriz F-P.....	37
Tabela 2.6. Matriz F-P para a condição de referência .....	37
Tabela 2.7. Matriz F-P para a condição real.....	38
Tabela 2.8. Representação simbólica da matriz KP.....	38
Tabela 2.9. Matriz KP para a condição de referência.....	39
Tabela 2.10. Matriz KP para a condição real.....	39
Tabela 2.11. Matriz unitária, <b>UD</b> , de 7x7.....	39
Tabela 2.12. Matriz <b>KD</b> .para a condição real. ....	40
Tabela 2.13. Matriz de <b>UD – KP</b> para a condição real.....	40
Tabela 2.14. Operador produto <b>P</b> para a condição real.....	40
Tabela 2.15. Matriz ( <b>KD – UD</b> ) para a condição real.....	41
Tabela 2.16. Operador irreversibilidade <b>I</b> para a condição real.....	41
Tabela 2.17. Custos exergéticos dos equipamentos dos sistema simples.....	41
Tabela 2.18. Matriz $\Delta\mathbf{KP}$ .....	42
Tabela 2.19. Matriz de anomalias <b>MF</b> para o sistema estudado. ....	42
Tabela 2.20. Matriz de disfunções.....	43
Tabela 2.21. Anomalias, disfunções e impacto no consumo de combustível para cada componente do sistema em estudo. ....	43
Tabela 3.1. Representação F-P para o sistema simples com OE na condição de referência....	65
Tabela 3.2. Representação F-P para o sistema simples com OE na condição real.....	65
Tabela 3.3. Matriz KP para a condição de referência .....	66
Tabela 3.4. Matriz KP para a condição real.....	66
Tabela 3.5. Matriz unitária UD de 12x12. ....	66

Tabela 3.6. Matriz <b>KD</b> .para a condição real .....	67
Tabela 3.7. Matriz <b>UD – KP</b> para a condição real.....	67
Tabela 3.8. Operador produto <b>P</b> para a condição real.....	67
Tabela 3.9. Matriz ( <b>KD – UD</b> ) para a condição real.....	68
Tabela 3.10. Operador irreversibilidade <b>I</b> para a condição real.....	68
Tabela 3.11. Custos exergeticos dos equipamentos dos sistema simples.....	68
Tabela 3.12. Matriz $\Delta\mathbf{KP}$ .....	69
Tabela 3.13. Matriz de anomalias <b>MF</b> para o sistema estudado. ....	69
Tabela 3.14. Matriz de disfunções.....	70
Tabela 3.15. Anomalias intrínsecas e induzidas, disfunções e impacto no consumo de combustível para um sistema simples. ....	70
Tabela 3.16. Comparativa dos resultados de diagnóstico convencional contra o diagnóstico usando OE. ....	71
Tabela 3.17. Equações usadas para gerar a condições de referência e real, e treinar as RNA para o sistema simples.....	71
Tabela 4.1. Composição do combustível.....	74
Tabela 4.2. Dados de projeto para sistema EFGT .....	75
Tabela 4.3. Insumos e produtos para o ciclo EFGT .....	77
Tabela 4.4. Condição de referência para o ciclo EFGT.....	79
Tabela 4.5. Componentes onde foram simuladas anomalias intrínsecas para cada caso .....	80
Tabela 4.6. Parâmetros termodinâmico e fluxos de exergia para a condição real e a condição esperada para o caso 1 .....	81
Tabela 4.7. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 1.....	81
Tabela 4.8. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 1 .....	82
Tabela 4.9. Parâmetros termodinâmico e fluxos de exergia para a condição real e a condição esperada para o caso 2. ....	85
Tabela 4.10. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 2.....	86
Tabela 4.11. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 2. ....	86
Tabela 4.12. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada: caso 3 .....	88
Tabela 4.13. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 3.....	88

Tabela 4.14. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 3. ....	89
Tabela 4.15. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 4 .....	90
Tabela 4.16. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 4.....	90
Tabela 4.17. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 4. ....	91
Tabela 4.18. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 5 .....	93
Tabela 4.19. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 5.....	94
Tabela 4.20. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 5. ....	94
Tabela 4.21. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 6. ....	96
Tabela 4.22. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 6.....	97
Tabela 4.23. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 6. ....	97
Tabela 4.24. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 7 .....	99
Tabela 4.25. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 7.....	100
Tabela 4.26. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 7. ....	100
Tabela 4.27. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 8 .....	102
Tabela 4.28. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 8.....	103
Tabela 4.29. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 8. ....	103
Tabela 4.30. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 9 .....	105
Tabela 4.31. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 9.....	106
Tabela 4.32. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 9. ....	106
Tabela 4.33. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 10 .....	109

Tabela 4.34. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 10.....	109
Tabela 4.35. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 10. ....	110
Tabela 4.36. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 11 .....	112
Tabela 4.37. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 11.....	113
Tabela 4.38. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 11. ....	113
Tabela 4.39. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 12 .....	115
Tabela 4.40. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 12.....	116
Tabela 4.41. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 12 .....	117
Tabela 4.42. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 13 .....	118
Tabela 4.43. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 13.....	119
Tabela 4.44. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 13. ....	120
Tabela 4.45. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 14 .....	121
Tabela 4.46. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 14.....	122
Tabela 4.47. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 14. ....	122
Tabela 4.48. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 15. ....	125
Tabela 4.49. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 15.....	125
Tabela 4.50. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 15. ....	126
Tabela 5.1. Valores de eficiência dos equipamentos (condição de Referência). Tomado de Secchin (2015).....	130
Tabela 5.2. Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência (condição de referência). Tomado de Secchin (2015).....	130
Tabela 5.3. Dados do modelo simulado em GateCycle para a condição de referência.....	131

Tabela 5.4. Caso 1: condição com anomalia intrínseca no condensador .....	132
Tabela 5.5. Caso 2: condição com anomalia intrínseca tanto no condensador como na turbina a vapor .....	132
Tabela 5. 6. Condição esperada do caso 1 .....	133
Tabela 5. 7. Condição esperada do caso 2 .....	133
Tabela 5. 8. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 1 e Exergia total .....	135
Tabela 5. 9. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 2 e Exergia total .....	136
Tabela 5. 10. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 1 e modelo E&S .....	138
Tabela 5. 11. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 2 e modelo E&S .....	139
Tabela 5. 12. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 1 e modelo H&S.....	141
Tabela 5. 13. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 2 e modelo H&S.....	142
Tabela 5. 14. Comparativa dos resultados do diagnóstico para os Modelos termoeconômicos E, E&S e H&S. ....	144
Tabela 5. 15. Resultado do diagnóstico por operadores exergeticos para um ciclo EFGT, tendo em conta os residuos.....	146
Tabela 6. 1. Dados de operação para as turbinas a gás 1 e 2 na condição de referência. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006) .....	149
Tabela 6. 2. Dados de operação para as caldeiras de recuperação 1 e 2 na condição de referência. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006) .....	149
Tabela 6. 3. Dados de operação para a turbina a vapor na condição de referência. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006).....	150
Tabela 6. 4. Dados de operação para a turbina a gás 1 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006) .....	150
Tabela 6. 5. Dados de operação para a turbina a gás 2 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006) .....	151
Tabela 6. 6. Dados de operação para a caldeira de recuperação 1 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006).....	151
Tabela 6. 7. Dados de operação para a caldeira de recuperação 2 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006).....	152
Tabela 6. 8. Dados de operação para a turbina a vapor na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006).....	152
Tabela 6. 9. Exergia dos fluxos da estrutura produtiva do ciclo combinado do problema TADEUS .....	163

Tabela 6. 10. Anomalias e disfunções para cada equipamento da estrutura produtiva do problema TADEUS .....	165
Tabela 6. 11. Impacto no consumo de combustível pela variação da potência gerada e resíduos entre a condição de referência e real .....	167
Tabela 6. 12. Consolidação das informações obtidas pelo diagnóstico usando operadores exergeticos .....	168
Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 .....	175
Tabela B.1. Resultados das simulações das RNA do sistema simples .....	199
Tabela D.1. Composição das substâncias usadas pela GateCycle para simular o ciclo EFGT	204
Tabela D.2. Exergia química padrão das substâncias usadas no GateCycle para simular o ciclo EFGT .....	205
Tabela D.3. Fluxos de exergia caso 1 .....	206
Tabela D.4. Resultados do diagnóstico caso 1 .....	206
Tabela D.5. Fluxos de exergia caso 2 .....	207
Tabela D.6. Resultados do diagnóstico caso 2 .....	207
Tabela D.7. Fluxos de exergia caso 3 .....	208
Tabela D.8. Resultados do diagnóstico caso 3 .....	208
Tabela D.9. Fluxos de exergia caso 4 .....	209
Tabela D.10. Resultados do diagnóstico caso 4 .....	209
Tabela D.11. Fluxos de exergia caso 5 .....	210
Tabela D.12. Resultados do diagnóstico caso 5 .....	210
Tabela D.13. Fluxos de exergia caso 6 .....	211
Tabela D.14. Resultados do diagnóstico caso 6 .....	211
Tabela D.15. Fluxos de exergia caso 7 .....	212
Tabela D.16. Resultados do diagnóstico caso 7 .....	212
Tabela D.17. Fluxos de exergia caso 8 .....	213
Tabela D.18. Resultados do diagnóstico caso 8 .....	213
Tabela D.19. Fluxos de exergia caso 9 .....	214
Tabela D.20. Resultados do diagnóstico caso 9 .....	214
Tabela D.21. Fluxos de exergia caso 10 .....	215
Tabela D.22. Resultados do diagnóstico caso 10 .....	215
Tabela D.23. Fluxos de exergia caso 11 .....	216
Tabela D.24. Resultados do diagnóstico caso 11 .....	216

Tabela D.25. Fluxos de exergia caso 12.....	217
Tabela D.26. Resultados do diagnóstico caso 12 .....	217
Tabela D.27. Fluxos de exergia caso 13.....	218
Tabela D.28. Resultados do diagnóstico caso 13 .....	218
Tabela D.29. Fluxos de exergia caso 14.....	219
Tabela D.30. Resultados do diagnóstico caso 14 .....	219
Tabela D.31. Fluxos de exergia caso 15.....	220
Tabela D.32. Resultados do diagnóstico caso 15 .....	220
Tabela E1.1. Matriz F-P na condição de referência para o Caso 1.....	221
Tabela E1.2. Matriz F-P na condição de real para o Caso 1.....	221
Tabela E1.3. Matriz <KP> na condição de referência.....	222
Tabela E1.4. Matriz <KP> na condição de real.....	222
Tabela E1.5. Operador  P> condição real .....	223
Tabela E1.6. Matriz Operador  I> na condição real .....	223
Tabela E1.7. Matriz $\Delta$ < KP> .....	224
Tabela E1.8. Matriz de anomalias .....	224
Tabela E1.9. Matriz de Disfunções .....	225
Tabela E2.1 Matriz F-P na condição de real para o Caso 2.....	225
Tabela E2.2 Matriz <KP> na condição de real.....	226
Tabela E2.3 Operador  P> condição real .....	226
Tabela E2.4 Matriz Operador  I> na condição real .....	227
Tabela E2.5 Matriz $\Delta$ < KP> .....	227
Tabela E2.6 Matriz de anomalias .....	228
Tabela E2.7 Matriz de Disfunções .....	228
Tabela F1.1. Matriz F-P na condição de referência para o Caso 1 .....	229
Tabela F1.2. Matriz F-P na condição de real para o Caso 1 .....	229
Tabela F1.3. Matriz <KP> na condição de referência.....	230
Tabela F1.4. Matriz <KP> na condição de real.....	230
Tabela F1.5. Operador  P> condição real .....	231
Tabela F1.6. Matriz Operador  I> na condição real.....	231
Tabela F1.7. Matriz $\Delta$ < KP> .....	232
Tabela F1.8. Matriz de anomalias .....	232
Tabela F1.9. Matriz de Disfunções.....	233

Tabela F2.1. Matriz F-P na condição de real para o Caso 2.....	233
Tabela F2.2. Matriz <KP> na condição de real.....	234
Tabela F2.3. Operador  P> condição real.....	234
Tabela F2.4. Matriz Operador  I> na condição real.....	235
Tabela F2.5. Matriz $\Delta$ < KP>.....	235
Tabela F2.6. Matriz de anomalias.....	236
Tabela F2.7. Matriz de Disfunções.....	236
Tabela G1.1. Matriz F-P na condição de referência para o Caso 1.....	237
Tabela G1.2. Matriz F-P na condição de real para o Caso 1.....	237
Tabela G1.3. Matriz <KP> na condição de referência.....	238
Tabela G1.4. Matriz <KP> na condição de real.....	238
Tabela G1.5. Operador  P> condição real.....	239
Tabela G1.6. Matriz Operador  I> na condição real.....	239
Tabela G1.7. Matriz $\Delta$ < KP>.....	240
Tabela G1.8. Matriz de anomalias.....	240
Tabela G1.9. Matriz de Disfunções.....	241
Tabela G2.1. Matriz F-P na condição de real para o Caso 2.....	241
Tabela G2.2. Matriz <KP> na condição de real.....	242
Tabela G2.3. Operador  P> condição real.....	242
Tabela G2.4. Matriz Operador  I> na condição real.....	243
Tabela G2.5. Matriz $\Delta$ < KP>.....	243
Tabela G2.6. Matriz de anomalias.....	244
Tabela G2.7. Matriz de Disfunções.....	244
Tabela H.1. Nomenclatura usada no diagnóstico termoeconômico do Ciclo Combinado TADEUS.....	245
Tabela H.2. Fluxos de exergia para o diagnóstico termoeconômico do Ciclo Combinado TADEUS.....	247

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. a) Curva de desempenho; b) Curva de operação.....	2
Figura 2.1. Representação de $\omega$ e $\sigma$ no plano h-s adaptado de Zaleta-Aguilar, Royo e Valero (1997) .....	16
Figura 2.2. Características das condições de trabalho .....	21
Figura 2.3. Esquema de diagnóstico convencional.....	32
Figura 2.4. Sistema térmico hipotético. Adaptado de Rúa Orozco (2013).....	34
Figura 2.5. Representação gráfica da estrutura produtiva do sistema hipotético. ....	35
Figura 2.6. Princípio de funcionamento de um neurônio artificial.....	45
Figura 2.7. a) Topologia feed-forward e b) topologia recorrente de uma rede de neurônios artificiais. Adaptado de Suzuki (2011).....	46
Figura 3.1. Pontos de operação de um equipamento de um ciclo térmico na condição de referência e na condição real. ....	49
Figura 3.2. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 1. ....	50
Figura 3.3. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 2. ....	50
Figura 3.4. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 3. ....	51
Figura 3.5. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 4. ....	52
Figura 3.6. Curvatura da luz no espaço-tempo de acordo com a teoria da relatividade.....	53
Figura 3.7. Analogia entre os efeitos de uma anomalia e a teoria da relatividade .....	53
Figura 3.8. Efeito de uma anomalia na saída de um equipamento. ....	54
Figura 3.9. a) Ciclo térmico básico na condição de referência. b) Modelos individuais dos equipamentos do ciclo térmico básico na condição de referência.....	55
Figura 3.10. a) Ciclo térmico básico na condição real com anomalias no equipamento A. b) Modelos individuais dos equipamentos do ciclo térmico básico com as mesmas entradas dos equipamentos do ciclo térmico básico na condição de teste. ....	56
Figura 3.11. Desagregação dos efeitos das anomalias sobre a saída do equipamento A na condição real. Adaptado de Rúa, Escobar e Venturini (2013) .....	56
Figura 3.12. Estrutura de transição (ET) para um sistema simples na condição real. ....	57

Figura 3.13. Representação EQUIP-OE para o equipamento A na condição de referência. Adaptado de Rúa, Escobar e Venturini (2013).....	58
Figura 3.14. Estrutura de transição (ET) para um sistema simples na condição de referência.	58
Figura 3.15. Esquema de diagnóstico proposto.....	61
Figura 3.16. Efeito de uma anomalia na saída de um equipamento considerando os OE.....	62
Figura 3.17. Esquema da estrutura produtiva baseada na estrutura de transição da Fig.3.12. .	64
Figura 4.1. Turbina a gás de queima externa. Adaptado de Kautz e Hansen (2007) .....	73
Figura 4.2. Estrutura de transição para o ciclo EFGT .....	75
Figura 4.3. Estrutura produtiva do ciclo EFGT baseada na estrutura de transição .....	77
Figura 4.4. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 1 .....	83
Figura 4.5. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 1.....	84
Figura 4.6. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 2.....	87
Figura 4.7. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 2.....	87
Figura 4.8. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 3.....	89
Figura 4.9. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 3.....	90
Figura 4.10. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 4.....	92
Figura 4.11. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 4.....	92
Figura 4.12. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 5.....	95
Figura 4.13. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 5.....	95
Figura 4. 14. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 6.....	98
Figura 4.15. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 6.....	98
Figura 4.16. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 7.....	101
Figura 4.17. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 7.....	101
Figura 4.18. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 8.....	104
Figura 4.19. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 8.....	105
Figura 4.20. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 9.....	107
Figura 4.21. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 9.....	108
Figura 4.22. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 10.....	111
Figura 4.23. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 10.....	111
Figura 4.24. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 11.....	114
Figura 4.25. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 11.....	115
Figura 4.26. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 12.....	117
Figura 4.27. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 12.....	118

Figura 4.28. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 13.....	120
Figura 4.29. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 13.....	121
Figura 4.30. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 14.....	123
Figura 4.31. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 14.....	124
Figura 4.32. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 15.....	127
Figura 4.33. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 15.....	127
Figura 5.1. Estrutura Física do Ciclo Rankine de Potência. Tomado de Santos (2009) .....	130
Figura 5.2. Estrutura de transição para um ciclo Rankine de potência .....	134
Figura 5.3. Estrutura produtiva para um ciclo Rankine de potência para o modelo E. ....	134
Figura 5.4. Estrutura produtiva para um ciclo Rankine de potência para o modelo E&S.....	137
Figura 5.5. Estrutura produtiva para um ciclo Rankine de potência para o modelo H&S. ....	140
Figura 6.1. Ciclo combinado do problema TADEUS. Adaptado de Lazzaretto et al.(2006). 148	
Figura 6.2. Esquema do ciclo combinado do problema TADEUS simulado no GateCycle. .	153
Figura 6.3. Estrutura de Transição para a turbina a gás 1 (TADEUS). ....	154
Figura 6.4. Estrutura de Transição para a turbina a gás 2 (TADEUS). ....	155
Figura 6.5. Estrutura de Transição para a turbina a vapor e caldeira de recuperação 1 (TADEUS). ....	156
Figura 6.6. Estrutura de Transição para caldeira de recuperação 2 (TADEUS). ....	157
Figura 6.4. Estrutura produtiva da Turbina a Gás 1 .....	158
Figura 6.5. Estrutura de produção da Turbina a Gás 2 .....	159
Figura 6.6. Estrutura produtiva da Turbina a vapor .....	160
Figura 6.7. Estrutura produtiva da HSRG1 .....	161
Figura 6.8. Estrutura produtiva da HSRG2 .....	162
Figura 7.1. Estrutura de transição usando OE e sub-OE para um ciclo EFGT .....	172
Figura B.1. Tela principal do arquivo TAB-SIMPLES.xlsx. ....	182
Figura B.2. <i>Command Window</i> do Matlab .....	183
Figura B.3. Tela principal de <i>Neural Network/Data Manager (nntool)</i> . ....	184
Figura B.4. Tela principal de <i>Import to Network/Data Manager</i> . ....	184
Figura B.5. Tela principal de <i>nntool</i> com estradas e saídas. ....	185
Figura B.6. Tela principal de <i>Create Network or Data</i> . ....	185
Figura B.7. Tela principal de <i>Create Network or Data</i> com os dados assignados. ....	186
Figura B.8. Vista da rede criada para o equipamento A. ....	186
Figura B.9. Tela principal de <i>nntool</i> com estradas e saídas e redes. ....	187

Figura B.10. Tela principal para a rede do equipamento A.....	187
Figura B.11. Tela para treinar a rede do equipamento A. ....	188
Figura B.12. Tela principal de <i>Neural Network Training</i> . ....	188
Figura B.13. Pesos da primeira camada do equipamento A.....	189
Figura B.14. Pesos da Segunda Camada do Equipamento A .....	189
Figura B.15. Bias da primeira camada do equipamento A.....	190
Figura B.16. Bias da segunda camada do equipamento A. ....	190
Figura B.17. Esquema da rede do Equipamento B.....	191
Figura B.18. Pesos da primeira camada do Equipamento B. ....	191
Figura B.19. Pesos da segunda camada do Equipamento B.....	192
Figura B.20. Bias da primeira camada do equipamento B .....	192
Figura B.21. Bias da Segunda camada do equipamento B.....	193
Figura B.22. Esquema da rede para o equipamento C. ....	193
Figura B.23. Pesos da primeira camada do Equipamento C .....	194
Figura B.24. Pesos da segunda camada do Equipamento C.....	194
Figura B.25. Bias da primeira camada do Equipamento C. ....	195
Figura B.26. Bias da segunda camada do Equipamento C.....	195
Figura B.27. Tela principal do arquivo SIM-SIMPLES.xlsx.....	196
Figura B.28. Tela principal de <i>nntool</i> com dados para simular as RNA.....	197
Figura B.29. Mensagem que indica sucesso na simulação de uma RNA.....	197
Figura B.30. Tela principal de <i>nntool</i> com todos os resultados das simulações .....	198
Figura B.31.. <i>Export from Network</i> de Matlab. ....	198
Figura B.32.. Saídas das RNA para A, B e C no <i>MATLAB workspace</i> . ....	199
Figura C.1. Esquema da RNA para o compressor.....	200
Figura C.2. Esquema da RNA para a turbina .....	201
Figura C.3. Esquema da RNA para o queimador .....	202

# SIMBOLOGIA

## Letras Latinas

A	Coeficiente	
A*	Equipamento sem anomalia	
B	Coeficiente	
b	Bias de um neurônio artificial	
D	Operador exergético	
<b>DF</b>	Matriz de disfunções	
E	Fluxo de exergia	kW
E*	Custo exergético	
ENT	Número de entradas de uma rede de neurônios artificiais	
ET	Estrutura de transição	
F	Insumo ( <i>Fuel</i> )	kW
<i>f</i>	Fator de desempenho; fator de correção; função matemática	
h	Entalpia específica	kJ/kg
<i>HR</i>	Consumo específico de calor ( <i>Heat Rate</i> )	kJ/kWh
I	Irreversibilidade	kW
<i>I</i> )	Matriz auxiliar de cálculo de custos	
<i>k</i> *	Custo exergético unitário	
<i>k</i> * <sub><i>p,i</i></sub>	Custo exergético unitário dos produtos de cada componente	
⟨ <b>KP</b> ⟩	Matriz de consumos exergéticos associados aos produtos	
⟨ <b>KR</b> ⟩	Matriz de consumos exergéticos associados aos resíduos	
<i>m</i>	Fluxo mássico	kg/s
<b>MF</b>	Matriz de anomalias	
n	Número de componentes ou variáveis	
NNO	Número de neurônios na camada oculta de uma rede de neurônios artificiais	
NPT	Número de parâmetros de treinamento de uma rede de neurônios artificiais	
OE	Operador exergético	
P	Pressão//Produto// Potência	bar//kW//kW
<b>P</b>	Vetor produto	

$P_S$	Vetor produto de contribuição de cada componente na produção global do sistema	
PCI	Poder calorífico inferior	kJ/kg
$\dot{Q}_C$	Capacidade de refrigeração	kW
R	Resíduo	
$ R\rangle$	Operador de resíduos	
s	Entropia específica	kJ/kg-K
SAI	Número de saídas de uma rede de neurônios artificiais	
T	Temperatura	°C
$T_d$	Temperatura de Dissipação	°C
TFR	<i>Throttle Flow Ratio</i>	
$U_D$	Matriz unitária	
$W$	Peso de uma conexão sináptica	
$\dot{W}$	Potência elétrica	kW
$x$	Variável	
$y$	Variável	

## Letras Gregas

$\alpha$	Parâmetro ou coeficiente	
$\beta$	Parâmetro ou coeficiente	
$\Delta$	Mudança ou incremento	
$\eta$	Eficiência	
$\theta$	Coeficientes técnicos de distribuição dos resíduos; Parâmetro interno.	
$\kappa$	Consumo exergético unitário	
$\lambda$	Parâmetro, coeficiente ou fator	
$\sigma$	Diferença de entropia	kJ/kgK
$\emptyset$	Coeficiente de irreversibilidade	
$\Psi$	Indicador ou parâmetro de desempenho	
$\psi$	Coeficientes de resíduos	
$\omega$	Diferença de entalpias	kJ/kg

## Sobrescritos

A	Relativo à condição real
I	Intrínseco
R	Relativo à condição de referência
RNA	Relativo às redes neurais artificiais
S	Superficial
t	Transposta de uma matriz
U	Induzido

## Subscritos

0	Relativo ao ambiente
e	Entrada
i	Contador//relativo ao elemento i
j	Contador//relativo ao elemento j
p	Relativo ao produto//relativo ao ponto de projeto
R	Relativo aos resíduos
s	Saída
T	Térmico//total
x	Parâmetro termoeconômico

## Abreviaturas

DTE	Diagnóstico termoeconômico
Equip-OE	Conjunto equipamento e seus operadores exergéticos
F-P	Insumo - Produto
F-P-R	Insumo – Produto - Resíduo
GE	Gerador elétrico
HRSG	Caldeira de recuperação ( <i>Heat Recover Steam Generator</i> )
RNA	Redes neurais artificiais

## Siglas

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineer</i>
------	--

CCGT	Ciclo Combinado com Turbina a Gás
ECOS	International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems
EFGT	<i>Externally fired gas turbine</i>
HP	Alta Pressão ( <i>Hight Pressure</i> )
HTHE	<i>High Temperature Heat Exchanger</i>
IEM	Instituto de Engenharia Mecânica
IGCC	<i>Integrated gasification combined cycle</i>
IGV	Palhetas variáveis do sistema diretor de entrada do compressor ( <i>Inlet Guide Vanes</i> )
IP	Media Pressão ( <i>Intermediate Pressure</i> )
LP	Baixa Pressão ( <i>Low Pressure</i> )
NEST	Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
SCR	Redução Catalítica Seletiva
TADEUS	<i>Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy Utility Systems</i>
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

# CAPÍTULO I.

## 1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista econômico, durante a sua operação, as usinas termelétricas precisam manter ou melhorar a sua eficiência, a fim de consumir uma quantidade igual ou menor de combustível para os mesmos níveis de produção. Porém, alterações nas condições ambientais, programação inadequada do sistema de controle e anomalias internas nos equipamentos causam um aumento no consumo de recursos pelo sistema (REMIRO; LOZANO, 2007) e, conseqüentemente maiores custos de produção. **As anomalias (MF)**, por exemplo, fazem com que o sistema precise de mais insumo (combustível) para cada unidade de produto (potência gerada), o que representa uma redução na eficiência do sistema (PACHECO-IBARRA et al., 2007).

O conceito de anomalia usado nesta tese significa uma queda no desempenho de um equipamento de um sistema térmico. Para um equipamento dado, uma queda no seu desempenho podem ser intrínseca ou induzida, dependendo se é causada por uma degradação interna ou por fatores externos, respectivamente. Para um melhor entendimento do fenômeno, um exemplo simples, usando funções matemáticas, é apresentado a seguir.

Considere-se que a função da Eq.(1.1) representa a relação que existe entre uma variável de entrada ( $x$ ) para um equipamento dado e a sua saída ( $y$ ), onde o coeficiente  $A$  relaciona as duas variáveis e é determinado pela geometria, materiais, configuração, etc. do equipamento em questão.

$$y = Ax^3 \tag{1.1}$$

Agora, de forma arbitrária, é definido o **parâmetro de desempenho** apresentado na Eq (1.2), como o quociente entre  $y/x$ . O parâmetro de desempenho é definido pela pessoa ou pessoas encarregadas da vigilância da eficiência de um sistema e serve para comparar o comportamento de um equipamento ou sistema com relação ao mesmo parâmetro numa condição de referência. Quando um parâmetro de desempenho é usado para o diagnóstico de um sistema é chamado de **parâmetro de diagnóstico**.

$$f = \frac{y}{x} = \frac{Ax^3}{x} = Ax^2 \tag{1.2}$$

A curva gerada para um parâmetro de desempenho  $f$  para vários pontos de operação (variando  $x$  a longo da sua faixa de operação) é conhecida como **curva de desempenho**, como mostrado na Figura 1.1a, e representa o comportamento do componente para os possíveis pontos de operação. Uma curva de operação é definida da Eq.(1.1), isto é, uma curva que relaciona  $x$  e  $y$ , como mostrado na Figura 1.1b. Uma **curva de operação** fornece o comportamento de um equipamento (ou sistema) ao longo dos seus possíveis pontos de operação, mas não fornece informação “direta” sobre o desempenho do equipamento para cada ponto, como sim é o caso da curva de desempenho.

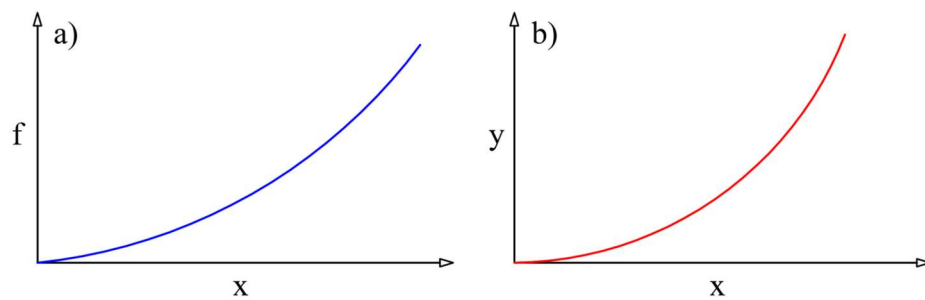


Figura 1.1. a) Curva de desempenho; b) Curva de operação.

Considere-se agora uma condição de referência, onde  $x$  toma o valor de  $x_1$ . Neste caso o fator de desempenho é dado pela Eq. (1.3).

$$f^{Ref} = Ax_1^2 \quad (1.3)$$

Agora se considera que o equipamento apresenta uma degradação que faz com que o coeficiente  $A$  mude para  $B$ , onde  $B \neq A$ . Se a variável de entrada  $x$  é mantida no mesmo valor da condição de referência ( $x_1$ ), a nova condição gerada é chamada de condição real, e é representada matematicamente pela Eq.(1.4).

$$f^{Real} = Bx_1^2 \quad (1.4)$$

Combinando-se as equações (1.3) e (1.4) obtém-se a Eq.(1.5).

$$f^{Real} = \frac{B}{A} f^{Ref} \quad (1.5)$$

Dado que  $B \neq A$ , então  $B/A \neq 1$  e  $f^{Real} \neq f^{Ref}$ . A diferença entre o valor do parâmetro de

desempenho entre a condição de referência e real representa uma **anomalia intrínseca**:  $MF_{int} = f^{Real} - f^{Ref}$ , isto é, uma variação no parâmetro de desempenho do equipamento causado por uma degradação interna.

Agora se considera que devido a fatores externos, a entrada  $x$  muda seu valor de  $x_1$  (na condição de referência) para  $x_2$  numa nova condição que será chamada novamente de condição real. Aqui não existem anomalias do tipo intrínseca. Assim, o coeficiente  $A$  não muda. A Eq. (1.6) define, agora, a condição real para  $x_1 \neq x_2$ .

$$f^{Real} = Ax_2^2 \quad (1.6)$$

Combinando-se as equações (1.3) e (1.6) obtém-se a Eq.(1.7).

$$f^{Real} = \frac{x_2^2}{x_1^2} f^{Ref} \quad (1.7)$$

Como  $x_1 \neq x_2$ , então  $\frac{x_2^2}{x_1^2} \neq 1$  e  $f^{Real} \neq f^{Ref}$

A diferença entre o valor do parâmetro de desempenho entre a condição de referência e real representa uma **anomalia induzida**:  $MF_{ind} = f^{Real} - f^{Ref}$ , já que é causada por fatores externos ao equipamento.

Outro conceito que será usado nesta tese é o conceito de disfunção, que será tratado na seção 2.3.2, já que para seu entendimento é necessário que sejam antes introduzidos os conceitos de insumo e produto para um equipamento de um sistema térmico.

Para um sistema térmico, o impacto das anomalias é dado de duas maneiras: (i) redução da potência e, portanto, aumento da quantidade de recursos fornecidos para o sistema por unidade de potência (ou potência e calor caso seja um sistema de cogeração) e (ii) se a produção permanece constante, a falha provoca um aumento do consumo de combustível.

Os sistemas de **diagnóstico termodinâmico**, incluindo o termoeconômico, são classificados dentro da categoria de diagnóstico preliminar, pois indicam quais são os componentes deteriorados e não a causa raiz do problema (ARRIETA, 2006). O diagnóstico termodinâmico é considerado diagnóstico termoeconômico por vários autores, embora nem sempre possuam as características da termoeconomia (SILVA, 2009). É recomendável não confundir o diagnóstico termodinâmico com diagnóstico mecânico, uma vez que o mecânico é baseado em análise de vibração, análise de ruído, análise do óleo de lubrificação, etc. Além disso, o

diagnóstico mecânico é usado para detectar a causa raiz do problema (SILVA, 2009).

Com a expressão "**diagnóstico termoeconômico (DTE)**" se identifica o ramo da termoeconomia que visa analisar as condições de funcionamento de um sistema térmico para fornecer as orientações para a economia de energia. Os principais objetivos desta abordagem são: (i) a detecção de possíveis anomalias que afetam a eficiência dos processos produtivos, (ii) a identificação dos componentes onde essas anomalias ocorreram e (iii) sua quantificação (VERDA, 2006). Estes três aspectos: detecção, identificação e quantificação constituem o que é considerado o **problema do diagnóstico termoeconômico** (e não do diagnóstico mecânico). Além destes três aspectos fundamentais o DTE deve ter mais duas características, que são: (i) aplicabilidade geral e complexidade moderada, e (ii) não requer um conhecimento a priori das anomalias. Em outras palavras, o diagnóstico termoeconômico (e também os outros tipos de diagnóstico termodinâmico) é a arte de descobrir anomalias em sistemas térmicos (VALERO et al., 2004b). O diagnóstico termoeconômico aparece como uma ferramenta para: (i) identificar os equipamentos que apresentam anomalias (degradação no seu desempenho) dentro de um sistema energético e (ii) quantificar a proporção que a degradação de um componente é responsável pelo consumo adicional de combustível pelo sistema (VALERO et al., 2004c).

A aplicação do diagnóstico termoeconômico consiste em comparar duas condições de operação de um sistema térmico: a **condição Real** do sistema e uma **condição de referência** (também chamada de "estado de referência") para obter os desvios dos parâmetros de diagnóstico e calcular os efeitos destes desvios no consumo global de recursos. O estado de referência é caracterizado pelo desempenho do sistema sem anomalias, para uma mesma produção e sob as mesmas condições externas (PACHECO-IBARRA et al., 2007). A condição real do sistema é obtida mediante um sistema de monitoramento usando o sistema de instrumentação do sistema térmico. O **estado de referência** vem sendo definido a partir das condições de projeto (ponto de projeto do sistema), condições após o teste de aceitação ou condição após trabalhos de manutenção. O estado de referência também pode ser estabelecido através de um simulador termodinâmico (PACHECO-IBARRA, 2011). Quando a condição de referência é gerada usando um simulador é conveniente que as condições ambientais sejam as mesmas que na condição real, o que eliminaria a influência dos fatores externos, como temperatura ambiente, umidade do ambiente, PCI do combustível, etc., na variação no consumo de recursos.

Nesta tese será chamada de **Condição Real** aquela que representa o sistema contendo anomalias intrínsecas, independentemente se os dados que definem esta condição são obtidos de um sistema de instrumentação de um ciclo térmico de potência real ou são obtidos de uma

condição com anomalias intrínsecas simulada.

Uma vez conhecidas, através do diagnóstico, a degradação dos equipamentos e seu efeito (individual) sobre o consumo adicional de recursos do sistema em relação ao estado de referência deve-se usar essa informação para melhorar o funcionamento do sistema através da incorporação de ações corretivas, isto é, atividades de manutenção (REMIRO; LOZANO, 2007). Uma etapa posterior ao diagnóstico (e que não será tratada nesta tese) é o que é chamado de **Prognóstico**, que consiste fazer uma predição de qual seria o comportamento de um sistema quando uma ou várias anomalias são eliminadas (estado futuro do sistema).

Uma das ferramentas matemáticas que será utilizada nesta tese são as Redes de Neurônios Artificiais (RNA), que são usadas para a construção de modelos de sistemas a partir de um conjunto de dados tipo entrada-saída (TOSH; RUXTON, 2010). As RNA serão tratadas com maior detalhe na Seção 2.4.

## 1.1. Justificativa

A necessidade de contar como uma abordagem de diagnóstico que abarque os três aspectos fundamentais do diagnóstico termoeconômico (detecção, identificação e quantificação) e que cumpra com as condições adicionais (aplicabilidade geral, complexidade moderada e não requerer de um conhecimento a priori das anomalias), fez com que desde os primeiros trabalhos de Cotton e Westcott (1960) até hoje, várias metodologias tenham sido desenvolvidas para resolver o problema do diagnóstico, mas muitas vezes sem conseguir o objetivo ou o atingindo de forma parcial, pois podem apresentar uma ou várias das seguintes limitações:

- O método identifica o equipamento com anomalias, mas não pode determinar seu impacto no consumo de combustível (ROYO; VALERO; ZALETA-AGUILAR, 1997; TOFFOLO; LAZZARETTO, 2004).
- O método falha na presença de mais de uma anomalia intrínseca (ZALETA-AGUILAR et al., 1998a; REINI; TACCANI, 2004).
- O impacto no combustível de cada componente é calculado, mas as anomalias não são separadas matematicamente em intrínsecas e induzidas. Assim, quando as anomalias induzidas são maiores em magnitude que as intrínsecas, na maioria das vezes, não se pode identificar os equipamentos com anomalias intrínsecas. Isto significa que o método não é suficiente para determinar quais são os equipamentos com anomalias intrínsecas (VALERO; CORREAS; SERRA, 1999; TORRES et al., 2002; VERDA, 2006).
- Os resultados do diagnóstico são apresentados como o impacto dos parâmetros de

diagnóstico sobre o consumo de recursos do sistema, porém não se estabelece se estas variações dos parâmetros se devem a anomalias intrínsecas ou anomalias induzidas (REMIRO; LOZANO, 2007; CORREAS; MARTÍNEZ; VALERO, 1999).

- O sistema de diagnóstico é desenvolvido para um sistema térmico específico o que poderia limitar sua aplicação a outros sistemas térmicos (TSALAVOUTAS et al., 2000).
- O método é muito complexo. Por exemplo, Zaleta-Aguilar, Royo e Valero (1997) analisam uma simples anomalia numa seção de turbina a vapor, onde é necessário ter pelo menos seis curvas de desempenho que descrevam o funcionamento da seção da turbina estudada.
- O método permite identificar os equipamentos com degradação intrínseca, mas requer conhecer a priori as anomalias e/ou simular todas as degradações intrínsecas que podem acontecer, o que torna o método muito complexo, além de que seria necessário conhecer o efeito das degradações nos índices de desempenho a priori, o que não tem sentido, já que o objetivo do diagnóstico é descobrir as anomalias (TSALAVOUTAS et al., 2000; VERDA; SERRA; VALERO, 2001, 2002a, 2004; VERDA, 2006). Que sentido tem aplicar o diagnóstico se as anomalias já são conhecidas?
- O método é do tipo qualitativo, isto é, permite a identificação de algumas anomalias (embora possam aparecer sinais de anomalias falsas). Outra desvantagem é que, para alguns casos de anomalias, o valor de impacto no consumo de recursos calculado foi maior do que o impacto real medido. Em outros casos, o valor do impacto calculado foi menor que o medido. (PIACENTINO; TALAMO, 2013).

As características que deveria apresentar uma abordagem de diagnóstico termoeconômico são classificadas em quatro categorias, como apresentado na Tabela 1.1, onde também é mostrado que as principais metodologias de diagnóstico termoeconômico desenvolvidas falham em pelo menos uma destas características. As quatro categorias são: i) Categoria A - Identifica o equipamento com anomalias intrínsecas, inclusive quando existe mais de uma anomalia intrínseca; ii) Categoria B - Calcular o impacto no consumo de combustível ou recursos do sistema; iii) Categoria C - Tem aplicabilidade geral e complexidade moderada e iv) Categoria D - Não requer um conhecimento a priori das anomalias.

Autores como Gay, Macfarland e Divinney (1999), alegam a necessidade de calcular a degradação de cada equipamento da planta como a diferença entre o desempenho real do

equipamento e seu desempenho esperado, mas como saber se o desempenho real de um equipamento é ou não o esperado? Outros autores como Valero, Torres e Lerch (1999), afirmam que para determinar as causas das degradações dos componentes do ciclo é necessário criar uma matriz de anomalias (*Malfunction matrix*), usando um simulador ou usando conhecimento externo adicional, não incluído na teoria estrutural, nem nas teorias termoeconômicas clássicas.

Tabela 1.1. Compendio das Falhas das principais metodologias de diagnóstico termoeconômico.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	Categoria			
	A	B	C	D
(ROYO; VALERO; ZALETA-AGUILAR, 1997)		Não		
(TOFFOLO; LAZZARETTO, 2004)		Não		
(ZALETA-AGUILAR et al., 1998a)	Não			
(REINI; TACCANI, 2004).	Não			
(VALERO; CORREAS; SERRA, 1999)	Não			
(TORRES et al., 2002)	Não			
(VERDA, 2006)	Não			Não
(REMIRO; LOZANO, 2007)	Não			
(CORREAS; MARTÍNEZ; VALERO, 1999)	Não			
(TSALAVOUTAS et al., 2000).			Não	Não
(ZALETA-AGUILAR; ROYO; VALERO, 1997)			Não	
(VERDA; SERRA; VALERO, 2004)				Não
(VERDA; SERRA; VALERO, 2002)				Não
(VERDA; SERRA; VALERO, 2001)				Não
(PIACENTINO; TALAMO, 2013)		Não		

Durante as últimas quatro décadas vários grupos de pesquisa de todo o mundo tem desenvolvido abordagens de diagnóstico com o objetivo de resolver o que é considerado o problema do diagnóstico termoeconômico, enquadrado dentro dos quatro aspectos apresentados na Tabela 1.1. No entanto os resultados não foram 100% satisfatórios. A abordagem proposta pretende auxiliar na solução do problema do diagnóstico para ciclos térmicos de potência, o que faz com que a presente tese tenha uma grande relevância.

## 1.2. Objetivo Geral

Desenvolver uma abordagem de diagnóstico termodinâmico que permita identificar os equipamentos com anomalias intrínsecas, separar as anomalias intrínsecas das anomalias induzidas, calcular o impacto no consumo de combustível ou recursos do sistema causado pelas anomalias intrínsecas, anomalias induzidas e disfunções e que tenha aplicabilidade para qualquer ciclo térmico de potência sem necessitar de um conhecimento prévio das anomalias utilizando a metodologia de diagnóstico do impacto no consumo de combustível.

### 1.3. Objetivos específicos

- Definir a metodologia da nova abordagem de diagnóstico termodinâmico que permita identificar anomalias intrínsecas, anomalias induzidas e disfunções.
- Escolher e modelar, usando o GateCycle, um sistema térmico básico para testar a abordagem de diagnóstico desenvolvida.
- Aplicar a abordagem de diagnóstico para várias condições de operação do sistema básico e analisar os resultados obtidos.
- Aplicar a nova abordagem de diagnóstico a um ciclo Rankine simples para testar a funcionalidade da abordagem na presença de equipamentos dissipativos e para os modelos termoeconômicos E, E&S e H&S.
- Aplicar a abordagem desenvolvida ao problema TADEUS para se ter uma base de comparação com as outras metodologias de diagnóstico de ciclo combinado.

### 1.4. Organização

Além deste primeiro capítulo, onde é apresentada a introdução, assim como os objetivos e a justificativa, esta tese está dividida em mais seis capítulos:

**No Capítulo 2**, apresentam-se os conceitos básicos do diagnóstico termoeconômico, assim, como uma resenha da evolução histórica do diagnóstico termodinâmico com seus trabalhos mais relevantes. Apresenta-se também, toda a formulação matemática do diagnóstico focada na fórmula de impacto no combustível, anomalias e disfunções, que são logo usadas para diagnosticar um sistema simples utilizando o método de diagnóstico termoeconômico convencional. No final do capítulo apresenta-se uma introdução às Redes Neurais Artificiais, que podem ser usadas para complementar o método termoeconômico de diagnóstico.

**O Capítulo 3** traz a descrição da abordagem de diagnóstico proposta, e se apresentam os conceitos de operador exergético e estrutura de transição, é se aplica a nova abordagem ao sistema simples que foi estudado no capítulo 2 complementado com RNA.

**No Capítulo 4** apresentam-se os resultados da aplicação da abordagem de diagnóstico desenvolvida para quando existem varias anomalias intrínsecas num sistema térmico. Neste caso um ciclo com turbina de queima externa (EFGT) é usado como estudo de caso, também complementado com RNA.

**No Capítulo 5** Apresentam-se os resultados de aplicar a abordagem de diagnóstico proposta

num ciclo Rankine de potência para determinar se operadores exergéticos permitem identificar anomalias intrínsecas em equipamentos dissipativos, como o condensador. O diagnóstico é aplicado ao ciclo Rankine usando três modelos termoeconômicos diferentes: Modelo de Exergia Total, Modelo de Exergia Total e Neguentropia e Modelo da Neguentropia como parcela da Exergia. Aqui, os dados necessários para os cálculos são obtidos usando simulações no software GateCycle™. No final do capítulo se introduzem dois novos conceitos: “Impacto no consumo de combustível intrínseco” e “impacto no consumo de combustível induzido”. Também se apresenta uma modificação da equação do impacto no consumo de combustível para calcular o impacto dos resíduos de forma direta.

**No Capítulo 6**, a abordagem proposta nesta tese é usada para diagnosticar um ciclo combinado. Neste caso se usou como estudo de caso o ciclo combinado do problema TADEUS. Novamente, os dados necessários para aplicar a metodologia de diagnóstico são obtidos de simulações feitas no software GateCycle™.

**No Capítulo 7**, finalmente, se apresentam as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Ademais dos capítulos acima descritos, esta tese tem um conjunto de Apêndices, onde se encontram as informações utilizadas nos diferentes cálculos realizados ao longo deste trabalho.

## CAPÍTULO II

### 2. DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO E REDES NEURAS ARTIFICIAIS

#### 2.1. DIAGNÓSTICO TERMOCONOMICO

A termoeconomia baseia-se na combinação da Termodinâmica e da Economia (conceito de custo) para análise de sistemas térmicos visando a melhoria da eficiência no projeto e operação de sistemas térmicos (USÓN; VALERO, 2011) e oferece uma explicação do processo de formação de custos dos fluxos de um sistema energético, que pode ser aproveitada para diagnosticar a operação de um sistema térmico. Embora, o termo termoeconomia tenha sido proposto na década dos 60 por Tribus, Evans (1962), realmente a abordagem termoeconômica do diagnóstico teve seu início na Universidade de Zaragoza, na década de oitenta, com o projeto GAUDEAMO (VALERO et al., 1986).

A exergia é definida como o trabalho máximo que pode ser obtido de uma quantidade de matéria quando esta é levada desde seu estado real, envolvendo apenas a interação com os componentes do meio ambiente, até um estado no qual existe um equilíbrio termodinâmico com o ambiente de referência, através de processos reversíveis (SZARGUT, 1989). O conceito de exergia é muito conveniente para a identificação do potencial de economia energética, porque leva em conta a quantidade e a qualidade da energia. Por sua vez, o custo refere-se à quantidade de recursos necessários para produzir um fluxo material ou de exergia (que é expressa em unidades de energia).

Como os processos reais são irreversíveis, a exergia necessária para obter um produto (custo exergético) é uma função dos processos envolvidos na sua formação. O custo exergético de um produto é o somatório de sua exergia mais a exergia destruída e mais as perdas. Deste modo, ao contrário da energia, a exergia não é conservada num processo real. A exergia na saída ( $E_s$ ) de dado processo (incluindo perdas) é menor do que a exergia na entrada ( $E_e$ ). A diferença é chamada de irreversibilidade (I) (Eq.(2.1)).

$$E_e = E_s + I \quad (2.1)$$

Um conceito fundamental na termoeconômica é o custo exergético (VALERO; LOZANO; MUÑOZ, 1986; VALERO; MUÑOZ; LOZANO, 1986a, 1986b), que é definido, para um fluxo

E, como a quantidade de exergia necessária para produzi-lo, e é representado por  $E^*$ . O desempenho dos componentes é descrito por seu consumo exergético unitário ( $\kappa$ ), ou a quantidade de recursos necessários deste componente para produzir uma unidade de seu produto (CORREAS; MARTÍNEZ; VALERO, 1999; VALERO; TORRES, 2006). O custo exergético unitário é calculado como o quociente entre o custo exergético e a exergia do fluxo (Eq. (2.2)).

$$k^* = \frac{E^*}{E} \quad (2.2)$$

Na análise termoeconômica, em algumas metodologias, a estrutura física do sistema é substituída por uma estrutura produtiva. De acordo com Valero et al., (2004d), a estrutura produtiva de um sistema energético é um conjunto de relações, que definem a interação entre os próprios componentes e o ambiente sobre a base das interações de calor e de trabalho para um estado termodinâmico. Os fluxos dentro da estrutura produtiva são caracterizados, na maioria das vezes, pela sua exergia ( $E$ ). A estrutura produtiva expressa o propósito produtivo de cada um dos subsistemas e da quantidade de recursos necessários para gerar produtos, subprodutos ou resíduos de natureza energética. A estrutura produtiva não é única, podendo haver configurações diferentes para a mesma estrutura física (UCHE, 2000).

## 2.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO DIAGNÓSTICO TERMODINÂMICO

As necessidades de contar uma metodologia para monitorar o desempenho de usinas termelétricas têm levado ao desenvolvimento de metodologias de diagnóstico por parte de vários grupos de pesquisa no mundo. Desde os primeiros trabalhos de Cotton e Westcott, (1960) cada década tem fornecido diferentes abordagens, cada uma tentando resolver as deficiências da abordagem anterior, mas muitas vezes sem conseguir tal objetivo, ou atingindo-o de forma parcial. Neste capítulo são apresentados os trabalhos mais representativos na área do diagnóstico, em ordem cronológica, separando-os em vários períodos.

### ***De 1960 até 1979***

Neste período os trabalhos mais importantes foram “*Methods for Measuring Steam Turbine-Generator Performance*”, ASME 60-WA-139, de 1960, desenvolvido por Cotton e Westcott

(1960), e “*A method for Predicting the Performance of Steam turbine-Generators*” desenvolvido por Spencer, Cotton e Cannon (1974).

Em Cotton e Westcott (1960), por exemplo, para a seção de baixa pressão de uma turbina a vapor, o efeito casado no consumo específico de calor ( $HR$ ) por uma anomalia é calculado usando a Equação (2.3):

$$\Delta HR = \Delta \eta_S \left( 1 - \frac{\dot{m} \cdot \Delta h}{\dot{W}_{Sist}} \right) \quad (2.3)$$

Onde  $\Delta HR$  é a variação no consumo específico de calor,  $\Delta \eta_S$  é a variação na eficiência isentrópica da turbina,  $\dot{m}$  é o fluxo mássico do vapor,  $\Delta h$  é a diferença de entalpia entre a entrada e a saída da seção da turbina e  $\dot{W}_{Sist}$  é a potência líquida gerada pelo sistema. Para as seções de alta pressão e média pressão a expressão se torna um pouco mais complexa.

Por sua vez, Spencer, Cotton e Cannon (1974) fornecem uma metodologia para calcular a eficiência isentrópica de turbinas a vapor acima de 16,5 MW de potência, trabalhando com ou sem reaquecimento. Essas relações são essencialmente empíricas, mas são validadas por vários casos de aplicação prática. Por exemplo, a eficiência isentrópica, para uma condição dada e dependendo da seção (HP, IP ou LP), é calculada usando um valor de eficiência isentrópica de referência, que depende das características da turbina, que logo é corrigido usando fatores, como mostrado na Equação (2.4).

$$\eta_A = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot \dots \cdot f_n \cdot \eta_A^{Ref} \quad (2.4)$$

Onde  $\eta_A$  é a eficiência isentrópica da seção A da turbina a vapor,  $f_1$  até  $f_n$  são fatores de correção que dependem dos fluxos volumétricos, da razão de pressão, das temperaturas, etc. e  $\eta_A^{Ref}$  é a eficiência isentrópica da seção A na condição de referência.

### **De 1980 até 1989**

Neste período surgiu a abordagem termoeconômica de diagnóstico que teve como berço a Universidade de Zaragoza. O primeiro trabalho onde foi aplicada a termoeconomia para a análise de desempenho de um sistema térmico é um artigo apresentado por Valero e colaboradores, em 1986, do que é conhecido como o projeto GAUDEAMO (VALERO et al., 1986). Este trabalho foi desenvolvido entre o ano 1981 e 1986, e seu objetivo era formular e

aplicar um procedimento para análise assistida por computador de testes de desempenho usando auditorias exergeticas automatizadas, plantando assim as “sementes teóricas para o diagnóstico termoeconômico”, como afirma Valero et al., (2004a). Outro trabalho importante foi apresentado por Lozano e Valero (1987), no qual se discute a metodologia usada para definir o teste de desempenho de uma caldeira pertencente a uma usina de 350 MW que usa lignito como combustível. Este trabalho está inserido dentro do sistema GAUDEAMO (VALERO et al., 1986) e constitui uma das primeiras aplicações práticas da teoria do custo exergetico (VALERO; LOZANO; MUÑOZ, 1986).

### ***De 1990 até 1999***

No trabalho apresentado por Gay, Macfarland e Divinney (1999) se faz uma revisão das tecnologias existentes na época relacionadas ao monitoramento do desempenho on-line baseado em modelos matemáticos, assim como os seus benefícios. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos com a instalação do software *EfficiencyMap* para a otimização e monitoramento do desempenho de uma usina real, também se mostram as diferenças entre a análise baseada nos modelos matemáticos e a análise tradicional, e se evidencia a necessidade de calcular a degradação de cada equipamento da planta como a diferença entre o desempenho real do equipamento e seu desempenho esperado. No entanto, muitas vezes esta determinação é relativa, já que é difícil saber, numa base absoluta, se o desempenho é como esperado, mas sim é possível determinar a diminuição do desempenho ao longo do tempo (GAY; MACFARLAND; DIVINNEY, 1999). Uma conclusão importante do trabalho de Gay e colaboradores é que um sistema de monitoramento de desempenho deve ser capaz de identificar alterações de desempenho da ordem de 1%, já que uma degradação de desempenho de 3% geralmente é percebida pelo operador da usina sem a ajuda do sistema de monitoramento de desempenho (GAY; MACFARLAND; DIVINNEY, 1999). Por exemplo, uma variação do consumo específico de calor de 1% para uma unidade de 1000 MW representa um custo adicional anual de 10 milhões de dólares (ZALETA-AGUILAR, 1997).

Um dos principais trabalhos nesta época foi o artigo de Lozano et al. (1994). Neste trabalho os autores se propõem, mediante uma abordagem termoeconômica e através dos conceitos de: “possibilidade técnica de economia de exergia”, anomalias (*malfunctions*) e impacto sobre o consumo de combustível, desenvolver uma teoria para o diagnóstico da operação de sistemas térmicos. Assim, neste artigo uma fórmula para o impacto no consumo de combustível foi desenvolvida (LOZANO et al., 1994).

Em Royo (1994) e Royo e Valero (1995), um novo parâmetro interno  $\theta$  é definido para os componentes dos sistemas térmicos, obtido a partir da trajetória seguida pelos fluxos mássicos no plano h-s. De acordo com estes autores a vantagem de utilizar o parâmetro  $\theta$  sobre os parâmetros internos convencionais (eficiência isentrópica, relação de pressão, perdas de pressão, relação de temperaturas, etc.) é que ele permite uma descrição unificada dos parâmetros internos, além de ser adequado para a caracterização de sistemas térmicos de forma analítica (ROYO; VALERO, 1995).

Para um componente genérico, com fluxos de entrada e saída i e j, respetivamente, seu parâmetro interno ( $\theta$ ) é definido como (Eq. (2.5)):

$$\theta_{ij} = \frac{h_i - h_j}{s_i - s_j} \quad (2.5)$$

Em Royo, Valero e Zaleta-Aguilar (1997), um novo parâmetro chamado de “Temperatura de Dissipação” é definido e caracterizado. Este parâmetro é definido pela Equação (2.6) como o quociente entre a variação da entalpia e a variação da entropia de um fluxo que sai de um componente.

$$T_{dj} = \left( \frac{\partial h_j}{\partial s_j} \right) \Big|_{\text{anomalia}} \quad (2.6)$$

A Temperatura de Dissipação, em conjunto com o parâmetro interno  $\theta$ , que foi definido por Royo (1994) e Royo e Valero (1995), é usada para descrever um sistema energético quando ocorre uma anomalia, assim como também, para mostrar a relevância de uma anomalia num componente, e permitindo analisar a influência de uma anomalia intrínseca na eficiência exergética de um componente.

Em Zaleta-Aguilar et al. (1998a), aplicam-se os conceitos do parâmetro interno  $\theta$  (ROYO, 1994; ROYO; VALERO, 1995; ZALETA-AGUILAR et al., 1998b) junto ao conceito de temperatura de dissipação (ROYO; VALERO; ZALETA-AGUILAR, 1997; ZALETA-AGUILAR et al., 1998b) para calcular os efeitos de várias anomalias intrínsecas na eficiência global de um ciclo Rankine com reaquecimento. Os resultados obtidos são muito próximos dos resultados obtidos mediante um simulador, porém, as diferentes anomalias intrínsecas são aplicadas de forma individual. Assim, neste trabalho não se apresentam resultados para situações onde ocorrem mais de uma anomalia intrínseca no sistema (duas anomalias ou mais de forma simultânea).

Valero, Lozano e Bartolomé (1995, 1996), usam a abordagem termoeconômica para diagnosticar, em tempo real, as causas dos desvios do consumo específico de calor mediante um sistema de supervisão, que funciona em uma usina eléctrica a carvão com uma potência de 350 MW. Segundo os autores, este sistema de diagnóstico era, naquela época, o primeiro sistema de diagnóstico termoeconômico em tempo real de um sistema energético complexo (VALERO; LOZANO; BARTOLOMÉ, 1995).

Valero, Correias e Serra (1999), após fazer uma introdução à teoria termoeconômica, descrevem um sistema real de diagnóstico, que foi desenvolvido para um ciclo combinado com uma potência de 330 MW. Os resultados para o impacto no consumo de combustível são apresentados, mas neste trabalho não é mostrado se o sistema desenvolvido pode identificar os equipamentos com anomalias intrínsecas.

Nos trabalhos de Valero, Lozano e Torres (1990), Valero, Torres e Lerch (1999) e Torres et al. (1999), é proposta e desenvolvida a fórmula do impacto no consumo de combustível como uma ferramenta importante fornecida pela termoeconomia para o problema do diagnóstico. Valero et al. (2004a) discutem a importância da fórmula do impacto do combustível e se apresenta um exemplo. A importância desta fórmula reside no fato de que ela relaciona a variação no consumo de combustível do sistema com a variação do consumo exergético unitário de cada componente e a variação na produção.

Em Arena e Borchiellini (1999), quatro diferentes estruturas produtivas são aplicadas à análise termoeconômica de um ciclo combinado de 700 MW para estabelecer como estas influenciam nos custos exergéticos de cada componente. Os autores deste trabalho concluem que não existe uma regra geral para a escolha da estrutura produtiva apropriada, sendo as características do sistema analisados e a qualidade dos resultados requeridos os fatores principais que definem esta escolha. Neste artigo os resultados do diagnóstico do ciclo combinado não são apresentados. Os autores também afirmam que juntar o condensador com a etapa de baixa pressão da turbina a vapor não pode ser considerado quando se usa a neguentropia para quantificar a função do condensador numa estrutura produtiva, o que tem mais afinidade com a realidade, já que o condensador serve a todo o sistema e não simplesmente à etapa de baixa pressão da turbina. Também ressaltam que a neguentropia permite distribuir o custo associado aos gases de exaustão do sistema. No entanto, o custo global do sistema é o mesmo para as quatro diferentes metodologias discutidas.

Zaleta-Aguilar, Royo e Valero (1997) apresentam a fundamentação para um sistema de diagnóstico *on-line*. Para este fim, uma análise de Segunda lei em conjunto com informações fornecidas pelo fabricante sobre o comportamento do sistema em determinadas condições de

operação (condições de referência) é aplicada para caracterizar os efeitos intrínsecos e induzidos de uma anomalia. O procedimento descrito é aplicado à seção de alta pressão e à seção de reaquecimento de uma turbina a vapor que pertence a uma usina com ciclo regenerativo convencional com uma potência de 350 MW. Os autores introduzem o parâmetro  $\omega$ , definido como a diferença de entalpia, entre as condições de entrada e de saída de cada seção da turbina, respectivamente, e o parâmetro  $\sigma$ , definido como a diferença de entropia, entre as condições de saída e de entrada em cada seção da turbina, respectivamente (Figura 2.1). Os autores constroem um novo plano cartesiano, onde o eixo das abcissas representa a diferença de entropia ( $\sigma$ ) e o eixo das ordenadas representa a diferença das entalpias ( $\omega$ ).

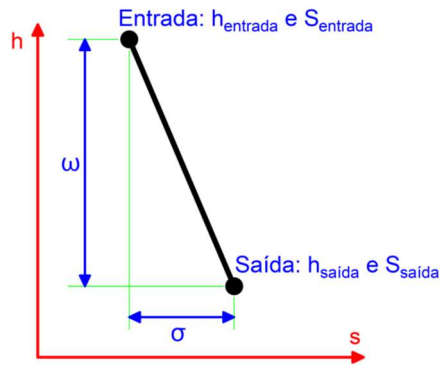


Figura 2.1. Representação de  $\omega$  e  $\sigma$  no plano h-s adaptado de Zaleta-Aguilar, Royo e Valero (1997)

Assim, ao representar o desempenho de cada componente do sistema num plano  $\omega$ -  $\sigma$ , é possível observar as mudanças decorrentes dos efeitos das anomalias. Para tal fim são elaboradas curvas de desempenho no plano  $\omega$ -  $\sigma$  para diferentes condições de operação (garantidas pelo fabricante). Para caracterizar cada condição de operação, além dos parâmetros  $\omega$  e  $\sigma$ , um terceiro parâmetro descritivo é utilizado: o *Throttle Flow Ratio* (TFR) que de acordo com Spencer, Cotton e Cannon (1974), é definido como a relação entre o fluxo mássico real ( $\dot{m}^A$ ) e o fluxo mássico de projeto ( $\dot{m}^P$ ), como mostrado na Equação (2.7).

$$\text{TFR} = \frac{\dot{m}^A}{\dot{m}^P} \quad (2.7)$$

Logo os parâmetros  $\omega$  e  $\sigma$  são calculados para a condição real da usina (dados medidos) e comparados com os valores que deveriam ser obtidos de acordo com as curvas de desempenho para um valor de TFR, que seja comum para as duas condições (ZALETA-AGUILAR; ROYO; VALERO, 1997). A análise dos efeitos da anomalia sobre a seção da turbina estudada torna-se

complexa na medida em que, para analisar uma simples anomalia num componente, é necessário ter várias curvas de desempenho, como são: curva de referência (TFR e potência variável e sem anomalias), curva de desempenho variando a eficiência isentrópica (com TFR constante), curva de desempenho variando a eficiência isentrópica (com potência constante), curva de desempenho quando muda a pressão de entrada (pressão na admissão) na seção da turbina em análise, curva de desempenho quando a temperatura de entrada (na admissão) muda e curva de desempenho quando a contrapressão (pressão na saída) muda.

No ECOS (*International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy systems*), de 1999, Torres et al. (1999) introduzem um método de diagnóstico termoeconômico baseado na Teoria Estrutural da Termoeconomia e na Termoeconomia Simbólica (formulação das variáveis termoeconômicas mediante programas de matemática simbólica). Este trabalho foi publicado em seguida na revista *Energy Conversion and Management*, em 2002 (TORRES et al., 2002). Nestes dois artigos uma análise de anomalias (*malfunction*) e disfunções é feita, fornecendo a formulação matemática para calcular a contribuição das anomalias (irreversibilidades endógenas) e das disfunções (irreversibilidades exógenas) no consumo adicional de combustível, mas as anomalias não são separadas matematicamente em intrínsecas e induzidas e o método não é suficiente para determinar a origem da anomalia. A metodologia apresentada por Torres et al. (1999, 2002), é aplicada a uma planta real de 160 MW de potência e validada usando um simulador da usina (LERCH; ROYO; SERRA, 1999; VALERO et al., 2002c). O impacto das anomalias e disfunções é analisado, assim como comparados os resultados do consumo adicional de combustível obtidos diretamente do simulador e o impacto obtido mediante a Teoria Estrutural da Termoeconomia, obtendo-se resultados similares. Em outro artigo são apresentados os conceitos de anomalia intrínseca e induzida (VALERO; TORRES; LERCH, 1999). Os autores concluem que, para determinar as causas das degradações dos componentes do ciclo, é necessário criar uma matriz de anomalias (*Malfunction matrix*), usando um simulador ou usando conhecimentos externos adicionais não incluídos na teoria estrutural nem nas teorias termoeconômicas clássicas.

No trabalho de Correias, Martínez e Valero (1999) a formulação da Teoria Estrutural é aplicada ao diagnóstico de um ciclo combinado de 280 MW visando estabelecer o impacto da variação de alguns parâmetros internos dos equipamentos do ciclo no consumo de combustível, ao relacionar estes parâmetros internos com o desempenho de cada elemento do ciclo. Mas não fica claro se a variação nos parâmetros se deve a anomalias intrínsecas ou a anomalias induzidas.

### ***De 2000 até 2009***

No trabalho publicado por Gluch e Krzyzanowski (2000) os autores tentam comprovar se é possível diagnosticar um sistema térmico quando os dados medidos não estão completos, seja pela falta ou a distribuição inadequada dos dispositivos de medição, ou também pela impossibilidade, do ponto de vista físico, de fazer a medição. O método de diagnóstico utilizado consiste em simular degradações nos equipamentos mediante a variação sistemática das dimensões geométricas (por exemplo, considerando um aumento de 1 mm nas folgas do sistema de selagem de uma turbina a vapor), para encontrar como estas degradações (simuladas) afetam os parâmetros mensuráveis usados para o diagnóstico. Os sintomas de uma degradação podem ser observados ao comparar os parâmetros de referência (simulados) como os parâmetros medidos.

Em Remiro e Lozano (2007) um algoritmo de cálculo para diagnosticar a operação de uma usina termelétrica é apresentado. Este algoritmo inclui tanto as equações do modelo matemático como as equações do modelo termoeconômico, junto com as técnicas de reconciliação de dados. No final, os resultados do diagnóstico são apresentados como impactos dos parâmetros de diagnóstico sobre o consumo de recursos do sistema, porém não se estabelece se estas variações dos parâmetros se devem a anomalias intrínsecas ou anomalias induzidas.

Tsalavoutas et al. (2000) apresentam um sistema de monitoramento e diagnóstico para uma turbina a gás que inclui validação de dados, análise termodinâmica e análise de vibrações (diagnóstico mecânico). O sistema integra uma série de técnicas de monitoração de acordo com a experiência dos autores, porém o sistema de diagnóstico desenvolvido é específico para turbinas a gás, o que poderia limitar sua aplicação a outros sistemas térmicos.

Para um ciclo de turbina a vapor de uma usina nuclear, Heo e Chang (2005) propõem uma metodologia de diagnóstico baseada na regra da superposição dos fenômenos de degradação que acontecem nos equipamentos do ciclo, que pode ser obtida por álgebra simples e análise de correlação. O modelo matemático para encontrar os componentes com degradação intrínseca é derivado usando a correlação entre os índices de desempenho definidos para os equipamentos e um modelo algébrico. São consideradas três tipos de degradações de desempenho para o  $i$ -ésimo componente do sistema: Intrínseca ( $\Delta\Psi_i^I$ ), induzida ( $\Delta\Psi_i^U$ ) e superficial ( $\Delta\Psi_i^S$ ) que é a soma das duas anteriores. Por exemplo, ao considerar dois componentes  $i$  e  $j$ , cada um deles tem seu próprio índice de desempenho  $\Psi_i$  e  $\Psi_j$  e cada índice de desempenho pode influenciar o índice de desempenho do outro componente. No modelo, assume-se que a influência entre os índices de desempenho por componentes baseia-se numa relação linear de primeira ordem

dentro de valores próximos dos indicadores de desempenho de projeto (Eq. (2.8)):

$$\Psi_j = \beta_{ij} + \lambda_{ij}\Psi_i \quad (2.8)$$

onde  $\lambda_{ij}$  representa a magnitude da degradação induzida pelo componente  $i$  sobre o componente  $j$ , e  $\beta_{ij}$  representa a parcela do índice de desempenho do componente  $j$  que não está associada ao componente  $i$ . Ambos são obtidos por correlação linear.

O método permite identificar os equipamentos com degradação intrínseca, mas para ser aplicado necessita-se de um simulador da usina que seja capaz de simular todas as degradações intrínsecas que poderiam acontecer, o que torna o método complexo, além de ser necessário conhecer o efeito das degradações nos índices de desempenho a priori, o que quase nunca é possível.

Lazzaretto et al., (2006) apresentam uma comparação de quatro abordagens diferentes propostas para resolver o problema chamado de TADEUS: a reconciliação de variáveis de anomalias, o impacto no combustível, o impacto no combustível com filtragem dos efeitos induzidos e a abordagem das curvas características. Os autores expressam que a segunda e terceira abordagem centram-se mais nos efeitos causados pelas anomalias no consumo de recursos, entanto a primeira e a quarta abordagem estão mais focadas na origem das anomalias. Cada uma das quatro abordagens apresenta vantagens, e também desvantagens, que poderiam ser excluídas ao utilizar duas ou mais destas metodologias em conjunto.

Uma série de artigos publicados entre 2002 e 2004 por Antonio Valero e seus colaboradores, baseados no que é conhecido como o problema TADEUS (“*The Thermo-economic Approach To The Diagnosis of Energy Utility Systems*”) (VALERO et al., 2002a, 2002b, 2004c, 2004d; VERDA et al., 2003), tinham como objetivo: (i) propor a unificação de linguagem e as regras para criar uma base comum de trabalho para os pesquisadores interessadas em aplicar o diagnóstico termoeconômico, (ii) integrar as experiências de vários grupo de pesquisadores que trabalham com diagnóstico termoeconômico, (iii) mostrar como, a partir do mesmo conjunto básico de ideias, podem ser desenvolvidas abordagens com características particulares, mas, complementares com as outras abordagens, além de (iv) testar as diferentes abordagens que existiam naquele momento. Valero et al. (2002a, 2004c), apresentam um exemplo de um ciclo combinado com suas características de operação, propriedades termodinâmicas de projeto e estratégia de controle e contendo várias falhas na sua operação para demonstrar a viabilidade prática da abordagem termoeconômica para o diagnóstico de sistemas térmicos que serviria

como base comum para ilustrar as várias abordagens. Nos trabalhos de Valero et al. (2002b, 2004d), são revisados os conceitos de estrutura produtiva e econômica, a equação do impacto do combustível e a análise de anomalias e disfunções. Verda et al., (2003) focam nas características que um sistema de diagnóstico instalado em um ciclo de potência deveria ter, e se trata o conceito de “condição de referência”.

Em outros trabalhos (TOFFOLO; LAZZARETTO, 2004; ZALETA-AGUILAR et al., 2004a; REINI; TACCANI, 2004; VERDA, 2004; CORREAS, 2004), os autores explicam suas metodologias testando-as com o exemplo proposto por Valero et al. (2004c, 2004d).

Para identificar o componente onde a anomalia ocorre, Toffolo e Lazzaretto (2004) alegam a necessidade de utilizar vários indicadores, já que, segundo estes autores, a utilização de indicadores exergéticos e indicadores termoeconômicos não é adequada para a identificação de uma anomalia, porque estas anomalias podem ser detectadas devido à variação de seu consumo exergético unitário ao trabalhar num ponto diferente da sua curva características de desempenho. Toffolo e Lazzaretto (2004) propõem primeiro identificar o componente que apresenta anomalias, e em seguida focar os cálculos neste equipamento de forma separada do resto dos componentes do sistema, e por último calcular um indicador com base na variação das irreversibilidades, mas filtrando o efeito causado pelas variáveis termodinâmicas. O método é capaz de destacar os componentes com anomalias, mas não fornece o impacto no consumo de combustível causado por cada um dos componente do sistema.

Reini e Tacani (2004) desenvolveram um método baseado na comparação do impacto no consumo de combustível causado pelo aumento no consumo exergético unitário dos componentes e o impacto causado pela variação do produto local do mesmo componente. A metodologia pode realçar falhas separadamente, mas quando existem várias falhas simultâneas, a metodologia não é útil.

Verda, Serra e Valero, (2001, 2004) analisam o papel desempenhado pelo sistema de controle na propagação de falhas, assim como a relevância que o sistema de controle tem nos resultados do diagnóstico termoeconômico. Para desenvolver seu método, os autores consideram que quando uma anomalia ocorre em um componente (anomalia intrínseca) este requer uma quantidade maior de combustível para manter a produção constante. O insumo do componente avariado é geralmente produzido por outros componentes, de modo que eles devem aumentar a sua produção. Se o aumento da produção dos equipamentos não avariados ocorre sem alterar a eficiência, o efeito é chamado de disfunção. Como em geral a eficiência de um equipamento varia de acordo com o ponto de operação, os equipamentos não avariados (trabalhando fora do ponto de projeto) experimentam uma mudança de sua eficiência. Este efeito é chamado de uma

anomalia induzida. Quando acontece uma anomalia, então, se cria um novo estado, onde os parâmetros de operação mudaram, o que faz com que o sistema de controle intervenha para ajustar os parâmetros a valores aceitáveis. Esta nova variação na condição de operação acarreta variação na produção e na eficiência dos componentes, portanto, novas disfunções e anomalias induzidas ocorrem tornando o diagnóstico mais difícil. Verda (2004, 2006), Verda, Serra e Valero, (2002a, 2002b, 2005) e Verda et al. (2004), desenvolveram uma metodologia de diagnóstico para filtrar os efeitos induzidos pelo sistema de controle de uma planta geradora. Para cancelar os efeitos do sistema de controle propõem criar uma condição fictícia obtida matematicamente chamada de “condição livre” caracterizada pelos mesmos parâmetros (set points) da condição de referência, mas contendo as anomalias da condição real (Figura 2.2) (VERDA, 2004, 2006; VERDA; SERRA; VALERO, 2002b, 2002b). Logo se comparam os resultados obtidos ao aplicar a metodologia do diagnóstico termoeconômico entre a condição real e a condição de referência e, entre a condição livre e a condição de referência. Deste modo pode-se distinguir entre anomalias induzidas diretamente associadas com a presença de uma anomalia intrínseca em outro componente e aquelas anomalias que ocorrem como consequência da intervenção do sistema de controle, proporcionando assim, uma imagem mais clara das anomalias reais da planta. A condição livre é um estado fictício, que só pode ser determinado matematicamente utilizando um simulador, que deve ser ajustado com fatores de sensibilidade experimentais (USÓN; VALERO, 2011).

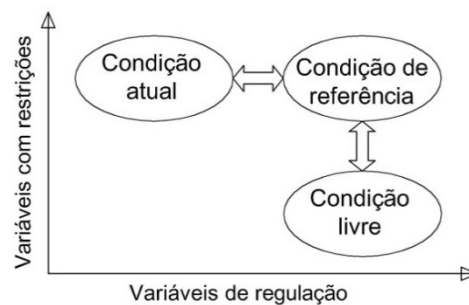


Figura 2.2. Características das condições de trabalho

A principal falha que apresenta esta metodologia é que para criar a condição livre é necessário conhecer a priori as anomalias do sistema, o que não tem sentido já que o objetivo do diagnóstico é descobrir as anomalias. Que sentido tem aplicar o diagnóstico se as anomalias já são conhecidas? A metodologia proposta é testada numa planta de cogeração de 33 MW com turbina a gás. A abordagem é bem-sucedida quando ocorre somente uma avaria. Se ocorrem várias anomalias, Verda (2004, 2006), Verda, Serra e Valero, (2002a, 2002b) propõem filtrar a

dependência entre o consumo exergético unitário e a condição de operação dos componentes (trabalhando *off design*). Estes autores propõem um procedimento de diagnóstico no qual inicialmente o sistema é dividido em macro-componentes, logo se localiza a macro componente onde ocorre a falha, identificando o componente específico no macro componente afetado (VERDA, 2004; VERDA; SERRA; VALERO, 2005), para assim, realizar a análise da história do sistema (VERDA, 2004). Em Verda, Serra e Valero (2002), esta metodologia é aplicada a um ciclo combinado. De acordo com os autores, os efeitos induzidos ocorrem quando um componente sem anomalias funciona numa condição fora de projeto. Do ponto de vista termoeconômico, isto significa que o valor do insumo do componente é diferente do valor de referência. Estes efeitos são eliminados por meio de um modelo termoeconômico dos componentes sem anomalias, onde cada componente é isolado e os seus insumos de referência são artificialmente restaurados. Se existe uma produção diferente do valor de referência, uma anomalia intrínseca está presente. Esta abordagem requer conhecer, além da condição real e a de referência, outras condições para serem utilizadas para avaliar os efeitos do sistema de controle. A utilização de um procedimento de diagnóstico, que filtra os efeitos do sistema de controle, consiste em determinar a condição livre (VERDA; SERRA; VALERO, 2001), ou seja, a condição de operação artificial que ocorreria em uma usina com anomalias se o seu sistema de controle não funciona. Esta condição só pode ser determinada matematicamente. Como já foi comentado, para obter matematicamente a condição livre é necessário conhecer as anomalias que devem ser simuladas. Verda (2006), analisa a informação que pode ser obtida considerando três níveis de precisão no problema do diagnóstico termoeconômico: (i) comparação entre a condição de operação e de referência, (ii) eliminação dos efeitos devido à intervenção do sistema de controle e (iii) eliminação dos efeitos induzidos nos componentes. O autor realiza a eliminação progressiva dos efeitos que impedem uma clara identificação de anomalias que causam a degradação do desempenho na central de ciclo combinado apresentada no problema TADEUS. O primeiro nível do diagnóstico consiste em comparar a condição de operação com a condição de referência. Neste nível, a análise só poderia fornecer algumas informações sobre o macro componente onde ocorreu a anomalia principal. Esta informação deve ser analisada com muito cuidado, pois as anomalias induzidas poderiam ser maiores que as anomalias intrínsecas, pelo que na maioria das vezes não podem ser identificados os equipamentos com degradação. Para resolver esta dificuldade o autor propôs aplicar o procedimento chamado de anamnese, que consiste em calcular os indicadores do sistema térmico para várias condições de operação. Se um parâmetro apresenta um comportamento oscilatório, este comportamento pode ser atribuído aos efeitos induzidos. Em particular, quando

a anamnese é aplicado no primeiro nível de diagnóstico, é possível detectar e eliminar uma anomalia induzida apenas se a sua variação é grande e a oscilação ocorre entre valores positivos e negativos (VERDA, 2006). O segundo nível de diagnóstico consiste em substituir a condição de funcionamento com uma condição fictícia, chamada de condição livre. Este segundo nível apresenta as mesmas falhas que já foram analisadas em Verda, Serra e Valero (2004). Para localizar várias anomalias, quantificar a economia energética obtida pela eliminação de cada uma das anomalias e individualizar as causas, um terceiro nível de precisão é requerido. Para tal fim, é necessária a eliminação dos efeitos induzidos, o que poderia ser efetuado usando modelos de cada um dos componentes isolados do sistema, como foi apresentado no trabalho de Verda, Serra e Valero (2002). O modelo deve prever o produto de cada componente isolado a partir do sistema, de modo que a entrada poderá ser modificada, sem considerar as limitações impostas pelos outros componentes.

Em Verda e Borchiellini (2007) e Verda (2008) o diagnóstico é feito através do desenvolvimento de modelos relacionados com insumos e produtos de cada componente. Verda e Borchiellini (2007) centram seu trabalho na precisão dos dados de medição utilizados, e são aplicados os conceitos de disponibilidade, de impacto do consumo de combustível e de custo exergoeconômico à avaliação das estratégias de controle para uma usina com turbina a gás. Verda (2008) centra seu trabalho na predição do impacto do combustível causada pela anomalia. Zaleta-Aguilar et al. (2004b, 2007), aplicaram a análise termoeconômica para quantificar o impacto do combustível causado pelas anomalias intrínsecas de turbinas a vapor. Estes autores propõe também evitar a utilização de um modelo termoeconômico e realizar uma termo-caracterização.

Zaleta-Aguilar et al. (2004a), propõem um método para reconciliar o *Heat Rate* (HR) e a potência, baseado na utilização de um simulador. As variáveis necessárias para descrever termodinamicamente o modelo podem ser classificadas como dependentes e independentes, e um simulador é capaz de obter todas as variáveis (a descrição completa do sistema), apenas a partir do valor das independentes. O método foi aplicado para o problema TADEUS e é o núcleo dos sistemas de diagnóstico instalados em várias centrais de ciclo combinado no México.

(Correas, 2001, 2004), propõe um algoritmo de diagnóstico que relaciona a variação na eficiência de um sistema térmico com as suas variáveis independentes. Este algoritmo foi aplicado para resolver os problemas TADEUS (CORREAS, 2004), e é utilizado em um sistema de diagnóstico na usina ELCOGAS IGCC em Puertollano, Espanha (CORREAS, 2001; GARCÍA-PEÑA et al., 2000). Este algoritmo é a base da análise quantitativa de causalidade apresentada por Usón, Valero e Correas (2009, 2010) e Usón (2008).

### *De 2010 até 2016*

Verda e Baccino (2012), aplicaram uma abordagem termoeconômica ao modelo dinâmico de um sistema de potência para investigar os efeitos do sistema de controle no consumo de energia primária e nos custos econômicos do produto. A análise proposta nesse trabalho permite quantificar o efeito do sistema de controle na variação no desempenho dos componentes. Petrakopoulou et al. (2012) fazem uma análise exergética avançada para uma central de ciclo combinado para identificar as irreversibilidades causadas pelas interações dos componentes do ciclo, e as irreversibilidades que podem ser evitadas através de melhorias tecnológicas em cada componente da planta. Esta análise avançada permite separar a destruição de exergia em dois grupos principais: destruição de exergia evitável e destruição de exergia inevitável. Eles concluíram que, exceto para o sistema de expansão da turbina a gás e a turbina a vapor de alta pressão, a maior parte da destruição de exergia nos componentes da planta é inevitável. Esta parte inevitável é limitada por questões tecnológicas internas, ou seja, irreversibilidades endógenas de cada componente. Silva et al. (2011), desenvolveram um sistema de dados termodinâmicos para o diagnóstico e prognóstico de uma planta de potência existente. O sistema baseia-se numa abordagem analítica que fornece a informação da condição termodinâmica de todos os componentes do ciclo, e a melhoria que pode ser obtida no desempenho do ciclo, eliminando-se as anomalias detectadas.

Em Piacentino e Talamo (2013), foi analisada a possibilidade de aplicar técnicas de diagnóstico termoeconômico convencionais para unidades de ar condicionado sob falhas nos equipamentos tanto de forma individual como simultâneas. O método proposto consiste em multiplicar todos os fluxos de exergia da estrutura produtiva do ciclo na condição real (com anomalias) por um fator  $\alpha$ , definido como o quociente entre a capacidade de refrigeração na condição de referência  $\dot{Q}_C^R$  e a capacidade de refrigeração na condição real  $\dot{Q}_C^A$ , como mostrado na equação (2.9), para em seguida aplicar a metodologia termoeconômica entre a condição de referência e a nova condição real.

$$\alpha = \frac{Q_C^R}{Q_C^A} \quad (2.9)$$

A abordagem resultou eficiente só do ponto de vista qualitativo, já que permite a identificação de algumas anomalias, embora possam aparecer sinais de anomalias falsas, mas proporciona muitas vezes subestimação ou superestimação do consumo adicional de insumos

provocado por anomalias individuais. De acordo com os autores, as principais causas de tais resultados insatisfatórios são: uma modelagem inadequada da válvula de expansão e as distorções causadas pelas anomalias induzidas, que não poderiam ser eficazmente tratadas por técnicas de diagnóstico termoeconômico. Isto é, esta metodologia não resolve o que é considerado o problema do diagnóstico termoeconômico, já que não quantifica de forma certa as anomalias em termos de consumo de recursos.

Em Orozco et al.(2017) é apresentado o diagnóstico termoeconômico de um ciclo de turbina a gás de queima externa (EFGT) aplicando a metodologia proposta nesta Tese.

### **2.3. FORMULAS MATEMÁTICAS PARA O DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO CONVENCIONAL.**

Na termoeconomia a exergia entrando e saindo de um sistema pode ser classificada em insumos (F), produtos (P) e perdas (L). Insumo refere-se aos recursos que o componente usa para atingir o seu objetivo (produto - P), enquanto as perdas (L) são os fluxos que saem do sistema sem terem sido utilizados (PACHECO-IBARRA, 2011).

Da equação (2.1), usando esta notação, tem-se (Eq. (2.10)):

$$F - P - L = I \quad (2.10)$$

onde F é a exergia do insumo (*Fuel*), P é a exergia dos produtos, L é a perda de exergia e I representa as irreversibilidades internas do sistema.

Os fluxos de exergia de um sistema são nomeados usando a notação  $E_{ij}$ , e isso significa que o fluxo vem do componente i e vai para o componente j. Todos os componentes são numerados começando a partir de 1, e o número 0 corresponde ao ambiente (USÓN; VALERO, 2011). Da Equação (2.2) o custo exergético unitário para o fluxo  $E_{ij}$  ficará como (Eq. (2.11)):

$$k_{ij}^* = \frac{E_{ij}^*}{E_{ij}} \quad (2.11)$$

Por sua vez, o produto e o insumo de um componente  $i$ , podem ser calculados usando as equações (2.12) e (2.13), respectivamente.

$$P_i = \sum_{j=0}^n E_{ij} \quad (2.12)$$

$$F_i = \sum_{j=0}^n E_{ji} \quad (2.13)$$

O consumo exergetico unitário é dado pela Equação (2.14):

$$\kappa_{ij} = \frac{E_{ij}}{P_j} \quad (2.14)$$

A soma de todos os consumos exergeticos unitários de um componente é o inverso da eficiência exergetica desse componente (Equação (2.15)):

$$\kappa_j = \sum_{i=0}^n \kappa_{ij} = \frac{F_j}{P_j} \quad (2.15)$$

O produto de um componente pode ser tanto um produto da planta e/ou um insumo para outro componente. Além dos produtos, num processo também se podem gerar resíduos. Os resíduos são definidos como fluxos sem utilidade posterior, mas a sua existência causa prejuízo à instalação ou ao ambiente e, portanto requerem um consumo adicional de recursos para a sua eliminação, enquanto um subproduto corresponde àqueles fluxos que podem ter um aproveitamento posterior, por exemplo, o calor dissipado num condensador que pode ser utilizado para calefação (PACHECO-IBARRA, 2011). Consequentemente, a equação característica do modelo termoeconômico pode ser escrita de acordo com a Equação (2.16):

$$P_i = P_{i0} + \sum_{j=1}^n P_{ij} + \sum_{j=1}^n R_{ij} \quad (2.16)$$

onde  $P_{i0}$  é a contribuição do componente  $i$  para o produto de todo o sistema,  $R_{ij}$  é a parcela da produção da componente  $i$  que sai do sistema como resíduo ou entra em outro

componente como subproduto. Escrevendo a Equação (2.16) em termos do consumo exergético unitário obtém-se a Equação (2.17).

$$P_i = P_{i0} + \sum_{j=1}^n (\kappa_{ij} + \theta_{ij})P_j \quad (2.17)$$

onde  $\kappa_{ij} = F_{ij}/P_j$  e  $\theta_{ij} = R_{ij}/P_j$  são os consumos exergéticos unitários dos recursos e aqueles associados resíduos, respectivamente. Em forma matricial a Equação (2.17) pode ser escrita como a Equação (2.18).

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_S + \langle \mathbf{KP} \rangle \mathbf{P} + \langle \mathbf{KR} \rangle \mathbf{P} \quad (2.18)$$

onde  $\mathbf{P}_S$  é um vetor de  $n \times 1$  que representa a contribuição de cada componente na produção global do sistema, e  $\langle \mathbf{KP} \rangle$  é uma matriz de  $n \times n$  que tem como os seus elementos os consumos exergéticos unitários  $\kappa_{ij}$ .  $\langle \mathbf{KR} \rangle$  é uma matriz de  $n \times n$  que tem como elementos o consumo exergético unitário associado aos resíduos  $\theta_{ij}$ . Reordenando a Equação (2.18) é possível obter o produto de cada componente a partir do produto final do sistema (Eq. (2.19)):

$$\mathbf{P} = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{KP} \rangle - \langle \mathbf{KR} \rangle)^{-1} \mathbf{P}_S \quad (2.19)$$

onde  $\mathbf{U}_D$  é uma matriz diagonal unitária de  $n \times n$ .

Todos os fluxos de produto de um componente são considerados como tendo o mesmo processo de formação e, portanto, eles têm o mesmo custo unitário. Assim, tem-se a Equação (2.20):

$$\mathbf{k}_{ij}^* = \mathbf{k}_{p,i}^* \quad (2.20)$$

Segundo Usón e Valero (2010), aplicando o balanço de custos para todos os componentes, pode ser demonstrado que o custo unitário dos fluxos pode ser obtido usando a Equação (2.21):

$$\mathbf{k}_P^* = {}^t|\mathbf{P}\rangle \mathbf{k}_e \quad (2.21)$$

onde  $|\mathbf{P}\rangle = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{KP} \rangle - \langle \mathbf{KR} \rangle)^{-1}$

Uma das ferramentas de diagnóstico termoeconômico usada para quantificar o efeito de uma anomalia (*malfunction*) em termos de consumo adicional de recursos necessários para obter a mesma produção e com a mesma qualidade é a chamada Fórmula do Impacto no Consumo de Combustível, a qual é descrita a seguir.

### 2.3.1. A Fórmula do impacto no combustível

A fórmula do impacto no combustível foi sugerida por Valero, Lozano e Torres (1990) e Valero, Torres e Lerch (1999) e logo desenvolvida por Torres et al., (1999, 2002), Lazzaretto e Toffolo (2006) e Valero et al. (2004d). Esta fórmula (Equação (2.22)) tem uma grande importância para o diagnóstico termoeconômico, porque relaciona a variação do consumo de combustível ( $\Delta F_T$ ) de um sistema, com a variação do consumo exergético unitário ( $\Delta \langle KP \rangle$ ) dos componentes do sistema e a variação da produção ( $\Delta P_S$ ) (PACHECO-IBARRA, 2011; USÓN; VALERO, 2011).

$$\Delta F_T = (\Delta^t \kappa_e + {}^t k_p^*(x) \Delta \langle KP \rangle + {}^t k_p^*(x) \Delta \langle KR \rangle) P(x_0) + {}^t k_p^* \Delta P_S \quad (2.22)$$

Realizando os produtos algébricos, obtém-se a Equação (2.23).

$$\Delta F_T = \Delta^t \kappa_e P(x_0) + {}^t k_p^*(x) \Delta \langle KP \rangle P(x_0) + {}^t k_p^*(x) \Delta \langle KR \rangle P(x_0) + {}^t k_p^* \Delta P_S \quad (2.23)$$

O termo  $\Delta^t \kappa_e P(x_0)$  da Equação (2.23) representa o impacto no insumo devido à variação no consumo exergético unitário dos recursos externos do sistema. O termo  ${}^t k_p^*(x) \Delta \langle KP \rangle P(x_0)$  representa o impacto no insumo devido à variação no consumo exergético unitário dos recursos dos componentes causada por uma anomalia. Por sua vez, o termo  ${}^t k_p^* \Delta \langle KR \rangle P(x_0)$  representa o impacto no insumo devido à variação no consumo exergético unitário dos resíduos. Finalmente o termo  ${}^t k_p^* \Delta P_S$  é o impacto no insumo devido à variação do produto total do sistema (PACHECO-IBARRA, 2011).

Em forma escalar a Equação (2.22) pode ser representada pela equação (2.24):

$$\Delta F_T = \sum_{i=0}^n \left[ \sum_{j=0}^n \Delta \kappa_{0i} P_i(x_0) + k_{P,j}^*(x) (\Delta \kappa_{ji} + \Delta \theta_{ji}) \right] P_i(x_0) + \sum_{i=1}^n k_{P,i}^*(x) \Delta P_{S,i} \quad (2.24)$$

onde  $P_{S,i}$  é a parte do produto da planta proveniente do componente  $i$ . Os termos em parênteses  $x$  e  $x_0$  indicam que os parâmetros termoeconômicos são avaliados nas condições de operação e referência, respectivamente.  $\Delta \theta_{ji}$  é a variação do consumo exerético unitário dos resíduos.

Para cálculos posteriores é necessário obter os operadores  $|\mathbf{P}\rangle$ ,  $|\mathbf{I}\rangle$  e  $|\mathbf{R}\rangle$  os quais são matrizes definidas mediante as equações (2.25), (2.26), e (2.27).

$$|\mathbf{P}\rangle = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{K}\mathbf{P} \rangle - \langle \mathbf{K}\mathbf{R} \rangle)^{-1} \quad (2.25)$$

$$|\mathbf{I}\rangle = (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) |\mathbf{P}\rangle \quad (2.26)$$

$$|\mathbf{R}\rangle = \langle \mathbf{K}\mathbf{R} \rangle |\mathbf{P}\rangle \quad (2.27)$$

onde  $\mathbf{K}_D \equiv (\kappa_{01}, \dots, \kappa_{0n})$  é um vetor de  $n \times 1$  que tem como elementos o consumo exerético unitário de cada componente  $\kappa_i$ .

### 2.3.2. Anomalia e disfunção

Quando aparece uma degradação o consumo exerético unitário  $\Delta \kappa_{ji}$ , de um componente aumenta. Além de aumentar as perdas, a irreversibilidade deste componente também aumenta em uma quantidade que é chamada de anomalia (Equação (2.28)). (TOFFOLO; LAZZARETTO, 2004; REINI; TACCANI, 2004; TORRES et al., 1999, 2002; VALERO et al., 2004d; VERDA et al., 2003; LERCH; ROYO; SERRA, 1999; USÓN, 2008). Quando uma anomalia intrínseca (degradação interna) ocorre num componente específico, o estado termodinâmico de todo o sistema varia e conseqüentemente o ponto de operação dos outros componentes varia, e como a eficiência de um componente é diferente para cada ponto de operação, naqueles componentes que não tem anomalias intrínsecas, aparecem variações no consumo específico, o que conduz a anomalias induzidas (causadas pela variação de insumo) (TORRES et al., 2002; USÓN, 2008).

$$MF_{ji} = \sum_{j=0}^n (\Delta\kappa_{ji} + \Delta\theta_{ji})P_i(x_0) \quad (2.28)$$

Realizando os produtos algébricos para a Equação (2.28) obtém-se a Equação (2.29).

$$MF_{ji} = \sum_{j=0}^n \Delta\kappa_{ji}P_i(x_0) + \sum_{j=0}^n \Delta\theta_{ji}P_i(x_0) \quad (2.29)$$

onde o termo  $\sum_{j=0}^n \Delta\theta_{ji}P_i(x_0)$  representa a contribuição dos resíduos nas anomalias do sistema.

A anomalia total num componente é calculada pela Equação (2.30), por sua vez o custo da anomalia é calculado usando as equações (2.31) e (2.32):

$$MF_i = \sum_{j=0}^n MF_{ji} \quad (2.30)$$

$$MF_{ji}^* = k_{P,j}^*(x)MF_{ji} \quad (2.31)$$

$$MF_i^* = \sum_{j=0}^n MF_{ji}^* \quad (2.32)$$

O impacto no consumo de combustível de um componente também pode variar devido às disfunções. Uma disfunção é causada por uma alteração no produto de um componente e é determinada pela Equação (2.33) (USÓN, 2008):

$$DF_i = (\kappa_i - 1)\Delta P_i + \sum_{j=0}^n \Delta\theta_{ji}P_j \quad (2.33)$$

Escrevendo em forma matricial a Eq. (2.33) tem-se:

$$DF = (|I| + |R|)(\langle KP \rangle + \langle KR \rangle)P(x_0) \quad (2.34)$$

Em forma escalar a Equação (2.34) pode ser escrita como:

$$DF_i = \sum_{j,h=1}^n (\phi_{ih} + \psi_{ih})(MF_{hj}^k + MF_{hj}^r) = \sum_{j,h=1}^n (\phi_{ih} + \psi_{ih})MF_{hj} \quad (2.35)$$

onde  $\phi_{ih}$  representa os coeficientes do operador  $|I\rangle$ ,  $\psi_{ih}$  representa os coeficientes do operador  $|R\rangle$ ,  $MF_{hj}^k$  é a anomalia causada pela variação dos consumos exergéticos unitários dos componentes do sistema e  $MF_{hj}^r$ , as anomalias devido à geração de resíduos nos componentes do sistema.

Em forma Matricial a Equação (2.35) pode ser escrita como é mostrado na Equação (2.36).

$$\mathbf{DF} = (|\mathbf{I}\rangle + |\mathbf{R}\rangle)\mathbf{MF} \quad (2.36)$$

Escrevendo de forma escalar a Equação (2.20) é obtido uma expressão (Eq. (2.37)), que pode ser usada para calcular os custos exergéticos unitários dos produtos de cada componente.

$$k_{P,i}^* = 1 + \sum_{j=1}^n (\phi_{ji} + \psi_{ji}) \quad (2.37)$$

O impacto no combustível também pode ser calculado em função das anomalias e das disfunções, como:

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n (MF_i + \sum_{j=1}^n DF_{ij}) \quad (2.38)$$

De acordo com o apresentado, a metodologia de diagnóstico termoeconômico convencional está integrada pelas seguintes etapas, como mostrado na Figura 2.3: (i) definir a condição real e de referência, (ii) criar a estrutura produtiva, (iii) aplicar a análise termoeconômica e (iv) aplicar o diagnóstico termoeconômico. Como resultado, obtém-se as disfunções e as anomalias de cada equipamento, mas as anomalias não podem ser separadas em suas componentes intrínseca e induzida, logo devem ser usados outros métodos que, como já foi falado, na maioria das vezes não fornecem resultados satisfatórios.

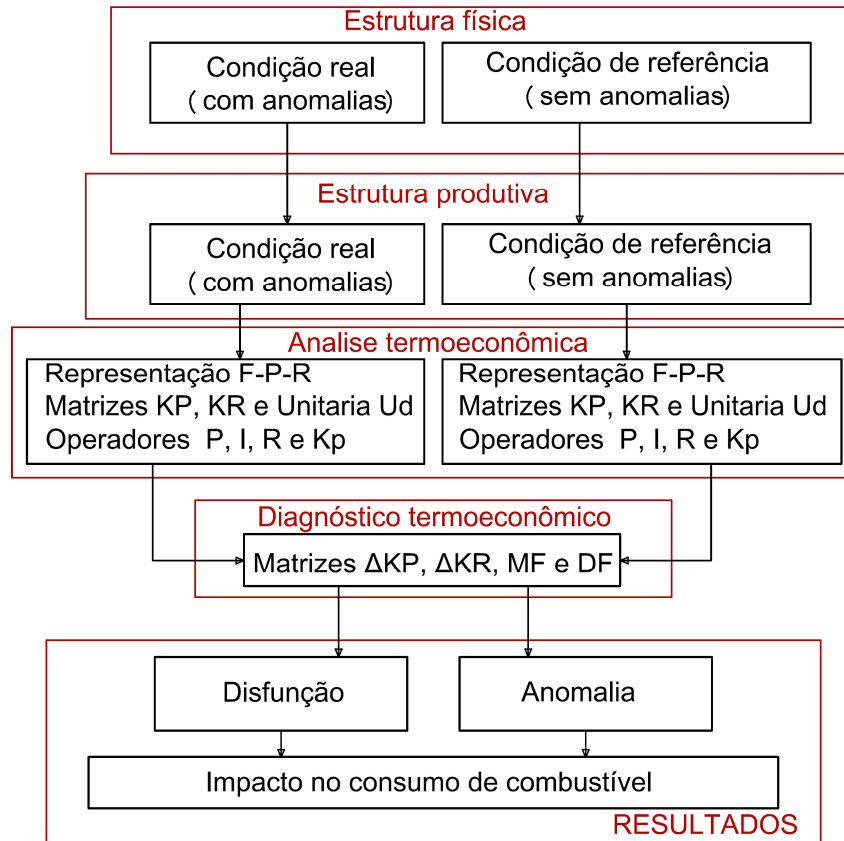


Figura 2.3. Esquema de diagnóstico convencional

A análise termodinâmica e termoeconômica está constituída por nove (9) subetapas (PACHECO-IBARRA, 2011; RÚA OROZCO, 2013; RÚA OROZCO; VENTURINI; ESCOBAR PALACIO, 2015; OROZCO et al., 2017), que são:

- (i) Definição da condição de referência do sistema em estudo;
- (ii) Definição da condição real do sistema, que é chamada de condição de teste e é caracterizada pela presença de anomalias;
- (iii) Baseado na estrutura produtiva escolhida para o sistema, elaborar uma representação matricial F-P-R (Insumo-Produto-Resíduo). A matriz F-P-R serve para obter os insumos e produtos totais do sistema e, em seguida, obter o consumo de exergia local e global dos equipamentos do sistema, isto é, a matriz  $\langle \mathbf{KP} \rangle$  que aparece na Equação (2.18);
- (iv) Obtenção da matriz  $\langle \mathbf{KP} \rangle$  e matriz  $\langle \mathbf{KR} \rangle$ ;
- (v) Elaboração de uma matriz unitária  $U_D$  de  $n \times n$ ;
- (vi) Cálculo do operador produto  $|P\rangle$  usando a Equação (2.25);
- (vii) Cálculo do operador de irreversibilidade  $|I\rangle$  usando a Equação (2.26). A partir da matriz do operador  $|I\rangle$  são obtidos os coeficientes de irreversibilidade  $\phi_{ji}$  da

- Equação (2.37), que representam as irreversibilidades geradas pelo componente j para obter uma unidade de produto do componente i;
- (viii) Cálculo do operador de resíduo  $|R\rangle$  usando a Equação (2.27). A partir da matriz do operador  $|R\rangle$  são obtidos os coeficientes de resíduos  $\psi_{ji}$  da Equação (2.35) e Equação (2.37), que representam os resíduos gerados pela componente j para obter uma unidade de produto da componente i;
  - (ix) Cálculo dos custos exergéticos unitários dos produtos de cada componente usando a Equação (2.37) e os valores dos coeficientes  $\phi_{ji}$  e  $\psi_{ji}$ .

As etapas de (iii) a (ix) se aplicam tanto para a condição de referência como para a condição real (teste). Usando as matrizes obtidas na análise termoeconômica, realiza-se a comparação das condições de referência e real (teste) para a obtenção de diagnóstico termoeconômico. Este procedimento consta de cinco (5) sub etapas:

- (i) Obtenção das matrizes  $\Delta\langle KP\rangle$  e  $\Delta\langle KR\rangle$ , onde  $\Delta\langle KP\rangle = \langle KP\rangle_{\text{real}} - \langle KP\rangle_{\text{ref}}$  e  $\Delta\langle KR\rangle = \langle KR\rangle_{\text{real}} - \langle KR\rangle_{\text{ref}}$ ;
- (ii) Cálculo da matriz de anomalias usando a Equação (2.28), onde  $\Delta\kappa_{ji}$  e  $\Delta\theta_{ji}$  são os elementos das matrizes  $\Delta\langle KP\rangle$  e  $\Delta\langle KR\rangle$ , respectivamente;
- (iii) Soma dos operadores  $|I\rangle$  e  $|R\rangle$  na condição real (teste) para serem usados na Equação (2.36);
- (iv) Cálculo da matriz de disfunções usando a Equação (2.36);
- (v) Cálculo do desvio no consumo de combustível causado pelos equipamentos, somando as anomalias com as disfunções, de acordo com a equação (2.38).

Na seção 2.3.3, um exemplo de aplicação para o diagnóstico termoeconômico usando um sistema simples é apresentado.

### 2.3.3. Aplicação da metodologia de diagnóstico convencional a um sistema simples

Considere-se o sistema hipotético da Figura 2.4. Este sistema está constituído por 3 equipamentos: A, B e C, relacionados mediante os fluxos de exergia  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7$  e  $E_8$ , onde  $E_8 = E_6 - E_7$ .

O sistema consome os recursos externos  $E_1$  e  $E_5$  para produzir os fluxos úteis  $E_4$  e  $E_8$ . Aqui  $E_5$  é o combustível.

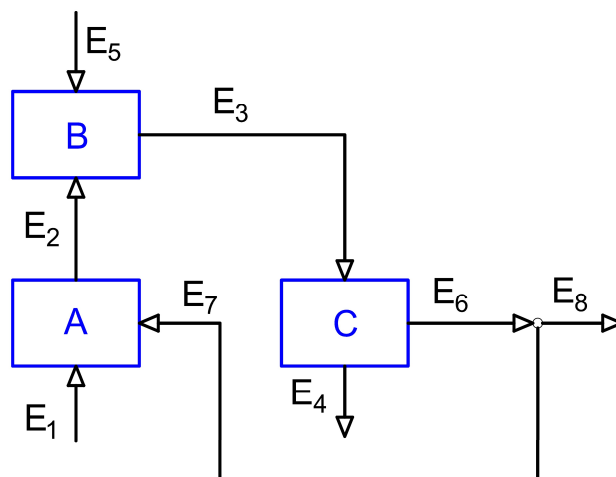


Figura 2.4. Sistema térmico hipotético. Adaptado de Rúa Orozco (2013).

Na condição de referência os fluxos de exergia do sistema têm os valores apresentados na Tabela 2.1. Agora considere-se que há uma anomalia intrínseca em um dos equipamentos, o que muda as condições de operação do sistema. Considere também que por uma necessidade do processo os valores dos produtos  $E_4$  e  $E_8$  devem-se manter iguais aos da condição de referência, isto é, 18,52 kW e 10,00 kW, respectivamente, o que faz com que o sistema de controle aumente a quantidade de combustível consumida,  $E_5$ , para garantir que o valor dos produtos seja atingido. Esta nova condição de operação do sistema será chamada de condição real e seus valores de exergia são apresentados na última coluna da Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Valor dos fluxos de exergia do sistema térmico hipotético para as condições de referência e real

Fluxo	Referência	Real
	kW	kW
E1	0,00	0,00
E2	5,33	5,33
E3	37,04	37,80
E4	18,52	18,52
E5	100,34	103,54
E6	16,67	16,67
E7	6,67	6,67
E8	10,00	10,00

Como existe informação dos valores dos fluxos de exergia na condição real do sistema, assim como também numa condição de referência, pode-se aplicar a metodologia de diagnóstico termoeconômico para tentar descobrir quais são os equipamentos que apresentam anomalias intrínsecas. Para tal fim, a metodologia de diagnóstico do impacto no consumo de combustível (VALERO; LOZANO; TORRES, 1990; VALERO; TORRES; LERCH, 1999;

(TORRES et al., 1999, 2002; LAZZARETTO; TOFFOLO, 2006; VALERO et al., 2004d), foi aplicada.

Como foi mostrado na Seção 2.3.2, a metodologia envolve a aplicação de uma série de etapas que serão mostradas a seguir, para maior clareza do leitor.

1. Definir a condição real e de referência. Esta condição já foi definida na Tabela 2.1.
2. Criar a estrutura produtiva. A Tabela 2.2 mostra a relação que existe para insumos e produtos para o sistema hipotético.

Tabela 2.2. Relação de insumos e produtos para os equipamentos do sistema hipotético.

Equipamento	Insumo	Produto
Ambiente	$E_4+E_8$	$E_0+E_1+E_5$
A	$E_7$	$E_2-E_1$
B	$E_5+E_0$	$E_3-E_2$
C	$E_3$	$E_4+E_6$

Com a informação da Tabela 2.2 uma representação gráfica da estrutura produtiva é apresentada na Figura 2.5, onde  $E_0$  que aparece na Tabela 2.2 e na Figura 2.5 é o ar necessário para a combustão do combustível,  $E_5$ . Por estar nas mesmas condições do ambiente,  $E_0=0$ .

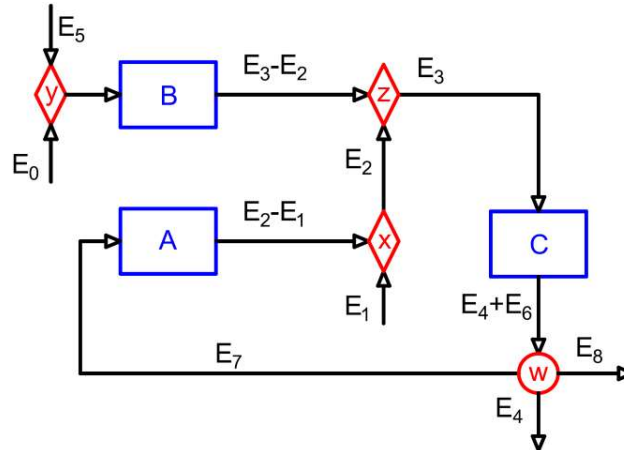


Figura 2.5. Representação gráfica da estrutura produtiva do sistema hipotético.

Como observado na Figura 2.5, o número de componente da estrutura produtiva é maior que o número de componentes da estrutura física. Isto se deve a que foi necessário introduzir elementos fictícios (x, y, z e w).

De forma geral, uma vez que um componente de um sistema pode entregar seu produto a mais de um componente e também pode receber insumo de mais de um componente, dois tipos de dispositivos fictícios são usados para definir a interação entre os componentes reais do sistema: junções (losango) e bifurcações (círculos) (VALERO et al., 2004d). Numa junção, os

produtos de dois ou mais componentes são unidos para formar o insumo de outro componente. Em um bifurcação, um fluxo exergetico é distribuído entre dois ou mais componentes. Às vezes, a estrutura produtiva pode ser simplificada (com os mesmos resultados), juntando as bifurcações e junções em um novo componente fictício chamado Junção-bifurcação (UCHE, 2000)

Na Tabela 2.3 se define o insumo e produto de cada componente fictício que aparecem na Figura 2.5.

Tabela 2.3. Insumos e produtos dos elementos fictícios da estrutura produtiva do sistema simples.

Equipamento	Insumo	Produto
W	$E_4+E_6$	$E_4+E_7+E_8$
X	$(E_2-E_1)+E_1$	$E_2$
Y	$E_5+E_0$	$E_5+E_0$
Z	$(E_3-E_2)+E_2$	$E_3$

A Tabela 2.4 apresenta os valores numéricos para os insumos e produtos da estrutura produtiva da Figura 2.5 e que será usada para elaborar a matriz F-P.

Tabela 2.4. Insumos e produtos para o sistema hipotético na condição de referência e real.

Equipamento		Referência		Real	
		Insumo	Produto	Insumo	Produto
Reais	Ambiente	28,52	100,34	28,52	103,54
	A	6,67	5,33	6,67	5,33
	B	100,34	31,70	103,54	32,46
	C	37,04	35,19	37,79	35,19
Fictícios	W	35,19	35,19	35,19	35,19
	X	5,33	5,33	5,33	5,33
	Y	100,34	100,34	103,54	103,54
	Z	37,04	37,04	37,79	37,79

### Análise termoeconômica.

3. Baseado na estrutura produtiva escolhida para o sistema, elaborar uma representação matricial F-P-R (Insumo-Produto-Resíduo). Neste caso não existem resíduos, pelo que será simplesmente uma representação F-P a qual é apresentada

de forma simbólica na Tabela 2.5. Na Tabela 2.6 apresenta-se de forma numérica a matriz F-P para a condição de referência.

Tabela 2.5. Representação simbólica da matriz F-P

		Insumos								$P_i = \sum P_{ij}$
		F0	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ	
Produtos	P0	0	0	0	0	0	$E_1$	$E_0 + E_5$	0	$E_0 + E_1 + E_5$
	PA	0	0	0	0	0	$E_2 - E_1$	0	0	$E_2 - E_1$
	PB	0	0	0	0	0	0	0	$E_3 - E_2$	$E_3 - E_2$
	PC	0	0	0	0	$E_4 + E_6$	0	0	0	$E_4 + E_6$
	PW	$E_4 + E_8$	$E_7$	0	0	0	0	0	0	$E_4 + E_7 + E_8$
	PX	0	0	0	0	0	0	0	$E_2$	$E_2$
	PY	0	0	$E_0 + E_5$	0	0	0	0	0	$E_0 + E_5$
	PZ	0	0	0	$E_3$	0	0	0	0	$E_3$
$F_i = \sum F_{ji}$		$E_4 + E_8$	$E_7$	$E_0 + E_5$	$E_3$	$E_4 + E_6$	$E_2$	$E_5 + E_0$	$E_3$	

Tabela 2.6. Matriz F-P para a condição de referência

		Insumos								$P_i = \sum P_{ij}$
		F0	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ	
Produtos	P0	0	0	0	0	0	0	100,34	0	100,34
	PA	0	0	0	0	0	5,33	0	0	5,33
	PB	0	0	0	0	0	0	0	31,7	31,7
	PC	0	0	0	0	35,19	0	0	0	35,19
	PW	28,52	6,67	0	0	0	0	0	0	35,19
	PX	0	0	0	0	0	0	0	5,33	5,33
	PY	0	0	100,34	0	0	0	0	0	100,34
	PZ	0	0	0	37,04	0	0	0	0	37,04
$F_i = \sum F_{ji}$		28,52	6,67	100,34	37,04	35,19	5,33	100,34	37,04	

A representação F-P mostra a relação entre insumos e produtos dentro da estrutura produtiva escolhida e é a representação matricial da Equação (2.12) e Equação (2.13) da seção 2.3. Assim, por exemplo, na Tabela 2.6, o equipamento A (PA) entrega o seu produto (5,33 kW) para o equipamento X (FX). Também, o equipamento W (PW) entrega 28,52 kW ( $E_4 + E_8$ ) pro ambiente (F0) e 6,67 kW para o equipamento A (FA). A última coluna da Tabela 2.4 ( $P_i = \sum P_{ij}$ ) contém os produtos totais de cada equipamento. A última linha da Tabela 2.4 ( $F_i = \sum F_{ji}$ ) contém os insumos totais de cada equipamento. De forma similar a representação F-P é mostrada na Tabela 2.7 para a condição real do sistema.

Tabela 2.7. Matriz F-P para a condição real

		Insumos								$P_i = \sum P_{ij}$
		F0	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ	
Produtos	P0	0	0	0	0	0	0	103,54	0	103,54
	PA	0	0	0	0	0	5,33		0	5,33
	PB	0	0	0	0	0	0	0	32,46	32,46
	PC	0	0	0	0	35,19	0	0	0	35,19
	PW	28,52	6,67	0	0	0	0	0	0	35,19
	PX	0	0	0	0	0	0	0	5,33	5,33
	PY	0	0	103,54	0	0	0	0	0	103,54
	PZ	0	0	0	37,79	0	0	0	0	37,79
	$F_i = \sum F_{ji}$	28,52	6,67	103,54	37,79	35,19	5,33	103,54	37,79	

4. Elaboração da matriz  $\langle KP \rangle$ . Esta matriz representa os consumos exergéticos unitários e é obtida ao dividir cada elemento de uma coluna da matriz F-P por seu correspondente produto total, isto é, usando a Equação (2.14) da seção 2.3. Por exemplo, os elementos da coluna FA são divididos por 5,33 que é o produto total da linha PA.

Na Tabela 2.8 apresenta-se a matriz  $\langle KP \rangle$  de forma simbólica. Na Tabela 2.9 apresenta-se a matriz  $\langle KP \rangle$  para a condição de referência de forma numérica. Ao somar os elementos de cada coluna obtém-se o vetor KD que tem como elementos o consumo exergético unitário de cada componente do sistema.

Tabela 2.8. Representação simbólica da matriz  $\langle KP \rangle$

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	$\frac{E_1}{E_2}$	$\frac{E_0 + E_5}{E_0 + E_5}$	0,00
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	$\frac{E_2 - E_1}{E_2}$	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$\frac{E_3 - E_2}{E_3}$
PC	0,00	0,00	0,00	$\frac{E_4 + E_6}{E_4 + E_7 + E_8}$	0,00	0,00	0,00
PW	$\frac{E_7}{E_2 - E_1}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	$\frac{E_2}{E_3}$
PY	0,00	$\frac{E_0 + E_5}{E_3 - E_2}$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	$\frac{E_3}{E_4 + E_6}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_D$	$\frac{E_7}{E_2 - E_1}$	$\frac{E_0 + E_5}{E_3 - E_2}$	$\frac{E_3}{E_4 + E_6}$	$\frac{E_4 + E_6}{E_4 + E_7 + E_8}$	$\frac{E_2}{E_2}$	$\frac{E_0 + E_5}{E_0 + E_5}$	$\frac{E_3}{E_3}$

Tabela 2.9. Matriz  $\langle KP \rangle$  para a condição de referência.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,86</b>
PC	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00	0,00
PW	<b>1,25</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,14</b>
PY	0,00	<b>3,16</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	<b>1,05</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>K<sub>D</sub></b>	<b>1,25</b>	<b>3,16</b>	<b>1,05</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Para a condição real a matriz  $\langle KP \rangle$  é mostrada na Tabela 2.10.

Tabela 2.10. Matriz  $\langle KP \rangle$  para a condição real.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,86</b>
PC	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00	0,00
PW	<b>1,25</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,14</b>
PY	0,00	<b>3,19</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	<b>1,07</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>K<sub>D</sub></b>	<b>1,25</b>	<b>3,19</b>	<b>1,07</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

5. Elaboração de uma matriz unitária  $U_D$  de  $n \times n$ . Uma matriz unitária, neste caso de  $7 \times 7$ , é apresentada na Tabela 2.11.

Tabela 2.11. Matriz unitária,  $U_D$ , de  $7 \times 7$ .

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	1	0	0	0	0	0	0
PB	0	1	0	0	0	0	0
PC	0	0	1	0	0	0	0
PW	0	0	0	1	0	0	0
PX	0	0	0	0	1	0	0
PY	0	0	0	0	0	1	0
PZ	0	0	0	0	0	0	1

6. Elaboração da matriz  $K_D$ . Esta matriz é obtida ao substituir os elementos da diagonal de uma matriz unitária por cada um dos elementos do vetor  $K_D$  que foi obtido da matriz  $\langle KP \rangle$  na condição real. A matriz  $K_D$  é apresentada na Tabela 2.12.

Tabela 2.12. Matriz  $K_D$  para a condição real.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	<b>1,25</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	<b>3,19</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	<b>1,07</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>

7. Cálculo do operador produto  $|P\rangle$ . Para obter este operador matricial é usada a Equação (2.25) da seção 2.3, sem ter em conta  $\langle KR\rangle$ , já que não se têm resíduos envolvidos nos processos do sistema em estudo. Assim, tem-se a expressão:  $|P\rangle = (U_D - \langle KP\rangle)^{-1}$ . O operador produto  $|P\rangle$  é calculado unicamente para a condição real. A matriz obtida de  $(U_D - \langle KP\rangle)$  para a condição real é apresentada na Tabela 2.13, e o operador produto  $|P\rangle$  é apresentado na Tabela 2.14.

Tabela 2.13. Matriz de  $(U_D - \langle KP\rangle)$  para a condição real.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	<b>1,00</b>	0,00	0,00	0,00	<b>-1,00</b>	0,00	0,00
PB	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>-0,86</b>
PC	0,00	0,00	<b>1,00</b>	<b>-1,00</b>	0,00	0,00	0,00
PW	<b>-1,25</b>	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00	<b>-0,14</b>
PY	0,00	<b>-3,19</b>	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>	0,00
PZ	0,00	0,00	<b>-1,07</b>	0,00	0,00	0,00	<b>1,00</b>

Tabela 2.14. Operador produto  $|P\rangle$  para a condição real.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	1,23	0,00	0,19	0,19	1,23	0,00	0,17
PB	1,42	1,00	1,14	1,14	1,42	0,00	1,06
PC	1,54	0,00	1,23	1,23	1,54	0,00	0,22
PW	1,54	0,00	0,23	1,23	1,54	0,00	0,22
PX	0,23	0,00	0,19	0,19	1,23	0,00	0,17
PY	4,54	3,19	3,63	3,63	4,54	1,00	3,38
PZ	1,66	0,00	1,33	1,33	1,66	0,00	1,23

8. Cálculo do operador de irreversibilidade  $|I\rangle$ . Este operador matricial é obtido a partir da Equação (2.26) para a condição real:  $|I\rangle = (K_D - U_D)|P\rangle$ . A matriz  $(K_D - U_D)$  é apresentada na Tabela 2.15. Na Tabela 2.16 apresenta-se o operador irreversibilidade  $|I\rangle$  para a condição real.

Tabela 2.15. Matriz ( $K_D - U_D$ ) para a condição real.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	2,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 2.16. Operador irreversibilidade |I) para a condição real.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	0,31	0,00	0,05	0,05	0,31	0,00	0,04
PB	3,12	2,19	2,49	2,49	3,12	0,00	2,32
PC	0,11	0,00	0,09	0,09	0,11	0,00	0,02
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\phi_{i,h}$	<b>3,54</b>	<b>2,19</b>	<b>2,63</b>	<b>2,63</b>	<b>3,54</b>	<b>0,00</b>	<b>2,38</b>

Pelas características do sistema não existem resíduos, portanto a Equação (2.37) pode se escrita como:

$$k_{P,i}^* = 1 + \sum_{j=1}^n \phi_{ji} \quad (2.39)$$

Assim, usando esta expressão junto com os dados da última linha da matriz |I) da Tabela 2.16, obtém-se os custos exergetico para cada equipamento, como mostrado na Tabela 2.17.

Tabela 2.17. Custos exergeticos dos equipamentos dos sistema simples.

Equip.	$\phi_{i,h}$	KP*
A	3,54	4,54
B	2,19	3,19
C	2,63	3,63
W	2,63	3,63
X	3,54	4,54
Y	0,00	1,00
Z	2,38	3,38

## Diagnóstico termoeconômico

9. Obtenção da matriz  $\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle$ . A matriz  $\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle$  é obtida como a diferença entre as matrizes  $\langle\mathbf{KP}\rangle$  na condição real e referência. Assim:  $\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle = \langle\mathbf{KP}\rangle_{\text{real}} - \langle\mathbf{KP}\rangle_{\text{ref}}$ . A matriz  $\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle$  para o sistema em estudo é apresentada na Tabela 2.18.

Tabela 2.18. Matriz  $\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle$

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	<b>0,02</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	<b>0,02</b>	0,00	0,00	0,00	0,00

10. Cálculo da Matriz de Anomalias  $\mathbf{MF}$ . Esta matriz é obtida da Equação (2.29), onde  $\Delta\theta_{ji} = 0$ , pois não existem resíduos no sistema. Assim, a equação fica como:  $\mathbf{MF}_{ji} = \sum_{j=0}^n \Delta\kappa_{ji} P_i(x_0)$  ou em forma matricial  $\mathbf{MF} = \Delta\langle\mathbf{KP}\rangle P_i(x_0)$ , onde  $P_i(x_0)$  é o produto total para cada componente do sistema na condição de referência.

A matriz de anomalias é apresentada na Tabela 2.19. O somatório dos elementos de cada coluna são as anomalias para cada equipamento ( $\Sigma\mathbf{MF}_i$ ).

Tabela 2.19. Matriz de anomalias  $\mathbf{MF}$  para o sistema estudado.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,11</b>
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>-0,11</b>
PY	0,00	<b>0,79</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	<b>0,76</b>	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma\mathbf{MF}_i$	<b>0,00</b>	<b>0,79</b>	<b>0,76</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

11. Cálculo da matriz de disfunções. Como os resíduos não são considerados neste caso,  $\langle\mathbf{R}\rangle$  pode ser suprimido da Equação (2.36). A expressão fica como:  $\mathbf{DF} = \langle\mathbf{I}\rangle\mathbf{MF}$ . A

matriz disfunção é apresentada na Tabela 2.20. O somatório dos elementos para cada coluna representa a disfunção para cada equipamento ( $\Sigma DF_i$ ).

Tabela 2.20. Matriz de disfunções.

	FA	FB	FC	FW	FX	FY	FZ
PA	0,00	0,00	<b>0,03</b>	0,00	0,00	0,00	<b>-0,03</b>
PB	0,00	0,00	<b>1,75</b>	0,00	0,00	0,00	<b>-0,10</b>
PC	0,00	0,00	<b>0,01</b>	0,00	0,00	0,00	<b>-0,01</b>
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma DF_i$	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,80</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,14</b>

12. Cálculo do desvio no consumo de combustível causado por degradação nos equipamentos. O impacto no consumo de combustível é obtido ao somar as anomalias com as disfunções usando a Equação (2.38). Na Tabela 2.21 mostra-se o impacto no consumo de combustível para cada equipamento do sistema em estudo.

Tabela 2.21. Anomalias, disfunções e impacto no consumo de combustível para cada componente do sistema em estudo.

Equipamento	MF (kW)	DF (kW)	Impacto (kW)
A	0,00	0,00	0,00
B	<b>0,79</b>	0,00	<b>0,79</b>
C	<b>0,76</b>	<b>1,80</b>	<b>2,55</b>
W	0,00	0,00	0,00
X	0,00	0,00	0,00
Y	0,00	0,00	0,00
Z	0,00	<b>-0,14</b>	<b>-0,14</b>
Total calculado			<b>3,20</b>
Total medido			<b>3,20</b>

Uma forma de conferir se os cálculos feitos estão corretos é calcular a **variação no consumo de combustível de forma direta**, isto é, a **diferença entre o valor da exergia do insumo (ou combustível) na condição real e o valor da exergia do insumo na condição de referência**, que neste caso é a diferença entre o valor do fluxo E5 na condição real e na condição de referência. Assim, nesta Tese, quando se fala de “**obtido de forma direta**” se faz referência a esta forma de calcular a variação do insumo (variação do consumo de combustível). Como observado na Tabela 2.21, tanto o valor calculado (Total calculado) como aquele obtido diretamente (Total medido) são iguais, isto é, 3,20 kW. Também se pode observar que o equipamento B apresenta uma anomalia de 0,79 kW e o equipamento C apresenta uma anomalia de 0,76 kW. Porém, surge a pergunta: como se pode estabelecer se estas anomalias são do tipo

intrínseco ou induzido?. Com a metodologia de diagnóstico convencional se faz difícil obter a resposta. Isto mostra a necessidade de uma abordagem que seja capaz de dar resposta a este questionamento de forma adequada.

Na metodologia proposta nesta tese o diagnóstico termoeconômico pode ser complementado com Redes Neurais Artificiais (RNA) para localizar onde acontecem as degradações. Assim, na próxima seção, são introduzidos os conceitos básicos para a criação das RNA. No entanto, o sistema pode usar curvas de desempenho dos equipamentos, equações matemáticas que descrevam o comportamento dos equipamentos ou simuladores comerciais. Nos capítulos 5 e 6 é mostrado o uso do software comercial GateCycle™ (GATE CYCLE, 2003) como complemento da metodologia proposta.

## **2.4. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (RNA)**

Uma rede neural artificial (RNA) é uma interconexão de elementos computacionais conhecidos como neurônios, que operam em paralelo e são projetados para representar uma função matemática particular (DE ARMAS et al., 2008). As RNA foram inspiradas em processos biológicos e representam paradigmas computacionais para imitar os cálculos do cérebro. Existem muitos tipos de redes neurais, mas todas elas têm três coisas em comum: os neurônios individuais, as conexões entre elas (topologia), e o algoritmo de aprendizado. Além disso, a rede pode estar constituída por uma ou mais camadas de neurónios interligadas (VANKAYALA; RAO, 1993).

### **2.4.1. Características das RNA**

As RNA são baseadas numa visão abstrata e simplificada do neurônio, isto é, várias propriedades fisiológicas do neurónio não são consideradas, já que atualmente as RNA são mais orientadas para o desempenho computacional (SUZUKI, 2013). Em termos gerais, as redes neurais são ferramentas para a construção de modelos de sistemas que são caracterizados por conjuntos de dados que são muitas vezes (mas nem sempre) obtidos por amostragem de um comportamento de entrada-saída do sistema (TOSH; RUXTON, 2010). O neurônio artificial é o elemento básico a partir do qual todas as RNA são estruturadas. Um neurônio tem três conjuntos únicos de regras: multiplicação, somatório e ativação. Como mostrado na Figura 2.6,

cada valor de entrada ( $\mathbf{p}$ ) é ponderado, isto é, multiplicado pelo seu peso correspondente ( $\mathbf{W}$ ). Em seguida, somam-se todas as entradas ponderadas incluindo o bias ( $b$ ), também chamado de *Offset*. O resultado deste somatório ( $n$ ) passa por uma função de ativação ( $f$ ), também chamada de função de transferência, para assim obter a saída do neurônio ( $a$ ) (SUZUKI, 2011). Os pesos ( $\mathbf{W}$ ) e o bias ( $b$ ) são ambos parâmetros escalares ajustáveis do neurônio. O bias outorga à rede uma variável extra o que faz com que uma RNA com bias seja mais “poderosa” que uma rede sem bias. A equação (2.40) é uma representação matemática de um neurônio.

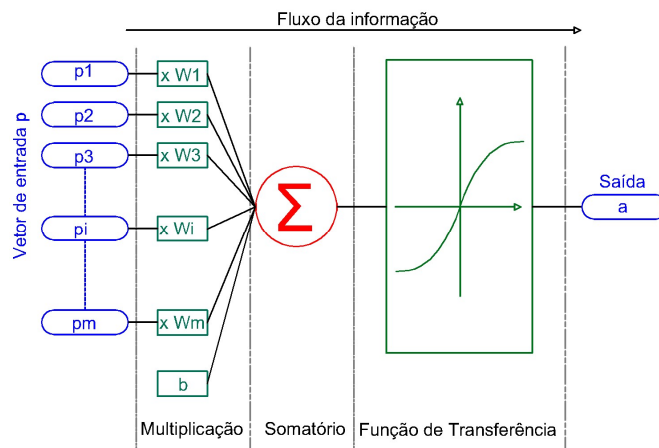


Figura 2.6. Princípio de funcionamento de um neurônio artificial. Adaptado de Suzuki (2011)

$$a = f(\mathbf{W} \cdot \mathbf{p} + b) \quad (2.40)$$

onde  $n = \mathbf{W} \cdot \mathbf{p} + b$ .

O comportamento do neurônio depende do valor dos parâmetros  $\mathbf{W}$  e  $b$ , assim como também do tipo de função de transferência. O valor de  $\mathbf{W}$  e  $b$  para diferentes neurônios numa rede neural artificial dada são calculados no que é chamado de processo de treinamento. Deste modo pode-se afirmar que uma rede neural é nada mais do que uma função com parâmetros ajustáveis (SJÖBERG, 2005).

Embora o princípio de trabalho de um neurônio artificial parece bem simples, quando se integram vários neurônios para formar uma rede, obtém-se um poder de cálculo importante para resolver problemas complexos.

Quando se tem vários neurônios trabalhando em paralelo obtém-se o que é chamado de camada de neurônios. Redes de camada única sofrem da desvantagem de que elas só são capazes de resolver problemas de classificação linearmente separáveis. Os pesquisadores Rosenblatt e Widrow estavam cientes dessas limitações e para superá-las propuseram redes multicamadas

(ROSENBLATT, 1958; WIDROW; HOFF, 1960), onde cada camada tem sua própria matriz de pesos ( $\mathbf{W}$ ), seu próprio vetor de bias ( $\mathbf{b}$ ), um vetor de entrada líquida à função de transferência ( $\mathbf{n}$ ) e um vetor de saída ( $\mathbf{a}$ ) (HAGAN et al., 2002). Na Figura 2.7a mostra-se um exemplo de uma RNA com três neurônios na camada de entrada, dois neurônios na camada oculta e um neurônio na camada de saída (SUZUKI, 2011).

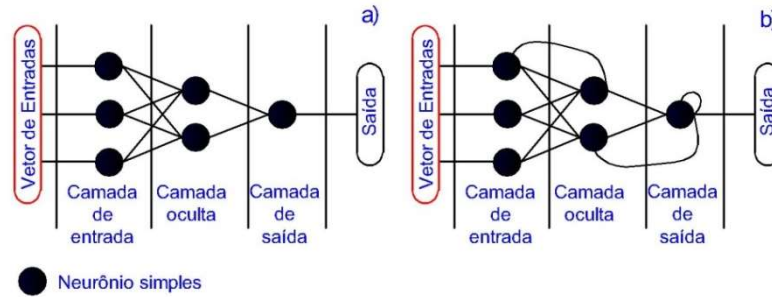


Figura 2.7. a) Topologia feed-forward e b) topologia recorrente de uma rede de neurônios artificiais. Adaptado de Suzuki (2011)

A maneira como os neurônios artificiais individuais estão interconectados é chamada topologia, arquitetura ou gráfico de uma RNA. O fato de que a interconexão pode ser feita de várias maneiras resulta em inúmeras topologias possíveis que são divididas em duas classes básicas: (i) *feed-forward*, onde a informação flui das entradas para as saídas em uma única direção e a saída é calculada diretamente das entradas em uma passagem; nenhum retroalimentação está envolvido (Figura 2.7a) e (ii) recorrente (*recurrent topology*), onde alguns dos fluxos de informação fluem tanto na direção a partir da entrada para a saída como no sentido oposto (Figura 2.7b). A rede apresenta retroalimentação, isto é, algumas das suas saídas estão conectadas com suas entradas. Redes *Feed-forward* são utilizadas para reconhecimento de padrões e também para a aproximação de funções (SUZUKI, 2011).

A regra de aprendizado ou algoritmo de treinamento é o mecanismo mediante o qual os parâmetros da RNA vão se adaptando ou modificando (VIÑUELA; LEÓN, 2004). Para RNA multicamada o algoritmo consiste em modificar os valores de  $\mathbf{W}$  e  $\mathbf{b}$  para que a saída da rede seja o mais próxima possível da saída desejada. Deste modo o aprendizado da rede é um problema de minimização de uma função erro definida como (Equação (2.41)).

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(n) \quad (2.41)$$

onde  $N$  é o número de padrões e  $e(n)$  é o erro cometido pela RNA para o padrão  $n$ .

Se a função de ativação da RNA não é linear, o problema de minimização também não é linear, portanto deve-se utilizar técnicas de otimização não lineares para sua solução. Estas técnicas estão, geralmente, baseadas em uma adaptação dos parâmetros seguindo uma dada direção de busca, sendo a mais comum usada para RNA multicamadas: a direção negativa do gradiente da função  $E$  (método da decida do gradiente) (VIÑUELA; LEÓN, 2004).

De acordo com Hagan et al.:

“O segundo desenvolvimento fundamental da década de 1980 foi o algoritmo *backpropagation* (retropropagação) para treinar redes multicamadas, que foi descoberto de forma independente por vários pesquisadores diferentes. A mais influente publicação do algoritmo *backpropagation* foi apresentada por David Rumelhart e James McClelland. Este algoritmo foi a resposta às críticas que Minsky e Papert tinham feito na década de 1960. Estes novos desenvolvimentos revigoraram o domínio das redes neurais. Desde a década de 1980, milhares de documentos foram escritos, as redes neurais têm encontrado inúmeras aplicações, e o campo foi movimentado com um novo trabalho teórico e prático” (HAGAN *et al.*, 2002, p.1-4).

Para as redes usadas nesta tese foi escolhido o algoritmo de treinamento de *backpropagation*, chamado também de regra delta generalizada. O termo *backpropagation* é usado devido à forma na qual é implementado o método do gradiente, já que o erro cometido na saída da rede é propagado para trás, transformando-o em um erro para cada um dos neurônios ocultos da RNA (VIÑUELA; LEÓN, 2004). Para maior detalhe pode-se consultar Viñuela e León (2004), Suzuki (2013) e Hagan et al. (2002).

Demonstrou-se que as redes de duas camadas, com funções de transferência sigmóide na camada oculta e funções de transferência linear na camada de saída, podem aproximar virtualmente qualquer função de interesse para qualquer grau de precisão. Também a função de transferência do tipo sigmóide é comumente usada em redes de múltiplas camadas, que são treinadas usando o algoritmo *backpropagation*, em parte porque esta função é diferenciável.

Assim, a função de transferência usada nas RNA utilizadas nesta tese é a função Tangente Hiperbólica Sigmoides, que é mostrada na Equação (2.42).

$$a = f(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (2.42)$$

Para simular o comportamento dos equipamentos individuais sem anomalias e trabalhando fora do seu ponto de projeto foi utilizada a ferramenta “*nntool*” do software comercial Matlab®.

A rede neural usada foi do tipo “*feed-forward backprop*”, com uma camada oculta e com uma função de transferência “*tansig*” (MATHWORKS, 2013). O número de neurônios na camada oculta depende do número de entradas e saídas da rede. É preferível escolher o (FAST; PALMÉ, 2010) menor número de neurônios na camada oculta quanto possível, sem sacrificar a precisão da previsão, a fim de obter uma boa capacidade de generalização. O número de entradas e saídas por sua vez depende das características do equipamento simulado. Foi criada uma rede para cada equipamento. Um valor inicial para o número de neurônios na camada oculta de cada equipamento individual (Compressor, Turbina a gás, queimador, etc.) foi determinado pela fórmula empírica proposta por Kalogirou (KALOGIROU, 2001) (Equação (2.43)).

$$NNO = \frac{1}{2}(ENT + SAI) + \sqrt{NPT} \quad (2.43)$$

onde NNO é o número de neurônios na camada oculta, ENT é o número de entradas, SAI é o número de saídas e NPT é o número de padrões de treinamento. A metodologia para a implementação de uma RNA em MATLAB aparece no Apêndice B, mas também pode-se consultar o trabalho de (DE ARMAS et al., 2008).

## CAPÍTULO III

### 3. DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM PROPOSTA

Considere que um equipamento de um sistema térmico, que inicialmente se encontrava numa condição de referência, muda suas condições de operação, seja por causas internas ou externas, como mostrado na Figura 3.1. A nova condição é chamada de condição real. Como consequência, o parâmetro de desempenho do equipamento  $\Psi$  passa de  $\Psi_1$  para  $\Psi_2$ .

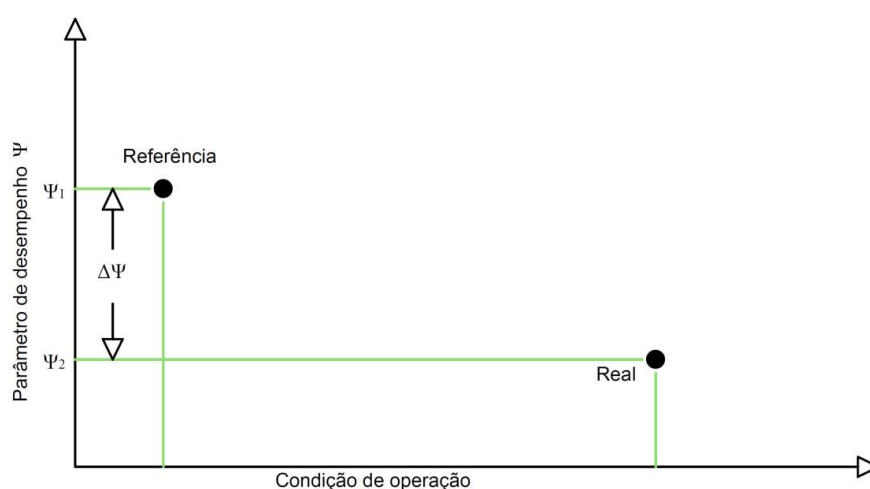


Figura 3.1. Pontos de operação de um equipamento de um ciclo térmico na condição de referência e na condição real.

Considere que existem quatro possíveis curvas de operação do equipamento. Estes quatro casos serão analisados a seguir. Observa também que um equipamento pode ter diferentes curvas de desempenho. Podendo acontecer de forma geral quatro (4) condições típicas, de acordo com a condição de referência:

**Caso 1.** Quando a curva de desempenho do equipamento (sem degradações internas) é similar à curva 1 (linha vermelha) da Figura 3.2. Neste caso existe uma degradação interna do equipamento, já que se tem uma diferença entre o ponto de operação real (ponto D) e o ponto de operação que o equipamento deveria ter (ponto A), isto é, se o equipamento não apresentasse degradação interna sua condição de operação real estaria no ponto A e não no ponto D. Ademais, o valor real da degradação do equipamento (linha A-D) é maior que  $\Delta\Psi$ , portanto se o parâmetro escolhido ( $\Psi$ ) for usado como parâmetro de diagnóstico, se tem uma degradação subestimada ( $\Delta\Psi < \text{Linha A-D}$ ).

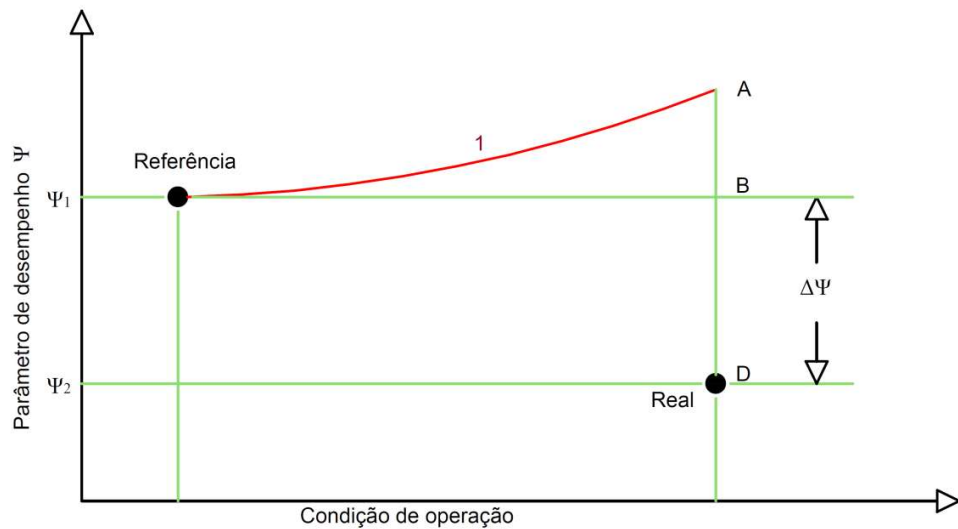


Figura 3.2. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 1.

**Caso 2.** Quando a curva de desempenho do equipamento (sem degradações internas) é similar à curva 2 (linha azul) da Figura 3.3. Neste caso, o parâmetro de desempenho do equipamento permanece constante ao longo de todos os pontos de operação e, portanto, a variação  $\Delta\Psi$  representaria a degradação real do equipamento. Isto é, se o equipamento não apresentasse degradação interna sua condição de operação real estaria no ponto B e não no ponto D. Este comportamento quase nunca acontece.

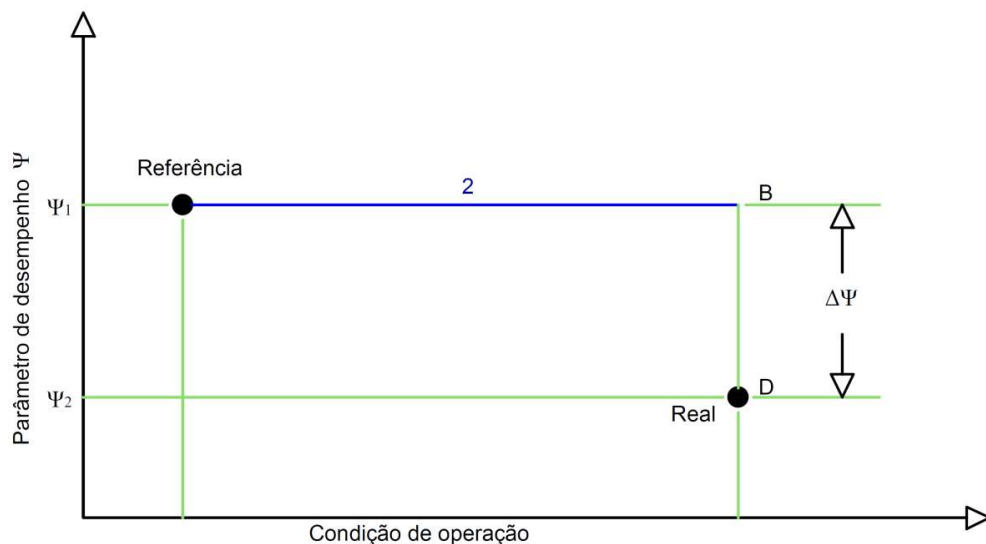


Figura 3.3. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 2.

**Caso 3.** Quando a curva de desempenho do equipamento (sem degradações internas) é

similar à curva 3 (linha verde) da Figura 3.4. Se o equipamento não apresentasse degradação interna sua condição de operação real estaria no ponto C e não no ponto D. Aqui esta anomalia intrínseca esta representada pela linha C-D, mas ainda existe uma diferença entre o valor da variação do parâmetro de desempenho (Linha B-D) e o valor da anomalia intrínseca (Linha C-D). Esta diferença (Linha B-C) é a anomalia induzida para o equipamento. Ao se usar o parâmetro de desempenho escolhido como parâmetro de diagnóstico,  $\Delta\Psi$  resultaria em uma degradação superestimada ( $\Delta\Psi > \text{Linha C-D}$ ). Esta é uma das maiores dificuldades do diagnóstico termoeconômico convencional: as anomalias induzidas.

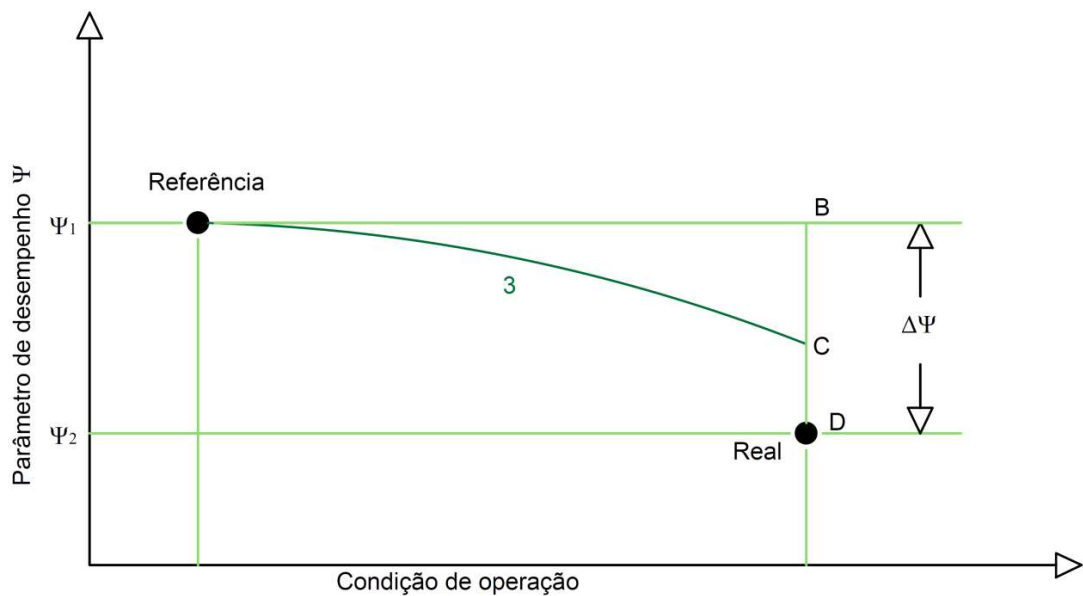


Figura 3.4. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 3.

**Caso 4.** Quando a curva de desempenho do equipamento (sem degradações internas) é similar à curva 4 (linha magenta). O ponto D representa o comportamento esperado para o equipamento na condição real, isto é, o equipamento não apresenta anomalias intrínsecas e  $\Delta\Psi$  indicaria uma degradação interna que não existe no equipamento. Ao se usar o parâmetro de desempenho escolhido como parâmetro de diagnóstico,  $\Delta\Psi$  indicaria uma anomalia induzida.

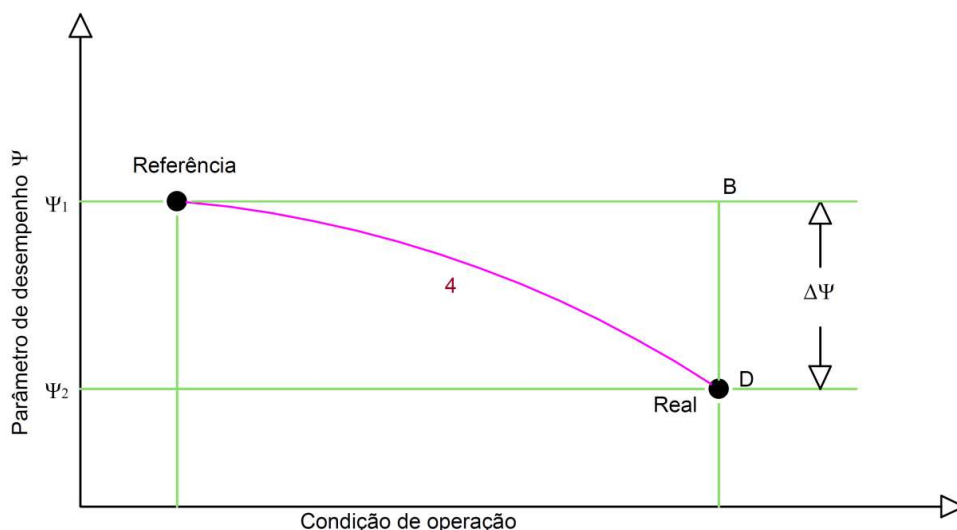


Figura 3.5. Curva de desempenho de um equipamento de um ciclo térmico, condição de referência e condição real para o caso 4.

O diagnóstico termoeconômico convencional, e dentro deste a metodologia de impacto no consumo de combustível, tenta avaliar um sistema usando as duas condições de operação: a condição de referência e a condição real. Este enfoque só teria os resultados desejados se todos os equipamentos do sistema apresentassem o mesmo comportamento descrito no caso 2, isto é, um valor constante de seus parâmetros de desempenho ao longo de todos os pontos de operação. Este comportamento quase nunca acontece, logo aparecem anomalias induzidas e intrínsecas. Os casos 1, 3 e 4 podem ser encontrados nos sistemas reais. Mas, como saber se uma anomalia é induzida ou intrínseca se tem somente informações da condição de referência e da condição real? É aqui onde aparecem os Operadores Exergéticos como uma solução proposta para auxiliar na solução deste problema.

### 3.1.1. A Origem dos Operadores Exergéticos

O conceito de Operador Exergético foi proposto a partir de uma analogia com o fenômeno físico que ocorre quando um raio de luz passa perto de um corpo com grande massa. De acordo com a Teoria da Relatividade de Albert Einstein, quando a luz que vem de um objeto distante (como por exemplo, uma estrela) passa perto de um corpo com grande massa, ela experimenta uma mudança na sua trajetória o que faz com que um observador perceba (de forma errada) a estrela que emitiu a luz numa posição aparente que não é a sua posição real (Figura 3.6). Como foi demonstrado por Einstein e outros cientistas, o desvio da luz vai depender da massa do corpo que causa a curvatura.

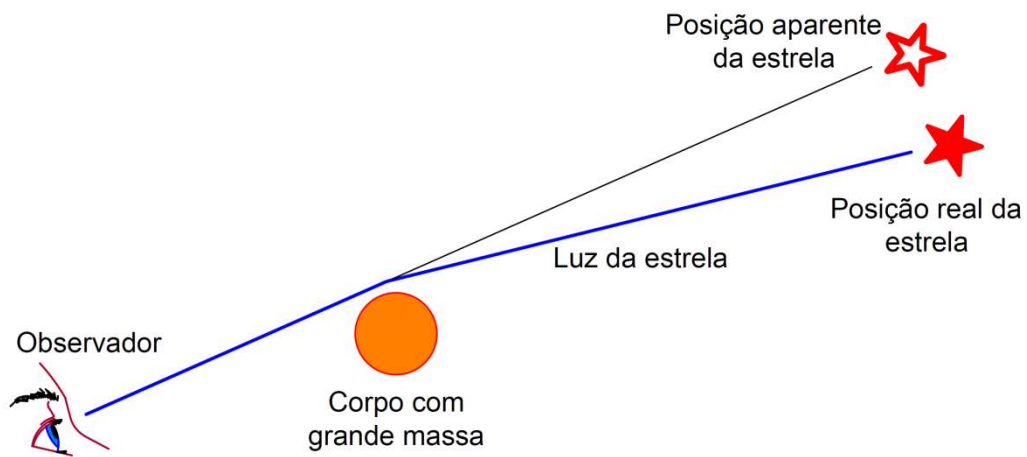


Figura 3.6. Curvatura da luz no espaço-tempo de acordo com a teoria da relatividade

Agora se considera um equipamento que apresenta uma anomalia intrínseca. De forma análoga ao fenômeno relativista, pode-se considerar que uma anomalia tem a capacidade de causar um desvio nas saídas do equipamento, o que faz com que o valor real medido seja diferente do valor que teriam estas mesmas saídas se o equipamento não apresentasse anomalias intrínsecas. O desvio dos valores de saída são maiores para anomalias intrínsecas maiores e menores para anomalias intrínsecas menores. Assim, a Figura 3.6 pode ser modificada, como se mostra na Figura 3.7, onde a posição real da estrela é análoga ao valor de saída para o equipamento sem anomalias intrínsecas, a posição aparente da estrela é análoga ao valor real medido para uma saída dada, o corpo com grande massa é análogo à anomalia intrínseca e o observador é análogo ao instrumento de medição.

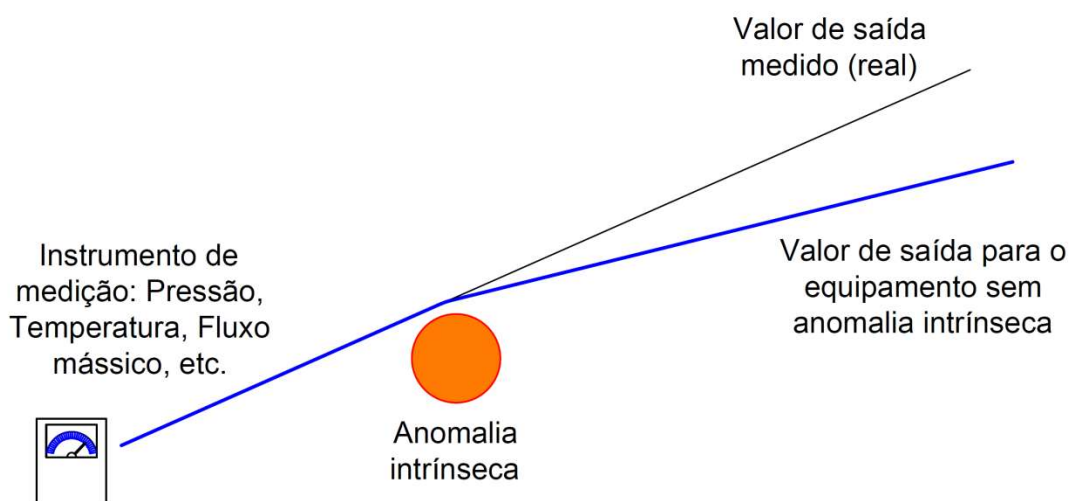


Figura 3.7. Analogia entre os efeitos de uma anomalia e a teoria da relatividade

Considere o equipamento de um sistema térmico hipotético apresentado na Figura 3.8a, onde os valores das entradas e das saídas para um equipamento são expressos em termos de exergia.

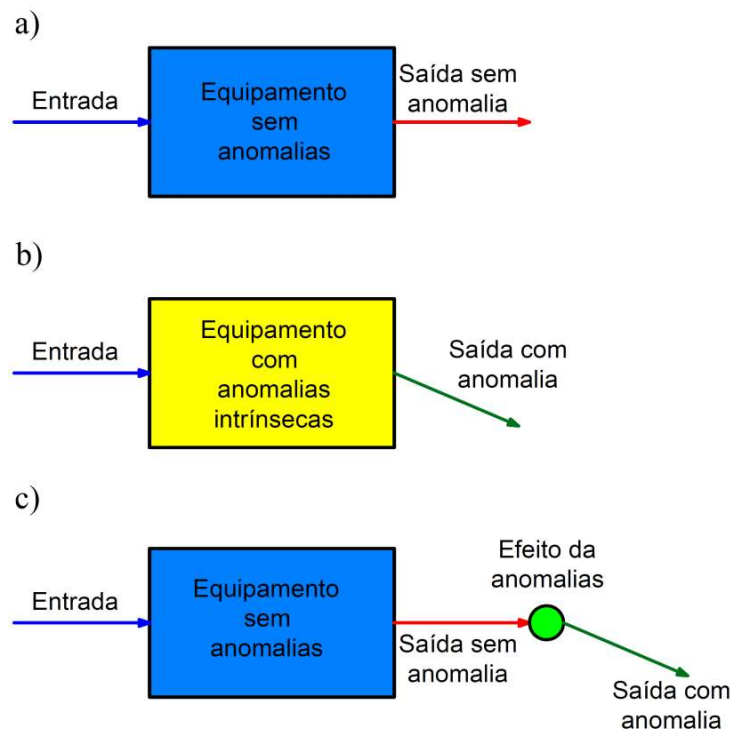


Figura 3.8. Efeito de uma anomalia na saída de um equipamento.

Quando aparece uma anomalia intrínseca no equipamento a saída sofre um desvio, como mostrado na Figura 3.8b. A Figura 3.8c é a representação, num único esquema, das duas condições apresentadas nas Figuras 3.8a y 3.8b. Assim, a Figura 3.8c representa como o efeito de uma anomalia muda o fluxo de saída do equipamento. Este efeito da anomalia (circulo verde) é o que se chama, neste trabalho de **Operador Exergético (OE)**.

### 3.1.2. Os operadores exergéticos aplicados a um sistema simples.

Nesta seção é mostrado, para o sistema simples da seção 2.3.3, como podem ser introduzidos os Operadores Exergéticos num sistema térmico.

Considere o ciclo hipotético apresentado na Figura 3.9a, composto pelos equipamentos A, B e C na condição de referência sem anomalias intrínsecas. Considere agora que os equipamentos do ciclo são separados uns dos outros, mas vão ficar com as mesmas entradas e saídas do modelo original. Estes modelos individuais de cada equipamento são apresentados na Figura 3.9b. Como na condição de referência não existem anomalias intrínsecas, as saídas dos equipamentos do ciclo termodinâmico original (Figura 3.9a) devem ser iguais às saídas dos

equipamentos individuais (Figura 3.9b). Assim, por exemplo, se as entradas  $E_2$  e  $E_5$  do equipamento B do ciclo original (Figura 3.9a) são usadas como entradas do modelo individual B (Figura 3.9b), então o fluxo  $E_3$ , que sai do equipamento B no ciclo original deveria ser igual ao fluxo  $E_3$  que sai do modelo individual B, e assim para todos os equipamentos.

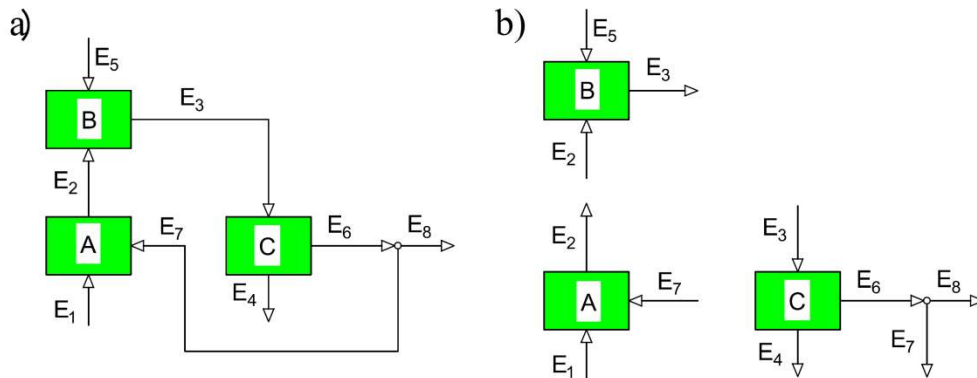


Figura 3.9. a) Ciclo térmico básico na condição de referência. b) Modelos individuais dos equipamentos do ciclo térmico básico na condição de referência

Agora, considere que o equipamento A do ciclo original (Figura 3.9a) apresenta uma anomalia intrínseca, mas não o modelo individual A. Neste caso, o ciclo todo é levado para uma condição diferente da condição de referência. Nesta nova condição (Figura 3.10), que é chamada de condição real, os componentes trabalham em *off design* o que faz com que os fluxos do ciclo (Figura 3.10a) mudam seus valores ( $E_i \rightarrow E_i'$ ) (RÚA; ESCOBAR; VENTURINI, 2013). Se os novos valores de entrada dos equipamentos B e C do ciclo original são usados como as entradas dos modelos individuais B e C (Figura 3.10b) os valores de saída destes modelos individuais deveriam ser iguais às saídas de B e C no ciclo original (agora na condição real), já que estes equipamentos não apresentam anomalias intrínsecas. No entanto, para o equipamento A, que apresenta anomalias intrínsecas na condição real, quando se compara a saída  $E_2$  do ciclo original com a saída  $E_2$  do modelo individual, deveria aparecer uma diferença entre estes dois valores ( $E_2' \neq E_2''$ ), já que para o ciclo original a saída  $E_2$  do equipamento A está afetada por uma anomalia intrínseca, entanto que para o modelo individual A, não há nenhuma anomalia que afete o fluxo  $E_2$ , como mostrado na Figura 3.10 (RÚA; ESCOBAR; VENTURINI, 2013).

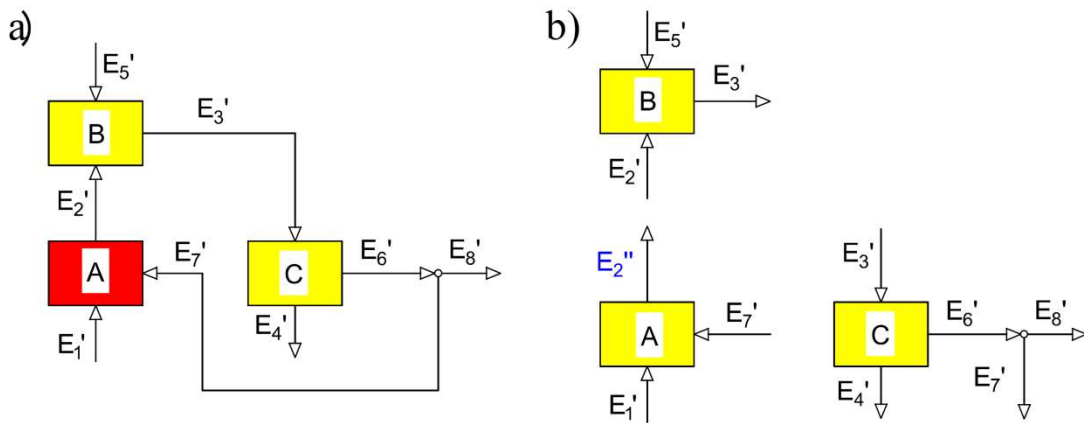


Figura 3.10. a) Ciclo térmico básico na condição real com anomalias no equipamento A. b) Modelos individuais dos equipamentos do ciclo térmico básico com as mesmas entradas dos equipamentos do ciclo térmico básico na condição de teste.

Aplicando o mesmo princípio apresentado na seção 3.1.1, o equipamento A do ciclo original pode ser representado por dois componentes: o modelo individual A ( $A^*$ ) e o efeito da anomalia intrínseca sobre o fluxo  $E_2$ , chamado de Operador Exergético. Esta nova representação do equipamento A é mostrada na Figura 3.11.

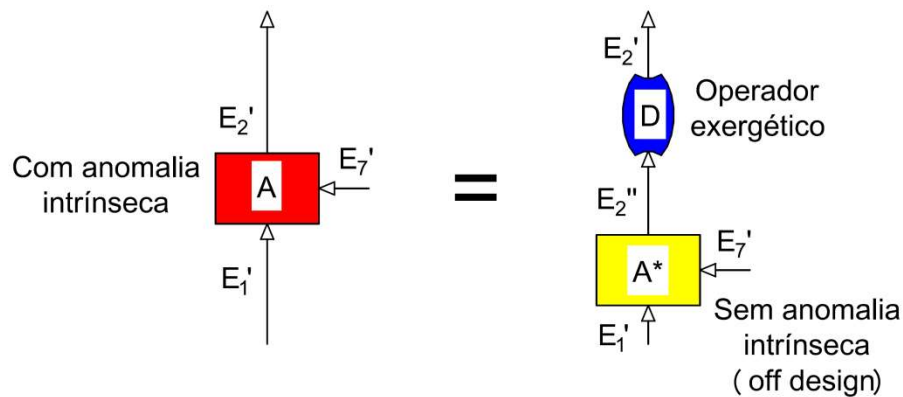


Figura 3.11. Desagregação dos efeitos das anomalias sobre a saída do equipamento A na condição real. Adaptado de Rúa, Escobar e Venturini (2013)

Esta representação será chamada de **representação Equipamento/Operadores Exergéticos (Equip-OE)**. O fluxo  $E_2''$  é o valor de exergia do fluxo de saída  $E_2$  do equipamento A quando as entradas  $E_1$  e  $E_7$  tomam os valores da condição real ( $E_1'$  e  $E_7'$ ), mas o equipamento não apresenta anomalias intrínsecas, isto é, o equipamento segue o comportamento definido por sua curva de desempenho, como foi dito no início desta seção. Assim  $E_2''$  pode ser obtido a partir das curvas de operação de A, de equações matemáticas que descrevem o comportamento de A ou mediante a criação de Redes de Neurônios Artificiais, ou regressão linear caso se

disponha de dados suficientes do comportamento de A para diferentes pontos de operação.

Observe que, neste caso, como o equipamento A só tem uma saída ele terá então só um operador exergético. No caso do equipamento C, que tem duas saídas a sua representação Equip-OE tem um OE no fluxo  $E_4$  e um OE no fluxo  $E_6$ .

A nomenclatura que será usada para designar os OE é a seguinte: O Operador exergético é simbolizado como  $xDy$  onde “x” representa o equipamento onde se produz a anomalia e “y” representa o fluxo de saída, do equipamento em análise. Assim, por exemplo, o OE da Figura 3.11 seria designado como AD2, isto é o OE que afeta o fluxo número 2 do equipamento A.

Substituindo todos os componentes do ciclo original da Figura 3.10a por seus correspondentes representações Equip-OE e aplicando a nomenclatura estabelecida obtém-se uma nova estrutura física do sistema. Esta estrutura (Figura 3.12) será chamada de **Estrutura de Transição (ET)**. Deste modo AD2 é o OE que representa a anomalia intrínseca em A que tem efeito sobre o fluxo  $E_2$ , BD3 é o OE que representa uma anomalia em B que causa um efeito no fluxo  $E_3$  e CD4 e CD6 representam o efeito causado por uma anomalia intrínseca no equipamento C sobre os fluxos  $E_4$  e  $E_6$ , respectivamente.

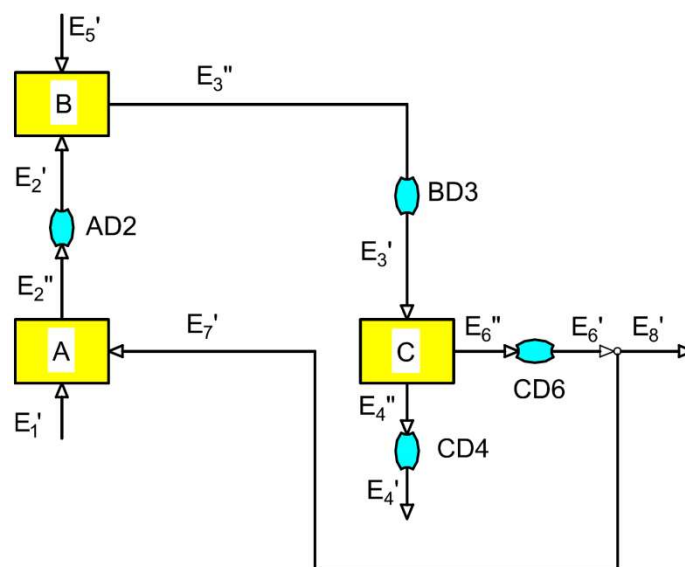


Figura 3.12. Estrutura de transição (ET) para um sistema simples na condição real.

O fluxos  $E_i'$  da ET da Figura 3.12 são obtidos diretamente dos dados medidos na condição real. Os fluxos  $E_i''$  são obtidos, como já foi dito, de curvas de operação fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos, pela modelagem matemática dos componentes ou mediante RNA treinadas com dados de operação dos equipamentos. Com isto ficaria estabelecida a condição real do sistema. Mas como é definida a condição de referência agora que foram

incluídos os OE? Para definir a condição de referência considera-se que: na condição de referência não existem anomalias nos equipamentos, logo  $E_i' = E_i'' = E_i$  (Referência). Assim, como o efeito das anomalias é nulo, uma representação EQUIP-OE para o equipamento A na condição de referência é mostrado na Figura 3.13. O fluxo  $E_2$  tem o mesmo valor tanto na entrada como na saída do OE. A estrutura de transição para a condição de referência é apresentada na Figura 3.14.

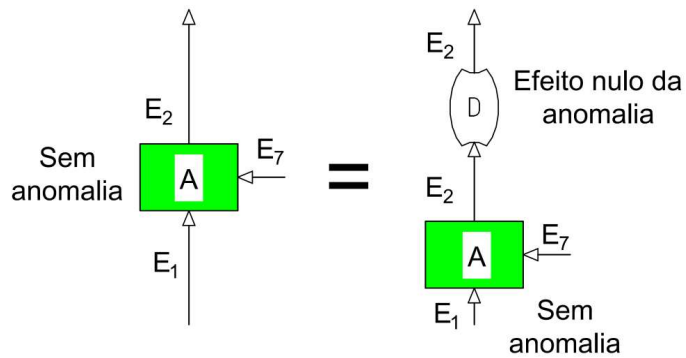


Figura 3.13. Representação EQUIP-OE para o equipamento A na condição de referência. Adaptado de Rúa, Escobar e Venturini (2013)

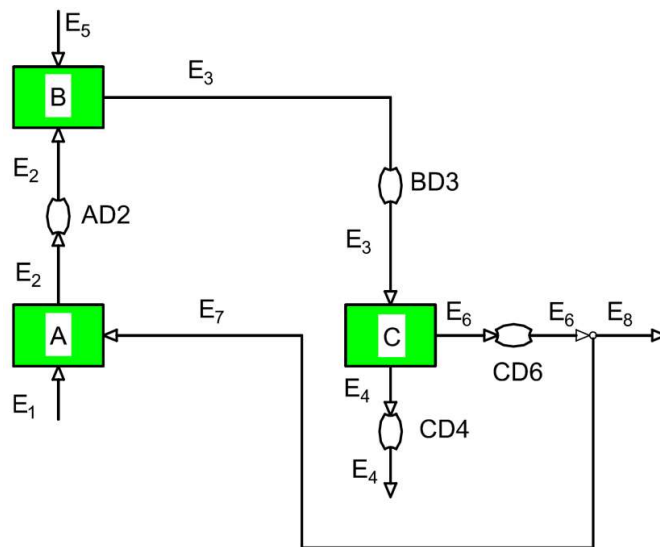


Figura 3.14. Estrutura de transição (ET) para um sistema simples na condição de referência.

De forma geral, os valores para os fluxos  $E_i$ ,  $E_i'$  e  $E_i''$  para a condição de referência e real devem ser estabelecidos de acordo com a Equação (3.1).

$$E_j = \begin{cases} \text{Referência} \rightarrow E_i' = E_i'' = E_i^R \\ \text{Real} \rightarrow (E_i' = E_i^A) \wedge (E_i'' = E_i^{RNA}) \end{cases} \quad (3.1)$$

onde  $E_j$  é o j-ésimo fluxo de exergia,  $E_i'$  é o fluxo de exergia  $i$  entre um equipamento (ou ambiente) e um OE não associado ao equipamento (ou ambiente),  $E_i''$  é o fluxo de exergia  $i$  entre um equipamento e um OE associado ao equipamento,  $E_i^R$  é o fluxo de exergia  $i$  na condição de referência,  $E_i^A$  é o fluxo de exergia  $i$  na condição real e  $E_i^{RNA}$  é o fluxo de exergia  $i$  obtido das RNA, de um modelo matemático ou qualquer outra fonte de informação. Os fluxos  $E_i''$  da Equação (3.1), representam os valores de saída, que alegam Gay, Macfarland e Divinney (1999), serem necessários para calcular a degradação dos componentes, como foi dito na seção de Introdução.

### **3.1.3. Metodologia de Diagnóstico Termoeconômico utilizando a nova abordagem dos operadores exergeticos.**

Foi elaborada uma metodologia para o diagnóstico termoeconômico aplicando os conceitos Operador Exergetico e Estrutura de Transição, usando Redes de Neurônios artificiais para obter os fluxos  $E_i''$  e utilizando a Equação do Impacto no Consumo de Combustível. Um diagrama contendo os passos necessários para executar a metodologia é apresentado na Figura 3.15,.. A seguir a descrição das principais etapas da metodologia proposta.

- 1- Definir a condição de Referência para a Estrutura física.
- 2- Projetar e treinar as RNA. Devem ser criadas as redes neurais artificiais dos componentes principais do ciclo, as quais são treinadas usando dados históricos provenientes do sistema de monitoramento da usina e/ou mediante um simulador termodinâmico (CERRI; BORGHETTI; SALVINI, 2006).
- 3- Definir a condição real da usina para a Estrutura física.
- 4- Simular as RNA. Com dados provenientes da condição real são simuladas as redes de neurônios artificiais para obter as saídas esperadas de cada equipamento do sistema.
- 5- Criar a estrutura de transição (ET). Com os dados da condição de referência se cria a estrutura de transição para a condição de referência e com os dados da condição real, junto com os dados obtidos ao simular as RNA, se cria a estrutura de transição para a condição real mediante a introdução dos operadores exergeticos (OE's).
- 6- Criar a estrutura produtiva de transição. Esta estrutura produtiva se obtém partindo das estruturas de transição de acordo com o modelo de desagregação escolhido pelo projetista, como pode ser: Fluxos de exergia total (modelo E), Exergia total e Neguentropia (Modelo E&S), Entalpia e Neguentropia (Modelo H&S), etc. (PABLO

ARENA; BORCHIELLINI, 1999; SANTOS et al., 2009). A **estrutura produtiva de transição** não é uma estrutura produtiva propriamente dita já que envolve tanto **fluxos produtivos** como **fluxos físicos** (fluxos que entram e saem dos operadores exergéticos). Porém, nesta tese tanto a **estrutura produtiva convencional** como a **estrutura produtiva de transição** serão chamadas simplesmente de **estrutura produtiva**.

- 7- Executa-se a análise termoeconômica.
  - 7.1-1. Para a estrutura produtiva nas condições de referência e real (com anomalias) se faz a Representação F-P-R.
  - 7.1-2. Obtêm-se as matrizes  $\langle KP \rangle$  e  $\langle KR \rangle$  para cada condição.
  - 7.1-3. Elabora-se a matriz unitária  $U_D$  para cada condição.
  - 7.1-4. Cálculo dos operadores: produto  $|P\rangle$ , irreversibilidade  $|I\rangle$ , e resíduo  $|R\rangle$ .
  - 7.1-5. Obtenção do custo exergético unitário dos produtos de cada componente e o impacto dos resíduos no custo dos produtos  $k_{p,i}^*$ .
- 8- Executa-se o diagnóstico termoeconômico.
  - 8.1. Cálculo das Matrizes  $\Delta\langle KP \rangle$  e  $\Delta\langle KR \rangle$ .
  - 8.2. Obtenção da Matriz de Anomalias ( $MF$ ).
  - 8.3. Fazer a soma dos operadores  $|I\rangle$  e  $|R\rangle$ .
  - 8.4. Obtenção da Matriz de disfunções ( $DF$ ).
  - 8.5. Finalmente as Anomalias são somadas às disfunções para obter o desvio no consumo de combustível (Impacto).
- 9- Resultados. Os resultados da metodologia permitem separar as anomalias em suas componentes intrínsecas e induzidas, o que torna possível identificar o equipamento(s) que apresenta(m) uma degradação em seu desempenho na presença de uma ou várias anomalias acontecendo de forma simultânea.

Algumas das etapas podem ser simultâneas ou sequenciais. A metodologia proposta apresenta três etapas a mais que a metodologia de diagnóstico termoeconômico convencional, as quais são as etapas 2, 4 e 5. No entanto, como se verá com um exemplo simples, a metodologia é bem sucedida para identificar anomalias intrínsecas.

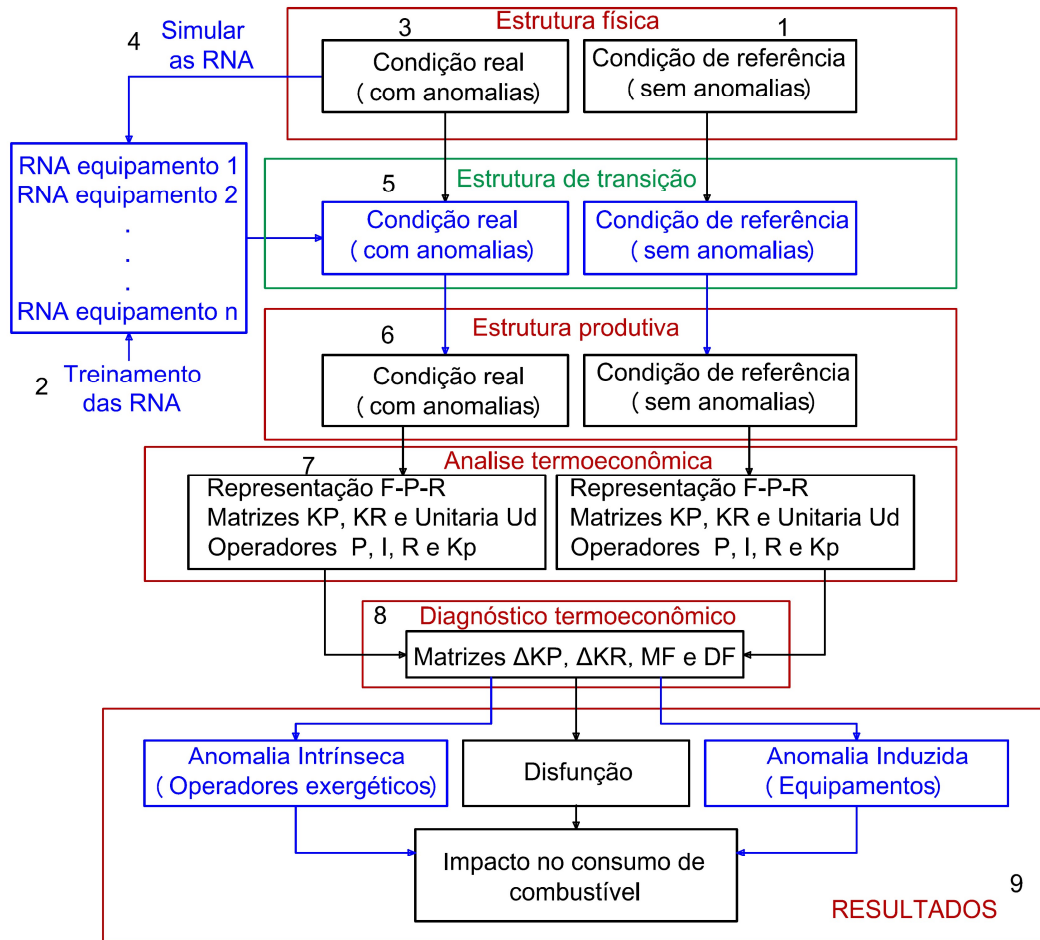


Figura 3.15. Esquema de diagnóstico proposto.

Quando a metodologia é aplicada, anomalias aparecem tanto nos equipamentos do sistema e como nos operadores exergéticos. Por definição, dentro da estrutura de transição os componentes que não são operadores exergéticos não tem degradações internas, assim, todas as anomalias que aparecem nestes equipamentos são do tipo induzido. Conseqüentemente, as anomalias que aparecem nos Operadores Exergéticos são do tipo intrínseco. Para mostrar matematicamente as afirmações anteriores, a Figura 3.8 é modificada para mostrar qual seria o comportamento de um OE se o equipamento desta tem o comportamento descrito pela função da Equação (1.1), que foi apresentada na introdução. O novo esquema é apresentado na Figura 3.16. Na Figura 3.16a, na condição de referência, o equipamento (sem anomalias) tem uma entrada  $x_1$  e uma saída  $Ax_1^3$ . Na condição real (Figura 3.16b) o equipamento apresenta uma anomalia intrínseca, o que faz com que seu coeficiente A mude para B, conseqüentemente o sistema de controle, para tentar manter a produção do equipamento num valor aceitável, muda a entrada  $x_1$  que agora vai ser  $x_2$ . Assim, a saída do equipamento na condição real é  $Bx_2^3$ . Com estas informações se constrói a estrutura de transição, sendo que a condição de referência é

mostrada na Figura 3.16c e a condição real, na Figura 3.16d. Assim, ao se aplicar as mesmas considerações da introdução podem ser calculados os fatores de desempenho para o equipamento e para o operador exergético, tanto na condição de referência como na condição real.

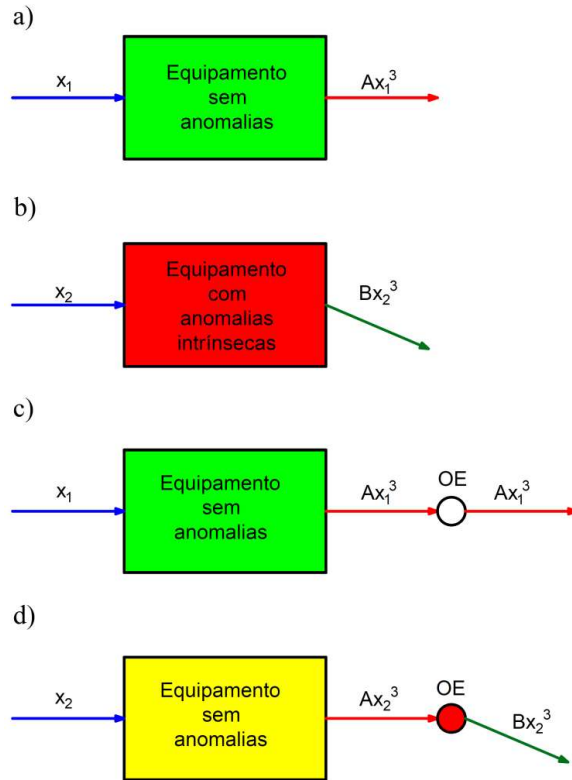


Figura 3.16. Efeito de uma anomalia na saída de um equipamento considerando os OE.

Usando a mesma definição de fator de desempenho da Equação (1.2), para o equipamento na condição de referência seu fator de desempenho é dado pela Equação (3.2) e para o OE é dado pela Equação (3.3).

$$f_{Equip}^{Ref} = \frac{Ax_1^3}{x_1} = Ax_1^2 \quad (3.2)$$

$$f_{OE}^{Ref} = \frac{Ax_1^3}{Ax_1^3} = 1 \quad (3.3)$$

Para a condição real o fator de desempenho do equipamento é apresentado na Equação (3.4) e para o OE, na Equação (3.5).

$$f_{Equip}^{Real} = \frac{Ax_2^3}{x_2} = Ax_2^2 \quad (3.4)$$

$$f_{OE}^{Real} = \frac{Bx_2^3}{Ax_2^3} = \frac{B}{A} \quad (3.5)$$

Combinando a Equação (3.2) com a Equação (3.4) obtém-se a Equação (3.6) que relaciona os fatores de desempenho do Equipamento para as duas condições de operação.

$$f_{Equip}^{Real} = \frac{x_2^2}{x_1^2} f_{Equip}^{Ref} \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) tem a mesma forma da Equação (1.7), logo a anomalia no equipamento é do tipo induzido.

Combinando a Equação (3.3) com a Equação (3.5) obtém-se a relação dos fatores de desempenho do OE (Equação (3.7)).

$$f_{OE}^{Real} = \frac{B}{A} * 1 = \frac{B}{A} f_{OE}^{Ref} \quad (3.7)$$

A Equação (3.7) tem a mesma forma que a Equação (1.5), logo a anomalia calculada no OE é do tipo intrínseco.

### 3.1.4. Aplicação da nova metodologia de diagnóstico termoeconômico a um sistema simples.

Nesta seção a metodologia de diagnóstico utilizando a abordagem dos operadores exergeticos será testada no sistema simples da seção 2.3.3, visando determinar a sua efetividade para identificar anomalias intrínsecas.

1. Definir a condição de Referência. Esta condição foi definida na Tabela 2.1.
2. Projetar e treinar as RNA. Na Tabela A.1, do Apêndice A apresentam-se 300 diferentes pontos de operação para o sistema em estudo, que serão utilizados para projetar e treinar as RNA para cada equipamento. O procedimento para criar e treinar as RNA é apresentado no Apêndice B.

3. Definir a condição real. Esta condição é apresentada na Tabela 2.1.
4. Simular as RNA. Com dados provenientes da condição real são simuladas as redes de neurônios artificiais para obter as saídas esperadas de cada equipamento do sistema. O procedimento é apresentado no Apêndice B.
5. Criar a estrutura de transição (ET). A estrutura de transição é apresentada na Figura 3.12 para a condição real e na Figura 3.14 para a condição de referência.
6. Criar a estrutura produtiva (EP). Baseada na ET é elaborada a EP (Figura 3.17). Neste caso será usado o Modelo termoeconômico de Exergia Total. A relação insumo/produto para os equipamentos A, B e C é a mesma que foi apresentada na Tabela 2.2.

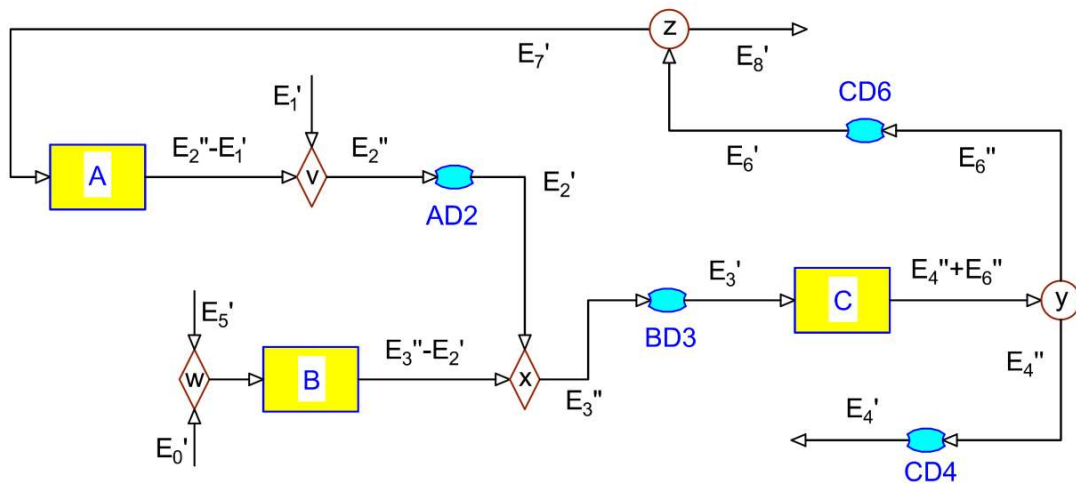


Figura 3.17. Esquema da estrutura produtiva baseada na estrutura de transição da Fig.3.12.

### Aplicar a análise termoeconômica.

A partir das próximas etapas serão usadas as mesmas definições e equações que foram usadas na seção 2.3.3.

7. Para a estrutura produtiva nas condições de referência e real se faz a Representação F-P que é apresentada na Tabela 3.1, para a condição de referência, e na Tabela 3.2 para a condição real.

Tabela 3.1. Representação F-P para o sistema simples com OE na condição de referência

		Insumos												$P_i = \sum P_{ij}$	
		F0	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4		CD6
Produtos	P0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,34</b>
	PA	0,00	0,00	0,00	0,00	5,33		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>5,33</b>
	PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>31,70</b>
	PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>35,19</b>
	PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,33	0,00	0,00	0,00	<b>5,33</b>
	PW	0,00	0,00	100,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,34</b>
	PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,04	0,00	0,00	<b>37,04</b>
	PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,52	16,67	<b>35,19</b>
	PZ	10,00	6,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>16,67</b>
	AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>5,33</b>
	BD3	0,00	0,00	0,00	37,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>37,04</b>
	CD4	18,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>18,52</b>
	CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,67	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>16,67</b>
	$F_i = \sum F_{ji}$		<b>28,52</b>	<b>6,67</b>	<b>100,34</b>	<b>37,04</b>	<b>5,33</b>	<b>100,34</b>	<b>37,04</b>	<b>35,19</b>	<b>16,67</b>	<b>5,33</b>	<b>37,04</b>	<b>18,52</b>	<b>16,67</b>

Tabela 3.2. Representação F-P para o sistema simples com OE na condição real

		Insumos												$P_i = \sum P_{ij}$	
		F0	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4		CD6
Produtos	P0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>103,54</b>
	PA	0,00	0,00	0,00	0,00	5,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>5,33</b>
	PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>32,46</b>
	PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>35,90</b>
	PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,33	0,00	0,00	0,00	<b>5,33</b>
	PW	0,00	0,00	103,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>103,54</b>
	PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,79	0,00	0,00	<b>37,79</b>
	PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,90	17,01	<b>35,90</b>
	PZ	10,00	6,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>16,67</b>
	AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>5,33</b>
	BD3	0,00	0,00	0,00	37,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>37,79</b>
	CD4	18,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>18,52</b>
	CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,67	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>16,67</b>
	$F_i = \sum F_{ji}$		<b>100,34</b>	<b>37,04</b>	<b>103,54</b>	<b>37,79</b>	<b>5,33</b>	<b>103,54</b>	<b>37,79</b>	<b>35,90</b>	<b>16,67</b>	<b>5,33</b>	<b>37,79</b>	<b>18,90</b>	<b>17,01</b>

8. Obtêm-se as matrizes  $\langle KP \rangle$  para cada condição de referência (Tabela 3.3) e real (Tabela 3.4).

Tabela 3.3. Matriz (KP) para a condição de referência

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	3,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
PZ	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>KD</b>	<b>1,25</b>	<b>3,16</b>	<b>1,05</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

Tabela 3.4. Matriz (KP) para a condição real.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	3,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	1,02
PZ	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>KD</b>	<b>1,25</b>	<b>3,19</b>	<b>1,05</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,02</b>	<b>1,02</b>

9. Elaboração de uma matriz unitária  $U_D$  de 12x12 como se mostra na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Matriz unitária  $U_D$  de 12x12.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PB	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PC	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PV	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
PW	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
PX	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
PY	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
PZ	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
AD2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
BD3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CD4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
CD6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

10. Elaboração da matriz  $K_D$  para a condição real que é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Matriz  $K_D$  para a condição real

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	3,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02

11. Cálculo da matriz  $(U_D - (KP))$  (Tabela 3.7) e do operador produto  $|P\rangle$  (Tabela 3.8).

Tabela 3.7. Matriz  $(U_D - (KP))$  para a condição real.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	1,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	-3,19	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	-1,02	-1,02
PZ	-1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,14	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	-1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabela 3.8. Operador produto  $|P\rangle$  para a condição real.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	1,23	0,00	0,18	1,23	0,00	0,17	0,18	0,19	1,23	0,17	0,19	0,19
PB	1,42	1,00	1,12	1,42	0,00	1,06	1,12	1,14	1,42	1,06	1,14	1,14
PC	1,57	0,00	1,23	1,57	0,00	0,22	1,23	1,26	1,57	0,22	1,26	1,26
PV	0,23	0,00	0,18	1,23	0,00	0,17	0,18	0,19	1,23	0,17	0,19	0,19
PW	4,54	3,19	3,56	4,54	1,00	3,38	3,56	3,63	4,54	3,38	3,63	3,63
PX	1,66	0,00	1,30	1,66	0,00	1,23	1,30	1,33	1,66	1,23	1,33	1,33
PY	1,57	0,00	0,23	1,57	0,00	0,22	1,23	1,26	1,57	0,22	1,26	1,26
PZ	1,54	0,00	0,23	1,54	0,00	0,22	0,23	1,23	1,54	0,22	0,23	0,23
AD2	0,23	0,00	0,18	0,23	0,00	0,17	0,18	0,19	1,23	0,17	0,19	0,19
BD3	1,66	0,00	1,30	1,66	0,00	0,23	1,30	1,33	1,66	1,23	1,33	1,33
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
CD6	1,54	0,00	0,23	1,54	0,00	0,22	0,23	1,23	1,54	0,22	0,23	1,23

12. Cálculo da matriz  $(K_D - U_D)$  e do operador de irreversibilidade  $|I\rangle$  que são apresentados

na Tabela 3.9 e na Tabela 3.10, respectivamente.

Tabela 3.9. Matriz ( $K_D - U_D$ ) para a condição real.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	<b>0,25</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	<b>2,19</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	<b>0,05</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>

Tabela 3.10. Operador irreversibilidade |I| para a condição real.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	0,31	0,00	0,05	0,31	0,00	0,04	0,05	0,05	0,31	0,04	0,05	0,05
PB	3,12	2,19	2,44	3,12	0,00	2,32	2,44	2,49	3,12	2,32	2,49	2,49
PC	0,08	0,00	0,06	0,08	0,00	0,01	0,06	0,07	0,08	0,01	0,07	0,07
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
CD6	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03
<b>φ<sub>i,h</sub></b>	<b>3,54</b>	<b>2,19</b>	<b>2,56</b>	<b>3,54</b>	<b>0,00</b>	<b>2,38</b>	<b>2,56</b>	<b>2,63</b>	<b>3,54</b>	<b>2,38</b>	<b>2,63</b>	<b>2,63</b>

Usando a Equação (2.39) e os valores da última linha da matriz |I| da Tabela 3.10, obtêm-se os custos exergéticos para cada equipamento do sistema, como mostrado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Custos exergéticos dos equipamentos dos sistema simples.

Equip.	φ <sub>i,h</sub>	KP*
A	3,54	4,54
B	2,19	3,19
C	2,56	3,56
V	3,54	4,54
W	0,00	1,00
X	2,38	3,38
Y	2,56	3,56
Z	2,63	3,63
AD2	3,54	4,54
BD3	2,38	3,38
CD4	2,63	3,63
CD6	2,63	3,63

## Diagnóstico termoeconômico

13. Obtenção da matriz  $\Delta(KP)$ , como mostrado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12. Matriz  $\Delta(KP)$

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	<b>0,02</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

14. Cálculo da Matriz de Anomalias MF, como mostrado na Tabela 3.13.

Tabela 3.13. Matriz de anomalias **MF** para o sistema estudado.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	<b>0,79</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,38</b>	<b>0,34</b>
PZ	<b>0,01</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>-0,11</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma MF_i$	<b>0,01</b>	<b>0,79</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,38</b>	<b>0,34</b>

15. Cálculo da matriz de disfunções DF, como mostrado na Tabela 3.14.

Tabela 3.14. Matriz de disfunções.

	FA	FB	FC	FV	FW	FX	FY	FZ	AD2	BD3	CD4	CD6
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>-0,03</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>
PB	<b>0,01</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>-0,10</b>	0,00	0,00	<b>-0,01</b>	0,00	<b>0,92</b>	<b>0,83</b>
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>-0,01</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>
PV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PY	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BD3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CD6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>ΣDFi</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,14</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,97</b>	<b>0,87</b>

16. Cálculo do desvio no consumo de combustível causado por degradação nos equipamentos. O impacto no consumo de combustível é obtido ao somar as anomalias com as disfunções usando a Equação (2.38). Na Tabela 3.15 mostra-se o impacto no consumo de combustível para cada equipamento do sistema em estudo.

Tabela 3.15. Anomalias intrínsecas e induzidas, disfunções e impacto no consumo de combustível para um sistema simples.

EQUIP	MF	DF	IMPACT
PA	0,01	0,01	0,02
PB	<b>0,79</b>	0,00	0,79
PC	0,00	0,00	0,00
PV	0,00	0,00	0,00
PW	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	-0,14	-0,14
PY	0,00	0,00	0,00
PZ	0,00	0,00	0,00
AD2	0,00	-0,01	-0,02
BD3	0,00	0,00	0,00
CD4	<b>0,38</b>	0,97	1,34
CD6	<b>0,34</b>	0,87	1,21
TOTAL EQUIP			<b>3,20</b>
MEDIDO			<b>3,20</b>

Como se observa na Tabela 3.15 aparece uma anomalia de 0,79 kW no equipamento B igual ao valor obtido na seção 2.3.3 (Tabela 2.18). Observa-se que, após aplicar o diagnóstico com OE, ao aparecer anomalias nos equipamentos estas serão do tipo intrínsecas. Na Tabela 2.17 da seção 2.3.3, se mostra uma anomalia no equipamento C de 0,76 kW. No entanto, na Tabela 3.15 se observa que o equipamento C não apresenta anomalia, porém aparecem anomalias nos seus operadores exergéticos associados, isto é, CD4 (0,38 kW) e CD6 (0,34 kW), para um valor de anomalia de 0,72 kW. Esta anomalia é intrínseca (apareceu nos OE). Assim, pode-se concluir

que o método de OE permitiu identificar que só o equipamento C tem anomalias intrínsecas, o que não foi possível com o método convencional de diagnóstico. Na Tabela 3.16 apresenta-se uma comparação entre as duas metodologias.

Tabela 3.16. Comparativa dos resultados de diagnóstico convencional contra o diagnóstico usando OE.

Equipamento	Diagnóstico Convencional			Diagnóstico com OE					
	MF total	DF	Impacto	MF intrínseca	MF induzida	MF total	DF	Impacto	
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	
PB	0,79	0,00	0,79	0,00	0,79	0,79	0,00	0,79	
PC	0,76	1,80	2,55	0,72	0,00	0,72	1,84	2,55	
Junções e Bifurcações	0,00	-0,14	-0,14	0,00	0,00	0,00	-0,14	-0,14	
Impacto Total			3,20	Impacto Total					3,20

Observa-se que os impactos no consumo de combustível para cada equipamento de forma individual são iguais nas duas metodologias. E, embora o método dos OE tenha mais junções e bifurcações, o resultado do impacto destes equipamentos fictícios é o mesmo para ambas as metodologias (-0,14 kW).

Só existem diferenças na forma como se distribuem os valores de anomalias e disfunções para o Equipamento C, isto é, no convencional a anomalia é 0,76 kW, e no método com OE é 0,72 kW. Esta diferença de 0,4 kW é agora calculada como parte das disfunções que passam de 1,80 kW no convencional, para 1,84 kW no método com OE.

Uma comprovação dos dados usados para este caso, tanto nesta seção como na seção 2.3.3, pode ser estabelecida através das equações que foram usadas para gerar as condições de referência e real, assim como os dados para treinar as RNA. As equações para o sistema são apresentadas na Tabela 3.17.

Tabela 3.17. Equações usadas para gerar as condições de referência e real, e treinar as RNA para o sistema simples.

Referência	Real
$E_2 - E_1 = 0,8(E_7)$	$E_2 - E_1 = 0,8(E_7)$
$E_3 - E_2 = (E_5)^{0,75}$	$E_3 - E_2 = (E_5)^{0,75}$
$E_4 = 0,5(E_3)$	$E_4 = 0,49(E_3)$
$E_5 = 100,34$	$E_5 = 103,54$
$E_6 = 0,45(E_3)$	$E_6 = 0,441(E_3)$
$E_7 = 0,4(E_6)$	$E_7 = 0,4(E_6)$
$E_8 = E_6 - E_7 = 10$	$E_8 = E_6 - E_7 = 10$

Nesta seção a metodologia de diagnóstico termoeconômico usando os operadores exergeticos foi aplicada para identificar se uma anomalia é do tipo intrínseca o induzida. No próximo capítulo a metodologia será testada para situações onde existem várias anomalias intrínsecas acontecendo simultaneamente.

## CAPÍTULO IV

### 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA A UM CICLO COM TURBINA A GÁS DE QUEIMA EXTERNA

#### 4.1. DESCRIÇÃO DO CICLO EFGT

A Turbina de queima externa (EFGT) é uma tecnologia em desenvolvimento no âmbito da produção de potência e calor em pequena e média escala (KAUTZ; HANSEN, 2007) e a sua utilização permite a geração de energia elétrica para potências inferiores a 1 MWe (AL-ATTAB; ZAINAL, 2015). Num sistema EFGT (Figura 4.1) o combustível é queimado externamente, na maioria das vezes à pressão atmosférica (BAINA et al., 2015), de modo que os gases de combustão não entram em contato direto com as pás de turbina, o que permite usar uma ampla gama de combustíveis, incluindo combustíveis sólidos (como a biomassa), e dispensando um processo intensivo de limpeza do gás. Assim, a energia térmica dos gases de combustão é transferida para o fluido de trabalho na saída do compressor por meio de um trocador de calor de alta temperatura (HTHE- *High Temperature Heat Exchanger*) (COCCO; DEIANA; CAU, 2006).

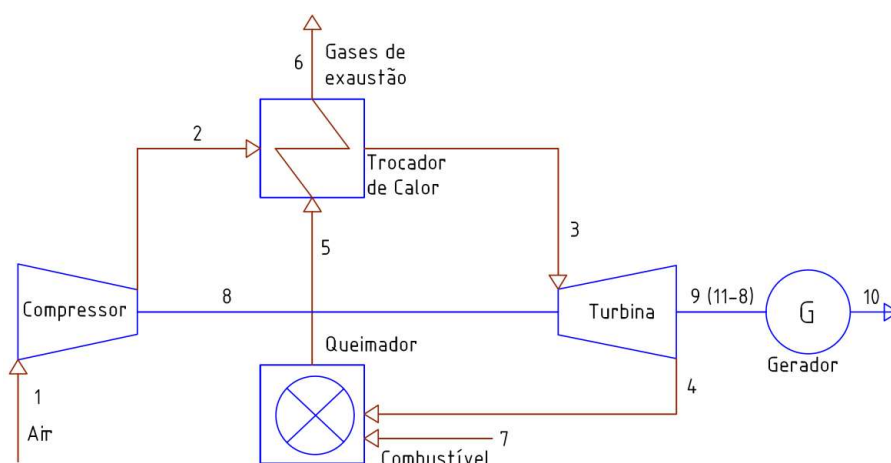


Figura 4.1. Turbina a gás de queima externa. Adaptado de Kautz e Hansen (2007)

Do ponto de vista termodinâmico, o ciclo das turbinas de queima externa tem muitas semelhanças com as turbinas convencionais e pode, portanto, ser descrito termodinamicamente

pelo ciclo de Brayton.

Para o ponto de projeto foram utilizados os dados adotados por Kautz e Hansen (KAUTZ; HANSEN, 2007) com algumas modificações para produzir uma potência líquida de 99,80 kW. O modelo termodinâmico desenvolvido é utilizado para analisar os efeitos causados pelas anomalias nos componentes do ciclo sobre o consumo de combustível.

O ciclo EFGT (Figura 4.1) é formado por um compressor, uma turbina a gás, um trocador de calor e um queimador (ou uma fornalha), onde o combustível é queimado externamente.

Ar sob condições do ambiente (1) entra no compressor, onde é comprimido até uma pressão 4,5 vezes superior à atmosférica alcançando uma temperatura aproximada de 214 ° C. O ar (2) entra imediatamente no trocador de calor, onde é aquecido pelos produtos da combustão resultante da queima de um combustível de baixo poder calorífico, no queimador (5). O ar quente sai do trocador (3) e é expandido na turbina. O ar que sai da turbina (4) é utilizado no queimador para melhorar a eficiência do ciclo. Finalmente, os gases de combustão, depois de fornecerem o calor para o ar no trocador de calor, saem para o ambiente (6). A entrada de combustível, na Figura 4.1, corresponde ao fluxo 7. Os dados da composição do gás combustível usado na turbina EFGT são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Composição do combustível.

<b>Componente</b>	<b>% fração molar</b>
H <sub>2</sub>	10,02
CO	38,91
CO <sub>2</sub>	45,16
CH <sub>4</sub>	4,86
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,14
N <sub>2</sub>	0,93
PCI (kJ/kg)	5471

Todos os cálculos para o ponto de projeto foram realizados usando condições padrão ISO (15 ° C / 101,32 kPa / 60% de humidade) para regime permanente e desconsiderando perdas de carga nas tubulações, trocador de calor e queimador. Os balanços de massa e energia foram realizadas através do software GateCycle<sup>TM</sup> 5.51. Todas as considerações referentes a equações de estado dos gases, propriedades das substâncias, coeficientes de troca de calor, perdas de calor, etc. podem ser consultadas em (GATE CYCLE, 2003).

A Tabela 4.2 apresenta os principais parâmetros do ciclo EFGT em estudo, para ponto de projeto.

Tabela 4.2. Dados de projeto para sistema EFGT

Potência elétrica líquida	99,8	kW
Potência mecânica da turbina	268	kW
Potência mecânica do compressor	162	kW
Eficiência da primeira lei, ISO	25,68	%
Temperatura de entrada do combustível	60	°C
Eficiência do queimador	99,5	%
Temperatura do ar na saída do compressor ( $T_2$ )	214	°C
Temperatura do ar na entrada da turbina ( $T_3$ )	850	°C
Temperatura do ar na saída da turbina ( $T_4$ )	557	°C
Fluxo mássico do ar ( $\dot{m}_1$ )	0,8	kg/s
Fluxo mássico do combustível ( $\dot{m}_7$ )	0,071	kg/s
Fluxo mássico dos gases de combustão ( $\dot{m}_5$ )	0,871	kg/s
Temperatura dos gases de exaustão ( $T_6$ )	329	°C
Temperatura dos gases de combustão ( $T_5$ )	900	°C
Relação de pressão	4,5	
Eficiência isentrópica do compressor	0,768	
Eficiência isentrópica da turbina	0,826	
Área do trocador de calor	164	m <sup>2</sup>
Eficiência do gerador elétrico	98	%

## 4.2. ELABORAÇÃO DA ESTRUTURA DE TRANSIÇÃO DO CICLO EFGT

De acordo com o procedimento apresentado na seção 3.1.2, para a estrutura física da Figura 4.1 os componentes foram substituídos por seu correspondente Equip-OE', para formar a estrutura de transição, como mostrado na Figura 4.2. Todos os valores  $E_i''$  são calculados através das RNA para cada equipamento.

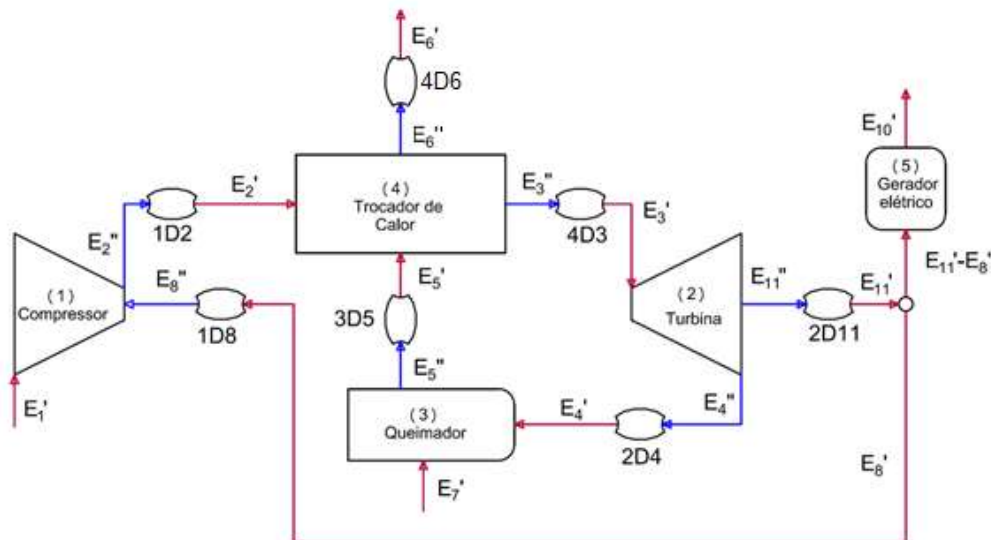


Figura 4.2. Estrutura de transição para o ciclo EFGT

Para obter os dados necessários para treinar as RNA de cada equipamento individual (Compressor, Turbina, Queimador e Trocador de calor) foram feitas várias simulações do modelo EFGT no software GateCycle variando diferentes parâmetros e condições de operação. Por sua vez, os fluxos  $E_i'$ , da Figura 4.2, representam os valores obtidos da condição real do ciclo. Por exemplo, para o compressor na condição real se tem uma entrada de ar que tem uma exergia:  $E_1' = f(T_1', P_1', \dot{m}_1')$ . Se o compressor não apresenta anomalias internas, para uma relação de pressão  $r_p$  dada, tem-se uma pressão de saída  $P_2'' = r_p(P_1')$  e uma temperatura de saída  $T_2''$ . Por balanço de massa  $\dot{m}_2'' = \dot{m}_1'$ . Assim o fluxo de exergia na saída é dado por  $E_2'' = f(T_2'', P_2'', \dot{m}_2'')$ . Para atingir este valor  $E_2''$ , é necessário um consumo de potência de eixo  $E_8''$ . Agora, se o compressor apresenta anomalias internas, para uma mesma relação de pressão e mantendo o fluxo mássico, a pressão de saída é novamente dada por  $P_2' = P_2'' = r_p(P_1')$ , mas como existe uma queda na eficiência do compressor, agora a temperatura na saída é  $T_2' \neq T_2''$ . Como  $\dot{m}_2' = \dot{m}_2'' = \dot{m}_1'$  O fluxo de exergia na saída agora é  $E_2' = f(T_2', P_2', \dot{m}_2') \neq E_2''$ . O operador exergético 1D2 é encarregado de revelar, em termos de anomalias intrínsecas, a diferença entre  $E_2'$  e  $E_2''$ . Para obter o fluxo de exergia  $E_2'$ , é necessário um consumo de potência de eixo  $E_8' \neq E_8''$ . O operador exergético 1D8 revela, também em termos de anomalias, a diferença entre  $E_8'$  e  $E_8''$ .

Analisando o caso do Queimador. Se este equipamento não apresenta anomalias intrínsecas, para uma entrada de ar  $E_4'$  e uma entrada de combustível  $E_7'$  obtém-se uma saída de gases de combustão  $E_5''$ . Se existe uma anomalia intrínseca a saída seria  $E_5'$ . O operador exergético 3D5 revela esta diferença.

Para o trocador de calor se entra ar com  $E_2'$  e os gases de combustão entram com uma exergia  $E_5'$ , se não existem anomalias o ar sai com uma exergia  $E_3''$  e os gases saem com uma exergia  $E_6''$ . Uma anomalia no trocador de calor faz com que a exergia do ar que sai deste equipamento seja  $E_3'$  e que a exergia dos gases de combustão, que também saem do trocador de calor, seja  $E_6'$ . Os operadores exergéticos 4D3 e 4D6 identifica anomalias intrínsecas neste equipamento.

Para a turbina, entra o fluxo  $E_3' = f(T_3', P_3', \dot{m}_3')$  e sai  $E_4'' = f(T_4'', P_4'', \dot{m}_4'')$  onde  $\dot{m}_4'' = \dot{m}_3'$ , por balanço de massa, produzindo uma potência de eixo  $E_{11}''$  quando a turbina não tem anomalias intrínsecas. Quando existirem anomalias intrínsecas na turbina, mantendo o mesmo fluxo mássico  $\dot{m}_4' = \dot{m}_4'' = \dot{m}_3'$ , e mantendo a mesma pressão de descarga ( $P_4' = P_4''$ ), como consequência da anomalia a temperatura na saída da turbina é  $T_4' \neq T_4''$ , assim o fluxo de exergia  $E_4' \neq E_4''$  e se produziria uma potência de eixo  $E_{11}' \neq E_{11}''$ . Os operadores exergéticos 2D4 e 2D11 se encarregam de mostrar as anomalias intrínsecas na turbina.

A partir da estrutura de transição (Figura 4.2) elabora-se uma tabela de insumos e produtos para cada componente (Tabela 4.3), que será usada para elaborar a representação gráfica da estrutura produtiva da Figura 4.3.

Tabela 4.3. Insumos e produtos para o ciclo EFGT

Equipamento	Insumo (F)	Produto (P)
Compressor	$E_8''$	$E_2'' - E_1'$
Turbina	$E_3' - E_4''$	$E_{11}''$
Queimador	$E_7'$	$E_5'' - E_4'$
Trocador de Calor	$E_5'$	$E_3'' - E_2'$
1D2	$E_2''$	$E_2'$
1D8	$E_8'$	$E_8''$
2D4	$E_4''$	$E_4'$
2D11	$E_{11}''$	$E_{11}'$
3D5	$E_5''$	$E_5'$
4D3	$E_3''$	$E_3'$

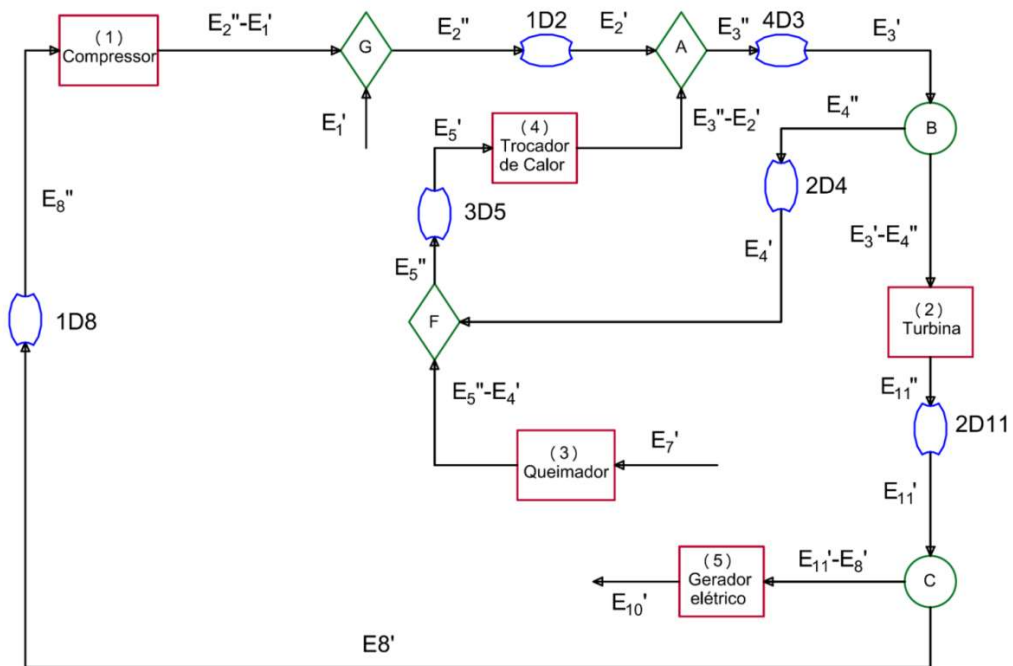


Figura 4.3. Estrutura produtiva do ciclo EFGT baseada na estrutura de transição

Nos cálculos será considerado que os gases que saem do trocador de calor para o ambiente tem custo zero, pelo que o insumo do trocador de calor é  $E_5'$ , e não  $E_5' - E_6''$ . Assim, nesta seção os efeitos causados pela variação dos resíduos é desprezada, conseqüentemente 4D6 não será

tido em conta, mas no Capítulo 6 é apresentada uma proposta para modificar a Equação (2.24), com o objetivo de obter o impacto dos resíduos sobre o consumo de combustível, quando é utilizado o modelo E.

Para mostrar a efetividade da metodologia de diagnóstico com operadores exergéticos se utilizou o que é considerado por alguns autores como (SANTOS et al., 2009) o modelo termoeconômico mais difundido, isto é, o modelo termoeconômico E (Fluxos de exergia total). No capítulo 5 a metodologia será testada usando, além do modelo E, os modelos termoeconômicos E&S e H&S para um ciclo Rankine de potência.

### 4.3. RESULTADOS: ANOMALIAS INTRÍNSECAS

A fim de testar a metodologia proposta considera-se a presença de **anomalias intrínsecas** ( $MF_{int}$ ) nos equipamentos do ciclo EFGT. No *GateCycle* são utilizados fatores de desempenho para simular as degradações nos equipamentos. Muitos dos ícones contidos no *GateCycle* para criar ciclos possuem um o mais fatores de desempenho que podem ser usados para simular anomalias como, por exemplo: degradação, entupimento, quedas de pressão, perdas de eficiência, erosão, etc. Por exemplo, para uma turbina e um compressor, quando se introduz um valor de 0,95 no fator de desempenho do equipamento, isto simula na turbina ou no compressor uma degradação que faz com que a eficiência do equipamento seja multiplicada por 0,95, isto é, uma diminuição de 5% na sua eficiência. Para qualquer trocador de calor, um fator de desempenho de 0,98 indicaria que existe uma degradação que faz com que seu coeficiente global de transferência de calor seja diminuído em 2%. Para um combustor, um fator de desempenho de 0,97 indica uma degradação que faz com que a eficiência do combustor diminua em 3% (GATE CYCLE, 2003).

Para obter os efeitos das anomalias no ciclo EFGT, foi adotado um valor de 0,95 para o fator de desempenho (*performance fator* no *GateCycle*) do equipamento que se considera com anomalias, isto é, uma queda de 5% na eficiência isentrópica do compressor e turbina, na eficiência do queimador e no coeficiente de transferência de calor, para o trocador de calor.

A condição com anomalias seria a condição real do ciclo. Com os dados das entradas de cada equipamento na condição real foram simuladas as RNA para obter as saídas esperadas dos equipamentos individuais na condição real. No Apêndice C apresentam-se as principais informações das RNA usadas neste capítulo. Os dados de temperatura, pressão, fluxo mássico e exergia para a condição de referência, que foi adotada para o sistema, são apresentados na

Tabela 4.4. Para todos os casos, a exergia química não foi considerada, tanto para os fluxos de ar como para os gases de combustão. Assim, considera-se que a exergia dos fluxos de ar e gases de combustão só tem a parte da exergia física. Para o combustível, considera-se a exergia física (já que entra no sistema a 60°C) e a exergia química, só que para aos cálculos a exergia química do combustível se considera igual a seu PCI. No Apêndice D apresenta-se uma comparação, entre cada um dos 15 casos simulados para o sistema EFGT nesta seção, e os mesmos casos quando se considera a exergia química do ar, dos gases de combustão e do combustível, que são calculadas a partir da exergia química padrão e da fração molar de seus componentes. No Apêndice D são apresentadas as equações para calcular a exergia dos fluxos.

Tabela 4.4. Condição de referência para o ciclo EFGT

Fluxo	Referência			
	$\dot{m}$ (kg/s)	$P$ (kPa)	$T$ (°C)	$E$ (kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,800	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,800	455,94	214,1	138,97
3-Ar que sai do trocador	0,800	455,94	850,4	490,62
4- Ar que sai da Turbina	0,800	101,32	557,4	202,12
5- Gases que saem do queimador	0,871	101,32	900,1	470,12
6- Gases que saem do trocador	0,871	101,32	328,7	92,10
7- Combustível	0,071	101,40	60,0	388,77
8-Potência do compressor	-	-	-	162,32
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	99,78
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	267,98

Como para cada equipamento existem unicamente duas opções, ter anomalia ou não ter anomalia, e são quatro os equipamentos que serão considerados com anomalias, pode se considerar um sistema binário de 4 dígitos. Assim, o número binário 0001 representa o caso onde só um equipamento apresenta anomalias e o número binário 1111 representa o caso onde todos os quatro equipamentos têm anomalias. Transformando o número binário 1111 equivale ao número decimal 15, que seria o número de caso que devem ser simulados.

Foram simulados 15 casos com anomalias intrínsecas ocorrendo tanto de forma individual como de foram simultânea nos componentes do ciclo EFGT. Na Tabela 4.5 foi assinalado com um “X” os equipamentos com anomalias intrínsecas para cada caso.

Assim, por exemplo, como mostrado na Tabela 4.4, o caso 12 representa aquela condição de operação onde existem anomalias intrínsecas de forma simultânea no compressor, na turbina e no trocador de calor.

Tabela 4.5. Componentes onde foram simuladas anomalias intrínsecas para cada caso

Caso	Anomalia em			
	Compressor	Turbina	Queimador	Trocador de calor
1	X	-	-	-
2	-	X	-	-
3	-	-	X	-
4	-	-	-	X
5	X	X	-	-
6	X	-	X	-
7	X	-	-	X
8	-	X	X	-
9	-	X	-	X
10	-	-	X	X
11	X	X	X	-
12	X	X	-	X
13	X	-	X	X
14	-	X	X	X
15	X	X	X	X

#### 4.3.1. Caso 1. Compressor com $MF_{int}$

Na Tabela 4.6 são apresentados os principais parâmetros termodinâmicos para a condição real com uma degradação do 5% no fator de desempenho do compressor, assim como para a condição esperada, obtida pela RNA.

A metodologia proposta é aplicada para o Caso 1, obtendo-se os valores de anomalia e disfunção para cada equipamento da estrutura produtiva da Figura 4.3. Como mostrado na Tabela 4.7, pode-se observar que as anomalias que aparecem nos equipamentos: compressor, turbina, queimador, trocador de calor e gerador elétrico são anomalias do tipo induzida, como foi demonstrado matematicamente na seção 3.1.3, e seu cálculo foi feito considerando as saídas obtidas para cada equipamento mediante as RNA (sem anomalias intrínsecas). Desta maneira as anomalias intrínsecas dos componentes do ciclo EFGT estão representadas pelos operadores exergéticos que correspondem a cada equipamento (1D2, 1D8, 2D4, etc.), como foi demonstrado matematicamente na seção 3.1.3. Por exemplo, o Compressor apresenta uma anomalia induzida de -0,16 kW e uma anomalia intrínseca (soma das anomalias nos OE 1D2=-3,55 kW e 1D8=8,70 kW) de 5,14 kW. A Turbina tem uma anomalia induzida de -0,60 kW e uma anomalia intrínseca de 0,01 kW (OE 2D4=-0,00 e 2D11=0,01 kW). O queimador tem uma anomalia intrínseca (OE 3D5) de 0,06 kW e uma anomalia induzida de -3,72 kW. O trocador de Calor tem anomalia intrínseca (OE 4D3) de 0,0 kW e induzida de 4,33 kW. O gerador elétrico tem uma anomalia de 0,21 kW que é do tipo induzida.

Tabela 4.6. Parâmetros termodinâmico e fluxos de exergia para a condição real e a condição esperada para o caso 1

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,805	101,32	15,0	0,00	0,805	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,805	465,71	228,2	146,23	0,805	465,71	217,5	142,50
3-Ar que sai do trocador	0,805	465,71	883,5	518,75	0,805	465,71	883,5	518,75
4- Ar que sai da Turbina	0,805	101,32	579,4	216,47	0,805	101,32	579,4	216,47
5- Gases que saem do queimador	0,881	101,32	933,7	502,59	0,881	101,32	933,8	502,65
6- Gases que saem do trocador	0,881	101,32	348,7	103,09	0,881	101,32	348,7	103,09
7- Combustível	0,075	101,40	60,0	411,17	0,075	101,40	60,0	411,17
8-Potência do compressor	-	-	-	175,18	-	-	-	166,27
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,05	-	-	-	100,05
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	281,34	-	-	-	281,36

Tabela 4.7. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 1.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,16	-0,50
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,55	-13,36
1D8	Operador Exergético Compressor	8,70	24,98
2	Turbina	-0,60	-1,56
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	0,01	0,04
3	Queimador	-3,72	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,06	0,08
4	Trocador de calor	4,33	5,94
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,21	0,61
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-0,95
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (Combustor)	0,00	0,75
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

As disfunções apresentadas nos equipamentos fictícios, isto é, as Junções (losangos que

representam a união de vários fluxos) e bifurcações (círculos que representam a distribuição de fluxos) foram atribuídas aos equipamentos tendo em conta que as disfunções são causadas por mudanças no produto dos componentes. Assim, na Figura 4.3 se observa que a junção A entrega seu produto ao componente 4D3, associado ao trocador de calor, pelo que a disfunção que aparece em A é atribuída ao trocador de calor.

Do mesmo modo a disfunção da Bifurcação B foi atribuída à Turbina, a disfunção da bifurcação C foi atribuída ao gerador elétrico e ao compressor (de acordo com a fração de produto que corresponde ao gerador elétrico e ao compressor), a Junção F ao queimador e a Junção G ao compressor, atendendo à mesma consideração feita para a junção A. Assim, na Tabela 4.8 pode-se observar que o compressor, e a turbina apresentam disfunções de 11,11 kW e -1,52 kW, respectivamente. Entanto o queimador, o trocador de calor e o gerador elétrico apresentam disfunções de 0,83 kW, 4,99 kW e 0,60 kW, respectivamente.

Tabela 4.8. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 1

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,14	-0,16	11,11	16,09
2	Turbina	0,01	-0,60	-1,52	-2,11
3	Queimador	0,06	-3,72	0,83	-2,83
4	Trocador de calor	0,00	4,33	4,99	9,32
5	Gerador Elétrico	0,00	0,21	0,61	0,82
Impacto dos equipamentos					21,29
Impacto pela variação da potência					1,10
Impacto total					22,40
Impacto direto					22,40

Da Tabela 4.8, o equipamento que apresenta uma anomalia intrínseca considerável quando comparada com os outros equipamentos é o Compressor. A anomalia intrínseca do compressor (5,1425 kW) é 86 vezes maior que a anomalia intrínseca do queimador e 400 vezes maior que a anomalia intrínseca da turbina. Isto indica a presença de uma degradação no compressor. Os demais equipamentos apresentam anomalias intrínsecas muito pequenas ou nulas, como mostrado na Figura 4.4. Se considera que valores de anomalia intrínseca menores que 0,25% do impacto no consumo de combustível (GAY; MACFARLAND; DIVINNEY, 1999) podem ter origem nos erros de convergência gerados nas simulações no GateCycle ou nas RNA.

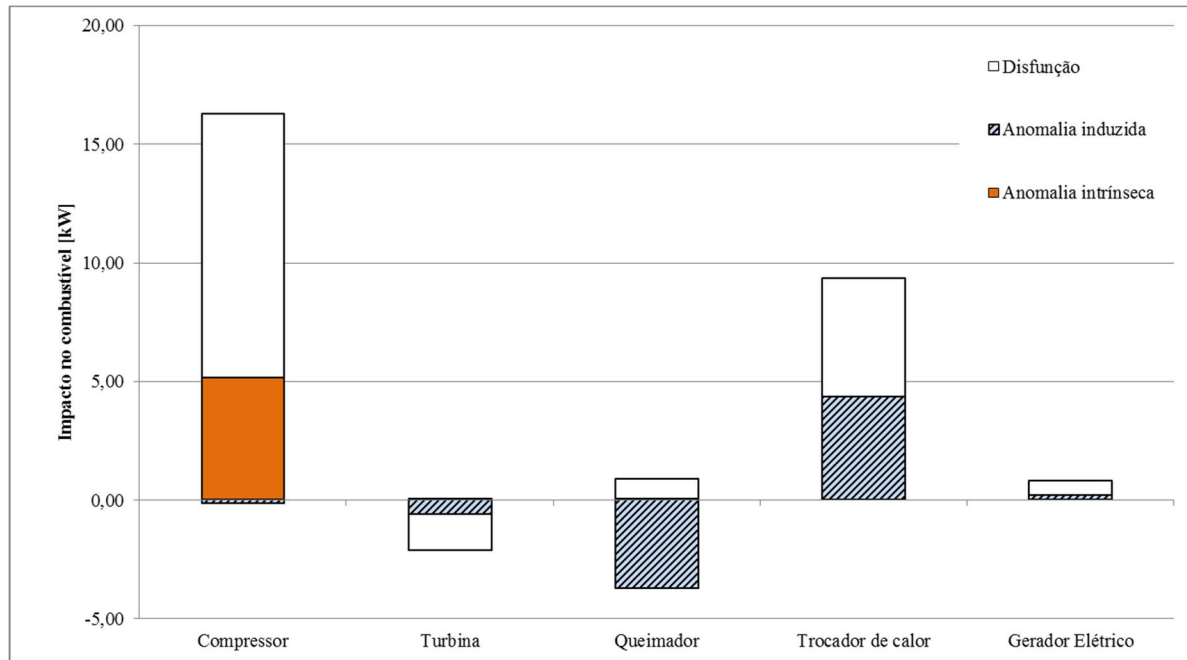


Figura 4.4. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 1

As falhas levam todos os equipamentos a trabalhar fora do seu ponto de projeto, logo neste caso o trocador de calor apresenta uma anomalia induzida positiva (Figura 4.4), isto é, está trabalhando num ponto da sua curva de desempenho onde sua eficiência é menor que na condição de referência (similar às condições mostradas na Figura 3.5).

Porém, para o compressor, a turbina e queimador aparecem anomalias induzidas negativas (-0,16, -0,60 kW e -3,72 kW, respectivamente), isto significa que estes equipamentos estão trabalhando num ponto onde sua curva de desempenho, sem ter em conta as anomalias, que apresenta uma eficiência maior que na condição de referência, isto é, apresenta-se uma condição de operação similar à condição mostrada na Figura 3.2. Isto permite afirmar que a condição de referência escolhida não representa a condição de máxima eficiência para a turbina, nem para o queimador. Em geral, os equipamentos num sistema térmico trabalham em pontos de operação onde nem sempre têm a melhor eficiência de forma individual, mas sim a melhor eficiência para o sistema como um conjunto. O objetivo é a melhor eficiência do sistema como um todo. Observa-se também uma disfunção positiva no compressor, queimador, trocador de calor e no gerador elétrico como consequência principalmente de um aumento no seu produto, e uma disfunção negativa na Turbina, como consequência principalmente de uma diminuição do seu produto, como foi mostrado na seção 2.3.2.

O impacto de cada equipamento no consumo de combustível é apresentado na Tabela 4.8 e Figura 4.5.

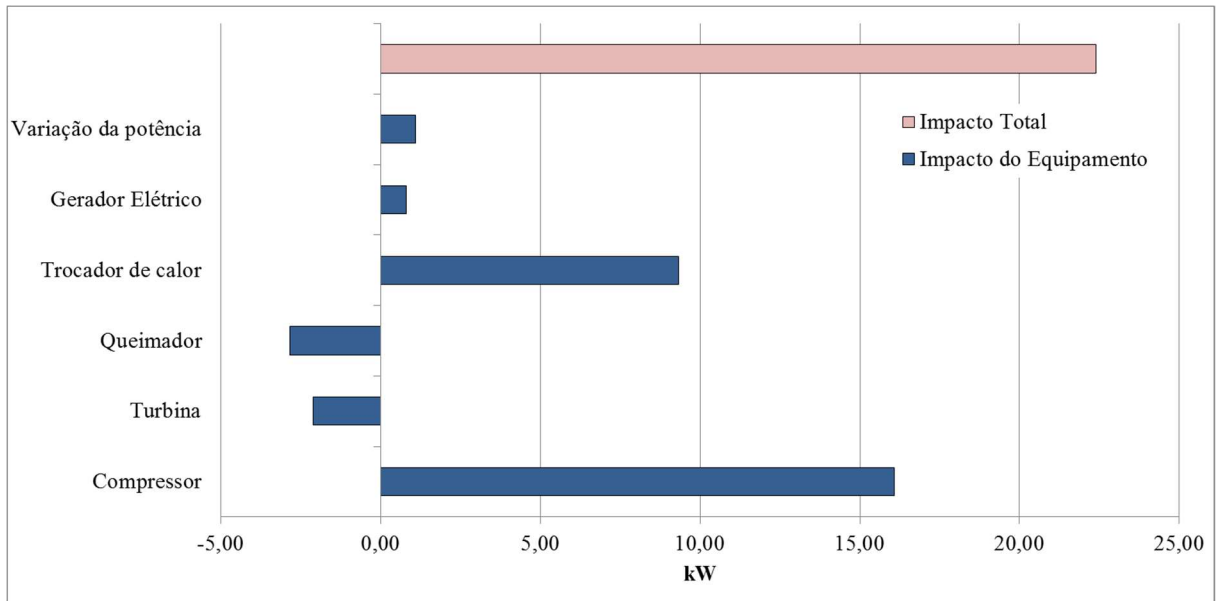


Figura 4.5. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 1

Equipamentos como o compressor, trocador de calor e gerador elétrico causam um aumento no consumo de combustível de 16,09 kW, 9,32 kW e 0,82 kW, respectivamente, como consequência de suas anomalias (intrínsecas e induzidas) e disfunções. A ação conjunta das anomalias e disfunções na turbina e no queimador causam uma diminuição do consumo de combustível de -2,11 kW e -2,83 kW, respectivamente. Assim, os equipamentos têm um impacto no combustível de 21,29 kW.

Porém, existe um impacto no combustível causado pela variação da potência. Isto se deve à existência de uma diferença entre a potência gerada pelo ciclo na condição de referência (99,78 kW) e a potência gerada na condição real (100,05 kW), que correspondem ao fluxo 10 da Tabela 4.4 e Tabela 4.6. Este impacto pela variação da potência é de 1,01 kW e se calcula usando o último termo da Equação (2.23):  ${}^t k_p^* \Delta P_\zeta$ . O impacto total no combustível é de 22,40 kW. Este valor deve ser igual ao obtido de forma direta (impacto direto na Tabela 4.8) que é calculado como a diferença da exergia do combustível entre a condição real e a da condição de referência (Fluxo 7 da Tabela 4.4 e Tabela 4.6). Esta é uma forma de comprovar que os cálculos com matrizes feitos para o diagnóstico estão corretos para as considerações adotadas.

#### 4.3.2. Caso 2. Turbina com $MF_{int}$

Este caso corresponde a uma degradação de 5% no desempenho da Turbina do ciclo EFGT onde a condição real e esperada (RNA) são apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Parâmetros termodinâmico e fluxos de exergia para a condição real e a condição esperada para o caso 2.

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,805	101,32	15,0	0,00	0,805	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,805	470,59	219,2	143,64	0,805	470,59	219,2	143,63
3-Ar que sai do trocador	0,805	470,59	906,0	534,97	0,805	470,59	906,0	534,97
4- Ar que sai da Turbina	0,805	101,32	611,4	235,51	0,805	101,32	595,4	225,83
5- Gases que saem do queimador	0,879	101,32	958,6	521,95	0,879	101,32	958,6	521,95
6- Gases que saem do trocador	0,879	101,32	345,4	101,27	0,879	101,32	345,4	101,27
7- Combustível	0,075	101,40	60,0	407,78	0,075	101,40	60,0	407,78
8-Potência do compressor	-	-	-	167,53	-	-	-	167,51
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	99,94	-	-	-	99,94
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	273,55	-	-	-	287,99

Os resultados do diagnóstico são mostrados na Tabela 4.10, Tabela 4.11 e na Figura 4.6, onde pode-se observar que a Turbina apresenta uma anomalia intrínseca de 14,15 kW no OE 2D11 e -8,31 kW no OE 2D4, sendo o equipamento com degradação interna. Para os demais equipamentos existem anomalias intrínsecas com valores menores que 0,1% do impacto no consumo de combustível o que lhes dá uma baixa probabilidade de degradação.

Observa-se também que o compressor, a turbina, o trocador e o queimador têm anomalias induzidas negativas (-0,25 kW, -0,84 kW, -1,09 kW e -7,24 kW, respectivamente) o que significa que os parâmetros de operação dados na condição real representam pontos da curva de operação destes equipamento que apresentam uma melhor eficiência (Condição apresentada na Figura 3.2). As disfunções com valores positivos representam um incremento no produto do equipamento, como é o caso da turbina (15,55 kW), o queimador (18,42 kW) e o gerador elétrico (0,52 kW). Uma diminuição no produto para o trocador de calor e o compressor se traduz numa disfunção de -12,07 kW e -0,67 kW, respetivamente.

As disfunções com valores positivos representam um incremento no produto do equipamento, como é o caso da turbina (12,78 kW), do queimador (20,92 kW) e do gerador elétrico (0,52 kW). Uma diminuição no produto do trocador de calor e do compressor se traduz numa disfunção de -11,10 kW e -0,67 kW, respetivamente.

Tabela 4.10. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 2

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,25	-0,70
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,01	-0,03
1D8	Operador Exergético Compressor	0,02	0,06
2	Turbina	-0,84	-2,02
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,31	-19,97
2D11	Operador Exergético Turbina	14,15	37,54
3	Queimador	-7,24	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	0,00
4	Trocador de calor	-1,09	-1,36
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,18	0,52
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-10,70
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	18,42
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Tabela 4.11. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 2.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	0,01	-0,25	-0,67	-0,91
2	Turbina	5,84	-0,84	15,55	20,55
3	Queimador	0,00	-7,24	18,42	11,18
4	Trocador de calor	0,00	-1,09	-12,07	-13,15
5	Gerador Elétrico	0,00	0,18	0,52	0,70
Impacto dos equipamentos					18,37
Impacto pela variação da potência					0,65
Impacto total					19,01
Impacto direto					19,01

A pesar de que a turbina foi o equipamento identificado com uma anomalia intrínseca com um impacto no consumo de combustível de 20,55 kW, o queimador apresenta um impacto de 11,18 kW que é mais da metade do impacto da turbina, mas este impacto do queimador é compensado pelo impacto do trocador (-13,15 kW) e do compressor (-0,91 kW). Ao final, tendo em conta o impacto pela variação da potência (0,65 kW) e o impacto do gerador elétrico (0,70 kW), o impacto no consumo de combustível total é 19,01 kW (Figura 4.7), coincidindo como o valor obtido diretamente (Fluxo 7 das Tabelas 4.4 e 4.9).

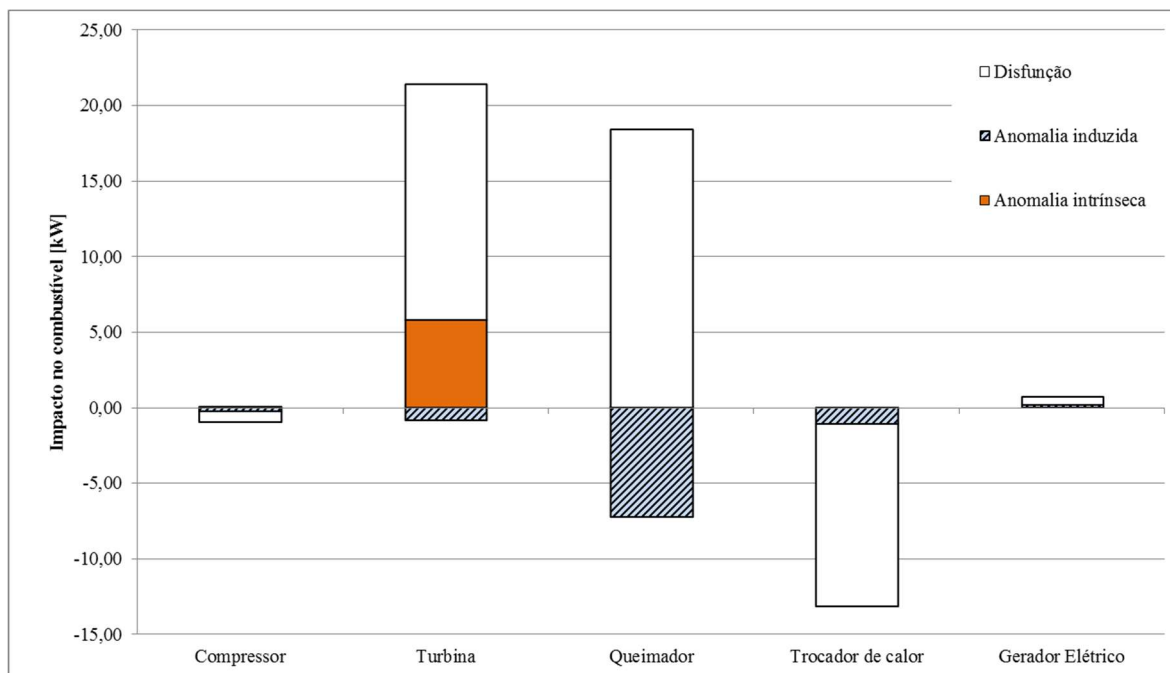


Figura 4.6. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 2.

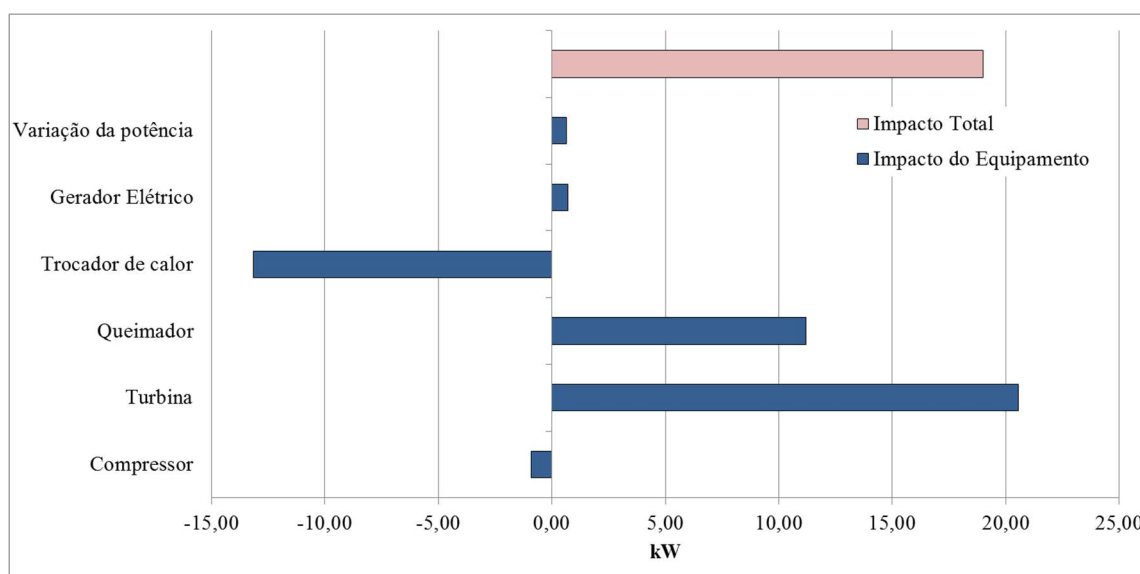


Figura 4.7. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 2

### 4.3.3. Caso 3. Queimador com $MF_{int}$

A Tabela 4.12 apresenta os dados termodinâmicos para a condição real, assim como também para a condição esperada, que é obtida considerando uma anomalia no Queimador representada por uma diminuição de 5% no seu desempenho.

Tabela 4.12. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada: caso 3

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,807	101,32	15,0	0,00	0,807	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,807	459,05	215,4	141,02	0,807	459,05	215,3	140,98
3-Ar que sai do trocador	0,807	459,05	848,7	494,01	0,807	459,05	848,7	494,01
4- Ar que sai da Turbina	0,807	101,32	554,9	202,31	0,807	101,32	554,8	202,29
5- Gases que saem do queimador	0,883	101,32	896,9	474,27	0,883	101,32	916,3	489,88
6- Gases que saem do trocador	0,883	101,32	331,7	94,82	0,883	101,32	331,7	94,82
7- Combustível	0,076	101,40	60,0	416,49	0,076	101,40	60,0	416,49
8-Potência do compressor	-	-	-	164,73	-	-	-	164,65
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,05	-	-	-	100,05
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	270,95	-	-	-	271,00

Como pode-se observar na Tabela 4.13 e Tabela 4.14, e na Figura 4.8 a metodologia identifica o queimador como o equipamento degradado, com uma anomalia intrínseca de 15,48 kW (OE 3D5).

Tabela 4.13. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 3

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,02	-0,06
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,04	-0,13
1D8	Operador Exergético Compressor	0,09	0,25
2	Turbina	-0,03	-0,09
2D4	Operador Exergético Turbina	-0,02	-0,06
2D11	Operador Exergético Turbina	0,05	0,16
3	Queimador	-0,63	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,48	20,96
4	Trocador de calor	2,36	3,37
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,26	0,77
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	1,42
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	-17,49
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Os valores de anomalias intrínsecas na Tabela 4.13, menores que 0,2% do impacto no consumo de combustível, para o compressor (soma dos OE 1D2=-0,04 e 1D8=0,05 kW) e para

turbina (2D4=-0,02 kW e 2D11=0,05 kW), indicam que estes equipamentos não apresentam anomalias intrínsecas e, se as apresentam, estas não são consideráveis.

Tabela 4.14. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 3.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	0,05	-0,02	0,06	0,09
2	Turbina	0,03	-0,03	0,02	0,02
3	Queimador	15,48	-0,63	3,47	18,31
4	Trocador de calor	0,00	2,36	4,80	7,15
5	Gerador Elétrico	0,00	0,26	0,77	1,03
Impacto dos equipamentos					26,60
Impacto pela variação da potência					1,12
Impacto total					27,72
Impacto direto					27,72

Os equipamentos que têm um impacto importante no consumo de combustível são o queimador, com 18,31 kW e o trocador de calor, com 7,15 kW. A variação na potência gerada tem um impacto de 1,12 kW, enquanto o compressor e a turbina não apresentam impactos consideráveis (Figura 4.9).

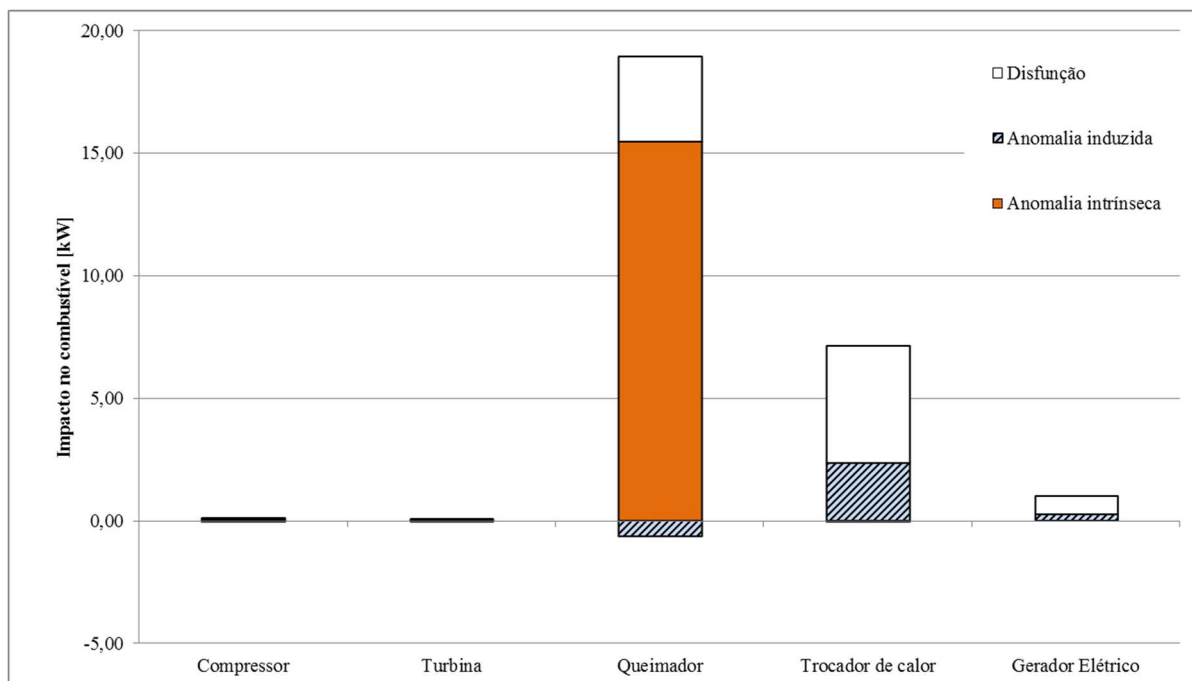


Figura 4.8. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 3.

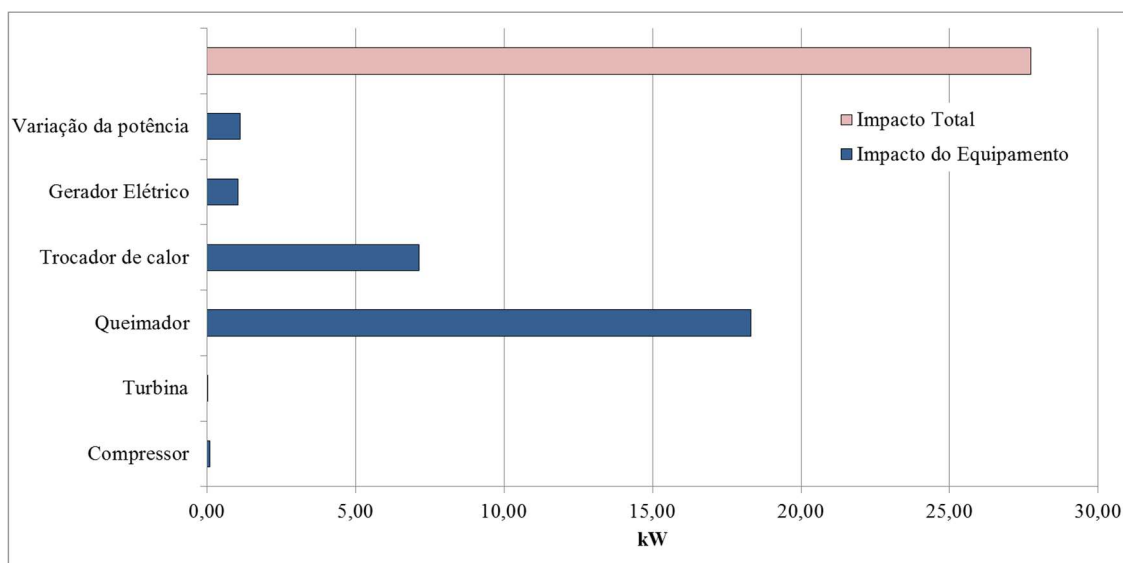


Figura 4.9. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 3

#### 4.3.4. Caso 4. Trocador de calor com $MF_{int}$

A Tabela 4.15 apresenta os dados termodinâmicos para a condição real e condição esperada quando é simulada uma diminuição de 5% no desempenho do trocador de calor. Os resultados obtidos ao aplicar a metodologia proposta nesta tese são apresentados nas Tabela 4.16 e Tabela 4.17 e na Figura 4.10.

Tabela 4.15. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e esperada para o caso 4

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,801	101,32	15,0	0,00	0,801	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,801	456,74	214,3	139,32	0,801	456,74	214,4	139,36
3-Ar que sai do trocador	0,801	456,74	850,2	491,25	0,801	456,74	853,1	493,27
4- Ar que sai da Turbina	0,801	101,32	557,1	202,18	0,801	101,32	557,0	202,17
5- Gases que saem do queimador	0,873	101,32	902,7	473,24	0,873	101,32	902,7	473,24
6- Gases que saem do trocador	0,873	101,32	332,7	94,22	0,873	101,32	332,7	92,79
7- Combustível	0,072	101,40	60,0	393,10	0,072	101,40	60,0	393,10
8-Potência do compressor	-	-	-	162,68	-	-	-	162,77
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	99,86	-	-	-	99,86
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	268,47	-	-	-	268,46

Tabela 4.16. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 4

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,01	-0,02
1D2	Operador Exergético Compressor	0,04	0,13
1D8	Operador Exergético Compressor	-0,10	-0,26
2	Turbina	0,07	0,16
2D4	Operador Exergético Turbina	-0,01	-0,03
2D11	Operador Exergético Turbina	-0,01	-0,03
3	Queimador	-0,11	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	-0,01
4	Trocador de calor	0,07	0,09
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,02	4,92
5	Gerador Elétrico	0,04	0,11
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-0,49
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	-2,55
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Tabela 4.17. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 4.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	-0,06	-0,01	-0,15	-0,22
2	Turbina	-0,02	0,07	0,10	0,15
3	Queimador	0,00	-0,11	-2,55	-2,67
4	Trocador de calor	2,02	0,07	4,51	6,60
5	Gerador Elétrico	0,00	0,04	0,11	0,15
Impacto dos equipamentos					4,00
Impacto pela variação da potência					0,33
Impacto total					4,33
Impacto direto					4,33

Como mostrado na Tabela 4.17, o Trocador de calor e o queimador são os equipamentos com maiores disfunções, com 4,51 kW e -2,55 kW, respectivamente, o que representa um aumento no produto do trocador de calor e uma diminuição do produto do queimador. O impacto no combustível do trocador de calor (6,60 kW) é em parte compensado pelo impacto do queimador (-2,67 kW), logo o impacto no combustível causado pelos equipamentos é de 4,00 kW, que junto ao impacto pela variação da potência gerada (0,33 kW), causam uma variação do consumo total de 4,33 kW (Figura 4.11).

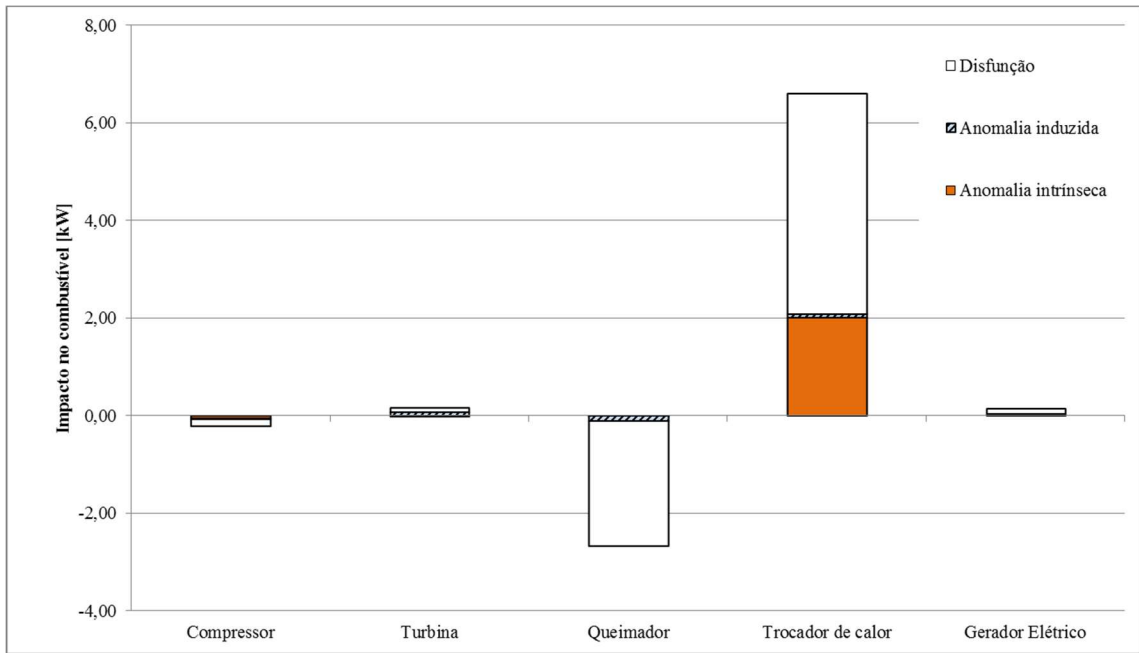


Figura 4.10. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 4

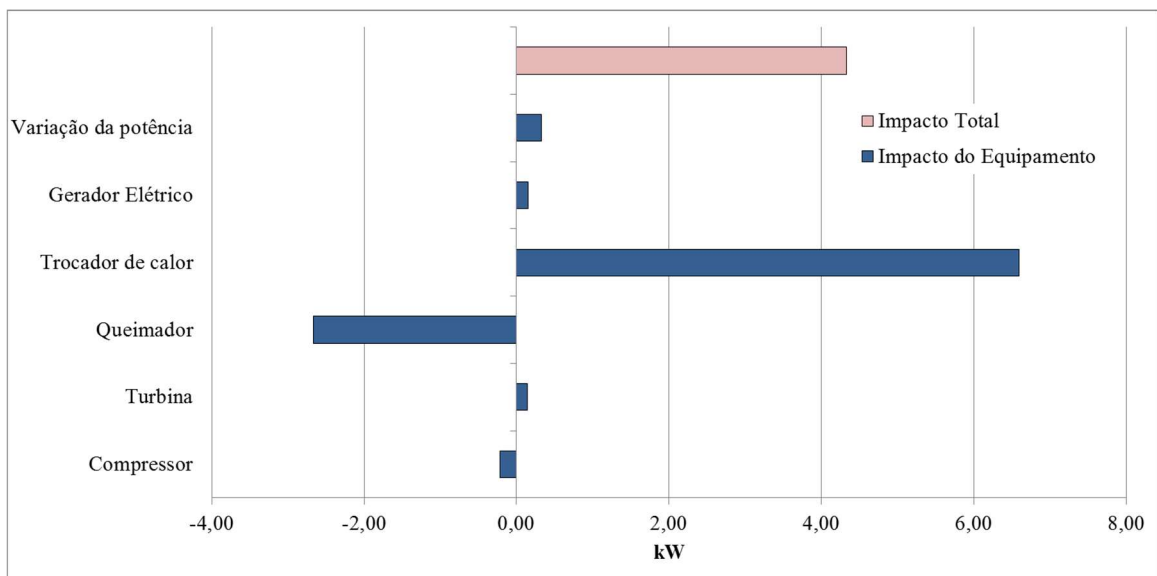


Figura 4.11. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 4

Até este ponto a metodologia de operadores exergeticos foi aplicada aos casos onde existe anomalia em um único equipamento do ciclo EFGT, obtendo-se como resultado a identificação do equipamento com degradação interna, assim como o valor das anomalias e disfunções em termos de insumos (impacto no consumo de combustível). Várias das metodologias apresentadas no Capítulo 2 têm bons resultados quando existe só uma anomalia intrínseca, o que não representaria uma novidade. Agora, na presença de mais de uma anomalia, as metodologias desenvolvidas nas últimas décadas apresentam falhas. Por isso, a seguir serão

apresentados os casos onde existem anomalias em dois equipamentos de forma simultânea, para mostrar se a metodologia proposta é capaz de isolar estes equipamentos degradados. Atendendo à metodologia proposta, lembra-se para o leitor, que ao se aplicar a metodologia de diagnóstico usando os OE, o valores de anomalias que aparecem nos OE são as anomalias intrínsecas e os valores de anomalias que aparecem nos equipamentos compressor, turbina, trocador de calor, queimador e gerador elétrico são anomalias induzidas, como já foi demonstrado matematicamente.

#### 4.3.5. Caso 5. Compressor e turbina com $MF_{int}$

Foram simuladas anomalias intrínsecas na turbina e no compressor do ciclo EFGT que foi desenvolvido no software GateCycle. Novamente estas anomalias são representadas por uma diminuição de 5% no desempenho dos equipamentos degradados.

A Tabela 4.18 mostra os parâmetros termodinâmicos para a condição real do ciclo, assim como os valores obtidos pelas RNA.

Tabela 4.18. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 5

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,810	101,32	15,0	0,00	0,810	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,810	480,02	233,2	150,94	0,810	480,02	222,4	147,09
3-Ar que sai do trocador	0,810	480,02	940,0	564,77	0,810	480,02	940,0	564,77
4- Ar que sai da Turbina	0,810	101,32	634,5	251,49	0,810	101,32	617,8	241,11
5- Gases que saem do queimador	0,889	101,32	993,1	556,85	0,889	101,32	993,1	556,85
6- Gases que saem do trocador	0,889	101,32	365,6	112,91	0,889	101,32	365,6	112,91
7- Combustível	0,079	101,40	60,0	431,00	0,079	101,40	60,0	431,00
8-Potência do compressor	-	-	-	180,42	-	-	-	171,39
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,17	-	-	-	100,17
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	286,90	-	-	-	302,14

Os resultados do diagnóstico usando operadores exergeticos são mostrados na Tabela 4.19, e Tabela 4.20 e na Figura 4.12, onde se observam anomalias intrínsecas na turbina (OE 2D11=14,24 kW e 2D4=-8,35 kW) e no compressor (OE 1D2=-3,54 kW e 1D8=8,55 kW), mas não nos outros equipamentos, já que o OE 3D5 associado ao queimador tem uma anomalia

de 0,00 kW e o OE 4D3 associado ao trocador de calor também tem um valor de 0,00 kW. Assim, conclui-se que a metodologia neste caso é efetiva do ponto de vista da identificação dos equipamentos com degradação interna para anomalias intrínsecas acontecendo de forma simultânea em dois equipamentos do ciclo EFGT.

Tabela 4.19. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 5.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,40	-1,31
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,54	-14,02
1D8	Operador Exergético Compressor	8,55	26,07
2	Turbina	-1,44	-3,72
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,35	-21,61
2D11	Operador Exergético Turbina	14,24	40,48
3	Queimador	-10,49	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	0,00
4	Trocador de calor	3,07	4,08
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,40	1,22
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-13,38
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	20,70
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Tabela 4.20. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 5.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,02	-0,40	10,73	15,34
2	Turbina	5,89	-1,44	15,16	19,61
3	Queimador	0,00	-10,49	20,70	10,21
4	Trocador de calor	0,00	3,07	-9,31	-6,24
5	Gerador Elétrico	0,00	0,40	1,22	1,63
Impacto dos equipamentos					40,54
Impacto pela variação da potência					1,69
Impacto total					42,23
Impacto direto					42,23

A maioria dos componentes do ciclo têm um aumento no seu produto (disfunções positivas na Tabela 4.20), exceto o trocador de calor, que tem uma diminuição do seu produto, o que se traduz numa disfunção de -9,31 kW.

O compressor e a turbina tem valores de impacto no combustível de 15,34 kW e 19,61 kW, respectivamente. Observa-se também que, apesar de o queimador não apresentar degradações internas, tem um impacto no combustível considerável (10,21 kW), o que mostra que se for aplicada alguma das metodologias de diagnóstico convencional poderia se fornecer um diagnóstico errado ao considerar uma degradação no queimador que realmente não existe.

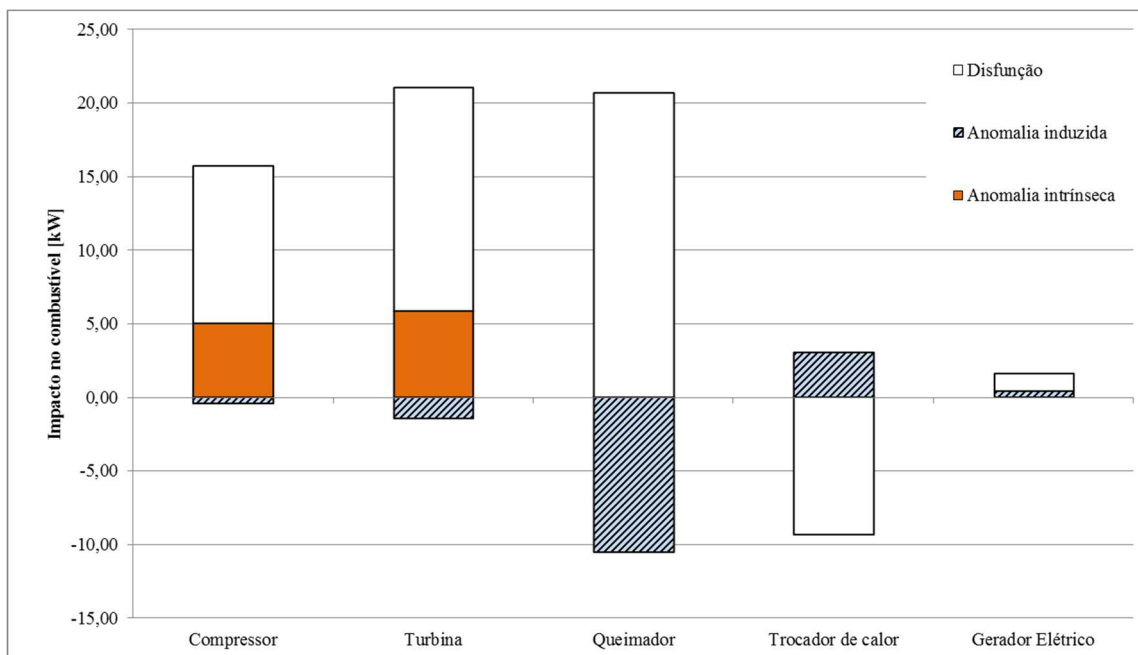


Figura 4.12. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 5

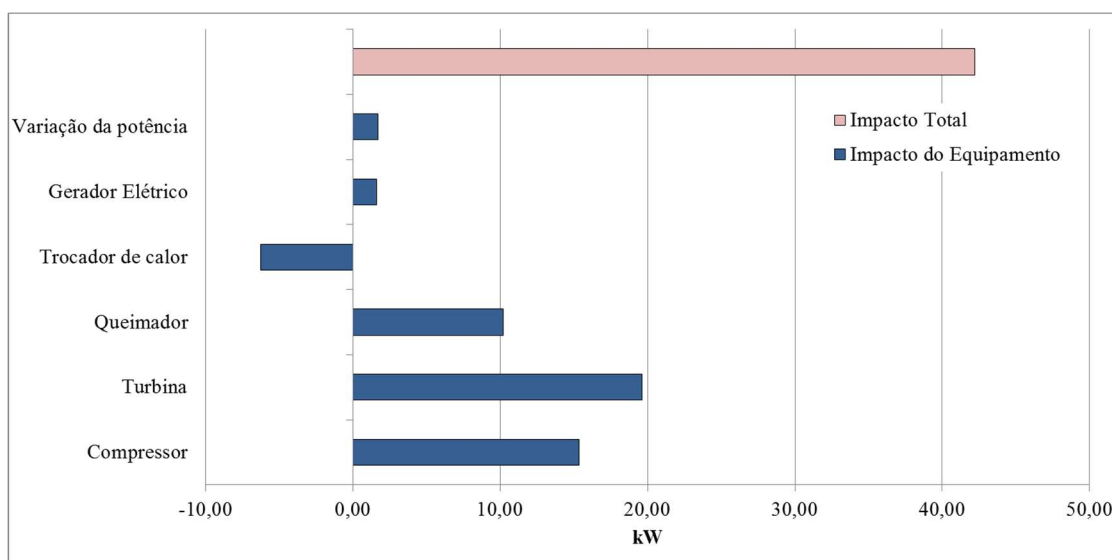


Figura 4.13. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 5

Na Figura 4.13 pode-se observar que o trocador de calor é o único componente do ciclo com um impacto favorável a uma diminuição do consumo de combustível (-6,24 kW).

A ação conjunta de anomalias intrínsecas no compressor e na turbina causam um impacto no combustível de 40,54 kW, de forma que a variação da potência gerada (99,78 kW na condição de referência e 100,17 kW na condição real) tem um impacto de 1,63 kW para um impacto total de 42,23 kW, que é igual ao impacto no consumo de combustível obtido de forma direta, sendo calculado como a diferença do fluxo 7 da condição real e da condição de referência (Tabela 4.4 e Tabela 4.18).

### 4.3.6. Caso 6. Compressor e queimador com $MF_{int}$

A Tabela 4.21 mostra os valores dos principais parâmetros utilizados para o diagnóstico do ciclo EFGT na condição real. Como nos casos anteriores esta condição de operação foi obtida ao multiplicar por 0,95 o fator de desempenho dos equipamentos Compressor e Queimador, no modelo desenvolvido em GateCycle do ciclo EFGT em estudo, para representar uma anomalia de 5% nestes dois equipamentos.

Na Tabela 4.21 aparecem os dados da condição esperada, obtidos ao simular as RNA, usando dados provenientes da condição real.

Tabela 4.21. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 6.

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,812	101,32	15,0	0,00	0,812	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,812	468,90	229,4	148,36	0,812	468,90	218,7	144,57
3-Ar que sai do trocador	0,812	468,90	880,2	521,31	0,812	468,90	880,2	521,31
4- Ar que sai da Turbina	0,812	101,32	575,7	216,06	0,812	101,32	575,7	216,09
5- Gases que saem do queimador	0,893	101,32	928,8	505,89	0,893	101,32	948,9	522,46
6- Gases que saem do trocador	0,893	101,32	351,1	105,82	0,893	101,32	351,1	105,82
7- Combustível	0,080	101,40	60,0	439,76	0,080	101,40	60,0	439,76
8-Potência do compressor	-	-	-	177,65	-	-	-	168,66
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,02	-	-	-	100,02
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	284,07	-	-	-	284,02

Com a informação da Tabela 4.4 e Tabela 4.21 e a estrutura produtiva da Figura 4.3 aplica-se a metodologia de diagnóstico com operadores exergéticos obtendo os resultados mostrados na Tabela 4.22, Tabela 4.23 e na Figura 4.14.

Os operadores exergéticos 1D2 e 1D8 associados ao compressor apresentam uma anomalia conjunta de 5,11 kW (1D2=-3,55 kW e 1D8=8,66 kW), o que representa uma anomalia intrínseca no compressor. Por sua vez, o operador exergético 3D5 em tem uma anomalia de 15,40 kW, indicando uma degradação no Queimador. Os demais operadores exergéticos (2D4, 2D11 e 4D3) mostram anomalias de -0,05 até 0,00 kW, assim são identificados o compressor e queimador como os equipamentos com anomalias intrínsecas.

Tabela 4.22. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 6.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,20	-0,68
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,55	-14,47
1D8	Operador Exergético Compressor	8,66	27,12
2	Turbina	-0,51	-1,46
2D4	Operador Exergético Turbina	0,03	0,08
2D11	Operador Exergético Turbina	-0,05	-0,15
3	Queimador	-4,13	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,41	22,07
4	Trocador de calor	6,88	10,41
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,49	1,55
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	1,02
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	-18,58
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Tabela 4.23. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 6.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,11	-0,20	11,97	16,88
2	Turbina	-0,02	-0,51	-1,53	-2,06
3	Queimador	15,41	-4,13	3,49	14,76
4	Trocador de calor	0,00	6,88	11,42	18,30
5	Gerador Elétrico	0,00	0,49	1,55	2,04
Impacto dos equipamentos					49,92
Impacto pela variação da potência					1,07
Impacto total					50,99
Impacto direto					50,99

Para o trocador de calor as anomalias apresentadas são do tipo induzido, já que seu operador exergético associado (4D3) apresenta uma anomalia nula. Isto como consequência do trocador de calor ter sido levado a uma operação diferente do ponto de projeto, onde sua eficiência é menor que na condição de referência. No entanto, o impacto deste equipamento no consumo adicional de combustível (18,30 kW) é maior que o do compressor (16,88 kW) e que o do queimador (14,76 kW), como mostrado na Tabela 4.23, pois o trocador tem uma anomalia induzida de 6,88 kW e uma disfunção de 11,42 kW.

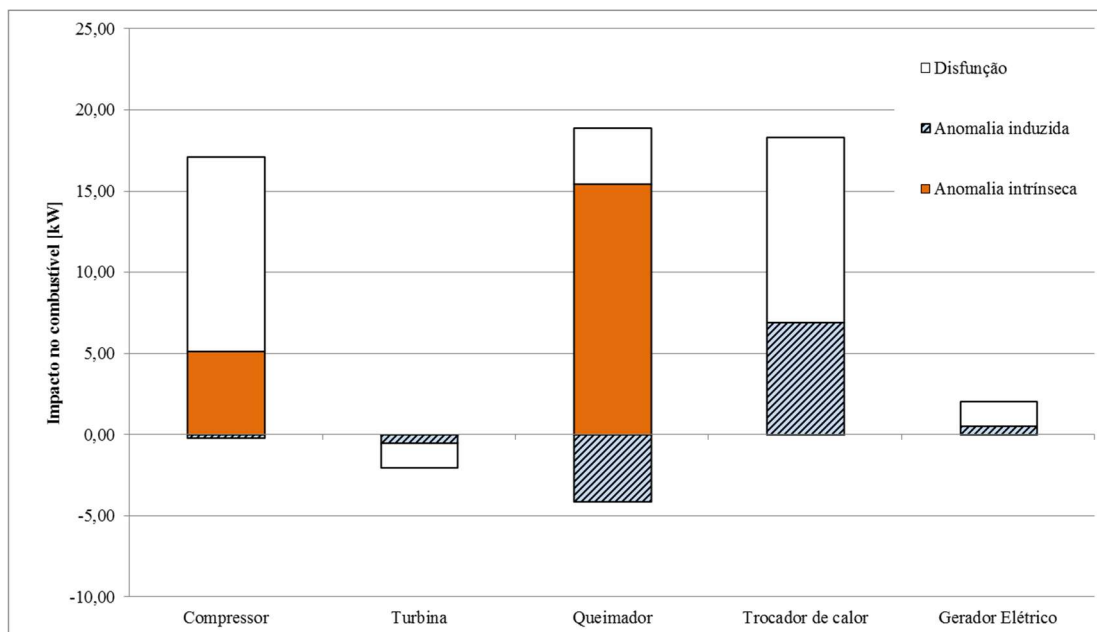


Figura 4. 14. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 6

O queimador apresenta uma anomalia induzida negativa (-4,13 kW), o que significa que se este componente não tiver degradações internas, e trabalhar com as mesmas entradas da condição real, terá uma eficiência maior que na condição de referência. O mesmo ocorre com a turbina (anomalia induzida de -0,51 kW), como mostrado na Tabela 4.23 e Figura 4.15. A turbina, neste caso, é o único componente que tem um produto menor que na condição de referência (disfunção de -1,53 kW), logo requer menos insumo que na condição de referência, assim seu impacto no combustível é de -2,06 kW (Figura 4.15).

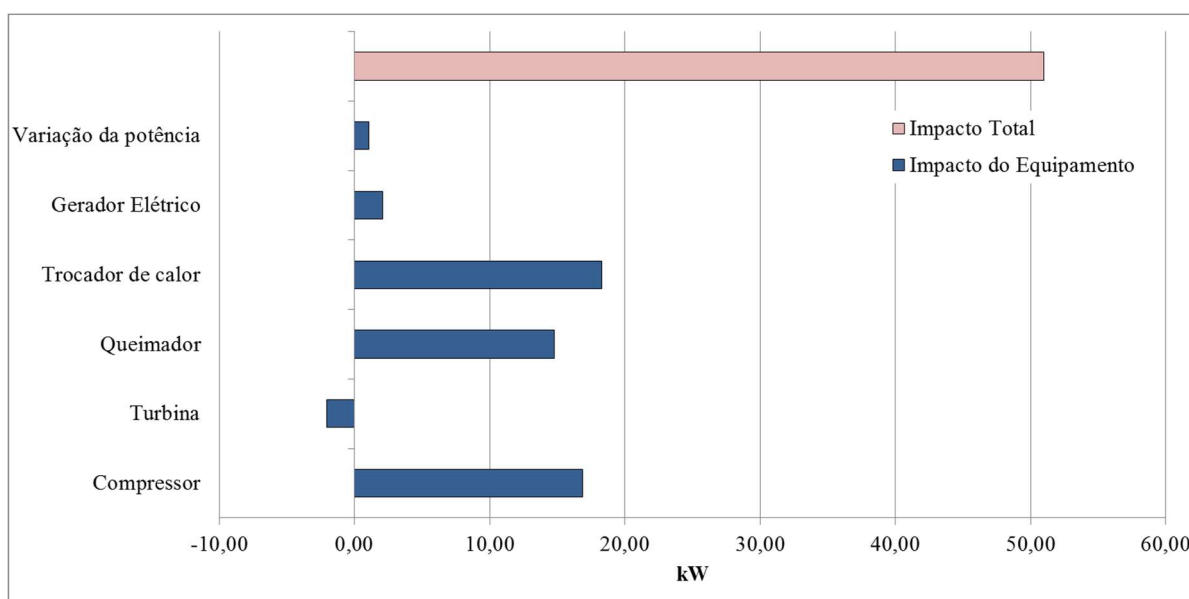


Figura 4.15. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 6.

Os equipamentos do ciclo EFGT têm um impacto conjunto de 49,92 kW, que somados aos 1,07 kW por variação na potência gerada, resultam num consumo adicional de combustível de 50,99 kW.

#### 4.3.7. Caso 7. Compressor e trocador de calor com $MF_{int}$

Prosseguindo com os casos com duas anomalias intrínsecas simultâneas, foram consideradas anomalias no compressor e no trocador de calor. Os dados das simulações são mostrados na Tabela 4.24. Com estes dados junto com os da condição de referência foi aplicado o diagnóstico com OE. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.25 e 4.6, assim como na Figura 4.16.

Tabela 4.24. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e esperada para o caso 7

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,807	101,32	15,0	0,00	0,807	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,807	466,29	228,4	146,58	0,807	466,29	217,7	142,84
3-Ar que sai do trocador	0,807	466,29	883,3	519,36	0,807	466,29	886,4	521,59
4- Ar que sai da Turbina	0,807	101,32	579,0	216,53	0,807	101,32	579,0	216,53
5- Gases que saem do queimador	0,882	101,32	936,4	505,92	0,882	101,32	936,4	505,93
6- Gases que saem do trocador	0,882	101,32	352,6	105,36	0,882	101,32	352,6	103,89
7- Combustível	0,076	101,40	60,0	415,68	0,076	101,40	60,0	415,68
8-Potência do compressor	-	-	-	175,58	-	-	-	166,67
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,12	-	-	-	100,12
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	281,86	-	-	-	281,86

A anomalia conjunta de 5,1250 kW nos Operadores Exergéticos, associados ao compressor (1D2=-3,54 kW e 1D8=8,67 kW), e a anomalia de 2,11 kW em 4D3, associado ao trocador de calor, indicam que são estes os equipamentos com degradação interna. Os demais OE apresentam anomalias inferiores a 0,01 kW, pelo que se descarta uma anomalia intrínseca nos equipamentos associados a estes OE.

Também são o compressor e o trocador de calor os equipamentos com maiores disfunções (11,22 kW e 9,85 kW, respectivamente) já que, além de requerer maior insumo devido a suas

degradações internas, requerem maior insumo, pois na condição real seu produto foi incrementado com relação à condição de referência.

Tabela 4.25. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 7

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,17	-0,53
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,54	-13,49
1D8	Operador Exergético Compressor	8,67	25,24
2	Turbina	-0,59	-1,55
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	0,01	0,02
3	Queimador	-3,82	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,01	0,01
4	Trocador de calor	4,30	5,93
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,11	5,53
5	Gerador Elétrico	0,25	0,74
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-1,60
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	-2,01
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Tabela 4.26. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 7.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,13	-0,17	11,22	16,17
2	Turbina	0,01	-0,59	-1,53	-2,11
3	Queimador	0,01	-3,82	-2,00	-5,81
4	Trocador de calor	2,11	4,30	9,85	16,25
5	Gerador Elétrico	0,00	0,25	0,74	0,99
Impacto dos equipamentos					25,50
Impacto pela variação da potência					1,42
Impacto total					26,91
Impacto direto					26,91

O Trocador de calor apresenta uma anomalia induzida (4,29 kW) que aumenta, ainda mais, a ineficiência causada pela degradação (Figura 4.16), logo seu impacto no combustível se

incrementa.

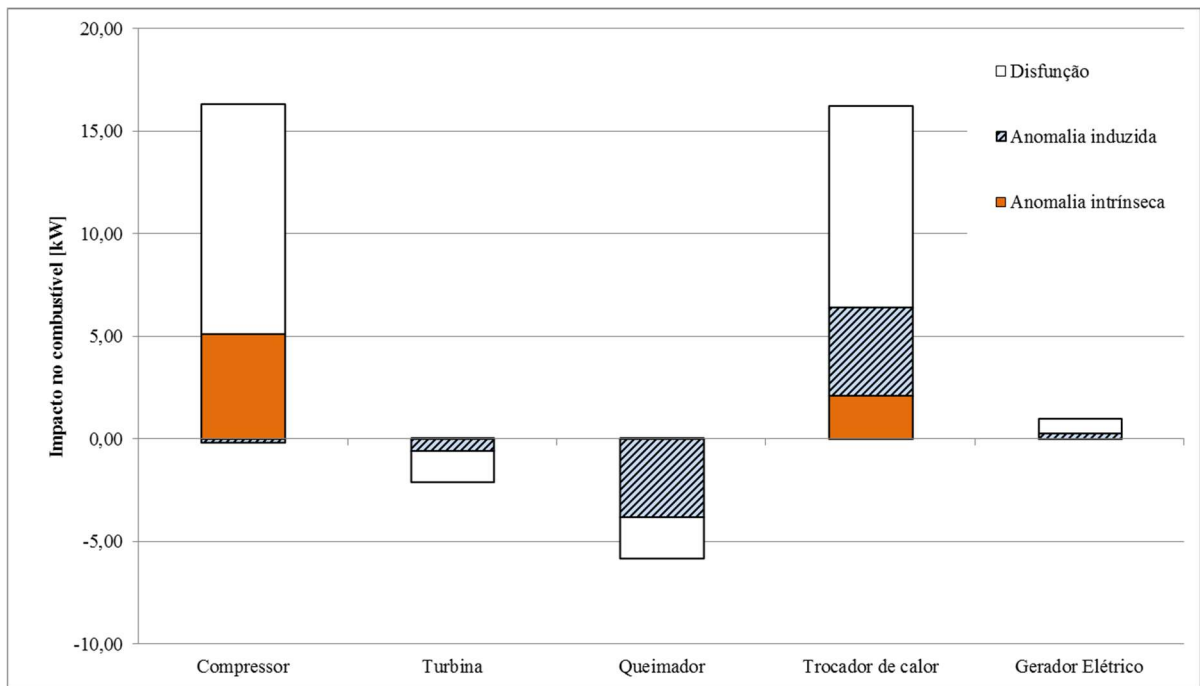


Figura 4.16. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 7

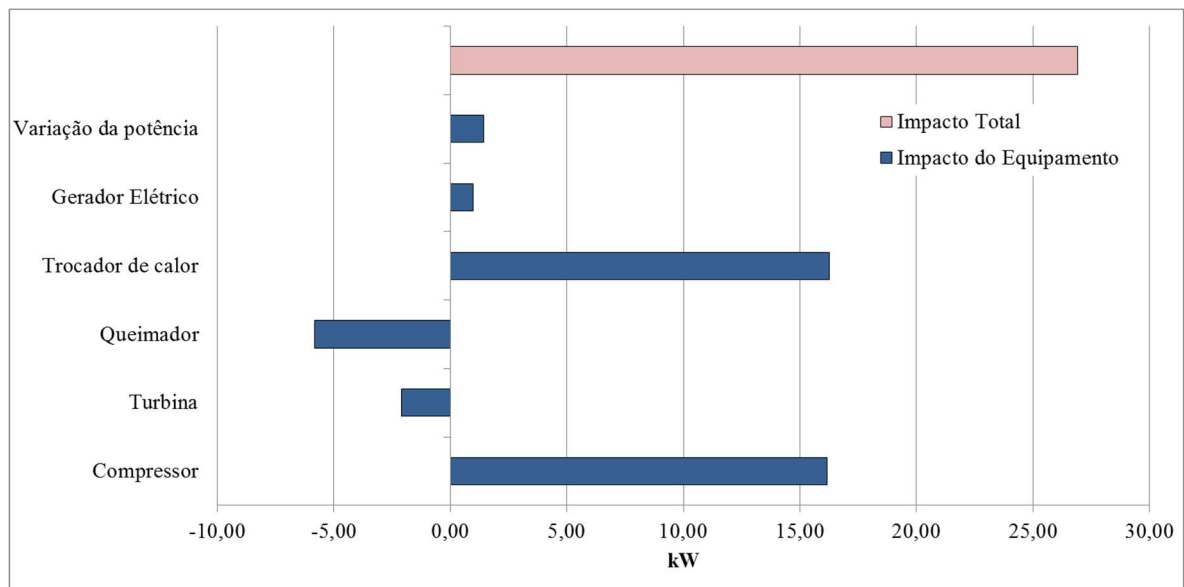


Figura 4.17. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 7.

De acordo com o mostrado na Figura 4.17, o compressor (16,17 kW) e o trocador de calor (16,25 kW) são os equipamentos que mais impactam sobre o consumo de combustível. No entanto, nem sempre os equipamentos degradados são os de maior impacto, Isto devido à presença de disfunções e anomalias induzidas.

A turbina (-2,11 kW) e o queimador (-5,81 kW) têm um impacto com tendência a diminuir o consumo de combustível, mas não compensam o impacto dos outros componentes, assim, o impacto total é de 26,91 kW, como mostrado na Figura 4.17.

#### 4.3.8. Caso 8. Turbina e queimador com $MF_{int}$

Neste caso as anomalias simuladas estão na turbina e queimador obtendo-se os resultados sumarizados na Tabela 4.27, para a condição real e esperada.

Tabela 4.27. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 8

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,812	101,32	15,0	0,00	0,812	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,812	473,74	220,3	145,72	0,812	473,74	220,3	145,72
3-Ar que sai do trocador	0,812	473,74	903,5	538,27	0,812	473,74	903,5	538,27
4- Ar que sai da Turbina	0,812	101,32	608,2	235,61	0,812	101,32	592,1	225,80
5- Gases que saem do queimador	0,891	101,32	954,4	526,21	0,891	101,32	974,7	543,09
6- Gases que saem do trocador	0,891	101,32	348,2	104,19	0,891	101,32	348,2	104,19
7- Combustível	0,080	101,40	60,0	436,86	0,080	101,40	60,0	436,86
8-Potência do compressor	-	-	-	169,91	-	-	-	169,90
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,15	-	-	-	100,15
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	276,43	-	-	-	291,07

Os resultados do diagnóstico por OE se mostram na Tabela 4.28 (mostrando os OE e equipamentos fictícios) e na Tabela 4.28 (consolidado por equipamento), assim como na Figura 4.18.

Observa-se que 2D11 com anomalia de 14,1917 kW, 2D4 com -8,4107 kW e 3D5 com anomalia de 15,0823 kW indicam degradação interna na turbina e queimador, respectivamente. Assim, novamente a metodologia se mostra efetiva para identificar equipamentos degradados.

Tabela 4.28. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 8

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,29	-0,90
1D2	Operador Exergético Compressor	0,00	-0,01
1D8	Operador Exergético Compressor	0,01	0,02
2	Turbina	-0,83	-2,17
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,41	-22,11
2D11	Operador Exergético Turbina	14,19	41,08
3	Queimador	-8,00	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,08	19,80
4	Trocador de calor	1,28	1,78
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,46	1,43
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-9,72
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	3,77
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Tabela 4.29. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 8.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	0,00	-0,29	-0,89	-1,17
2	Turbina	5,78	-0,83	16,81	21,76
3	Queimador	15,08	-8,00	23,57	30,65
4	Trocador de calor	0,00	1,28	-7,94	-6,66
5	Gerador Elétrico	0,00	0,46	1,43	1,89
Impacto dos equipamentos					46,47
Impacto pela variação da potência					1,63
Impacto total					48,09
Impacto direto					48,09

Como se observa na Figura 4.18 os demais equipamentos têm anomalias intrínsecas desprezíveis, mas sim anomalias induzidas e disfunções.

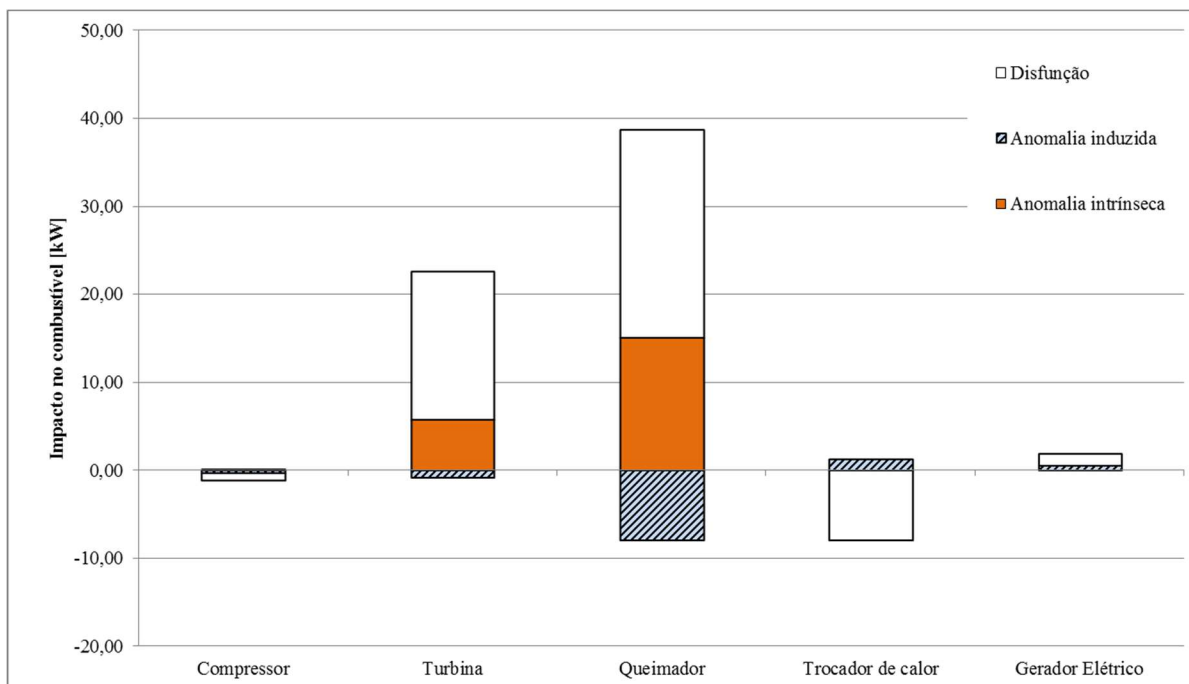


Figura 4.18. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 8

Porém, para o compressor, a turbina e o queimador aparecem anomalias induzidas negativas (-0,29 kW, -0,83 kW e -8,00 kW, respectivamente), isto significa que estes equipamentos estão trabalhando num ponto onde sua curva de desempenho, sem ter em conta as anomalias, apresenta uma eficiência maior que na condição de referência, isto é, apresenta-se uma condição de operação similar à condição mostrada na Figura 3.2. Isto permite afirmar que a condição de referência escolhida não representa a condição de máxima eficiência para a turbina e o queimador. Anomalias induzidas negativas na Turbina (-0,83 kW) e no queimador (-8,00 kW) compensam um pouco as ineficiências decorrentes das degradações internas destes equipamentos mas, ao final, estes equipamentos aumentam seus produtos (disfunções de 16,81 kW e 23,57 kW, respectivamente), requerendo mais insumo e conseqüentemente têm um impacto maior no consumo de combustível.

Finalmente, como se mostra na Figura 4.19, os valores negativos do impacto para o trocador de calor (-6,66 kW) e para o compressor (-1,17 kW) não equiparam o impacto dos demais componentes, que junto com o impacto pela variação na potência gerada (1,63 kW), somam um impacto total de 48,09 kW.

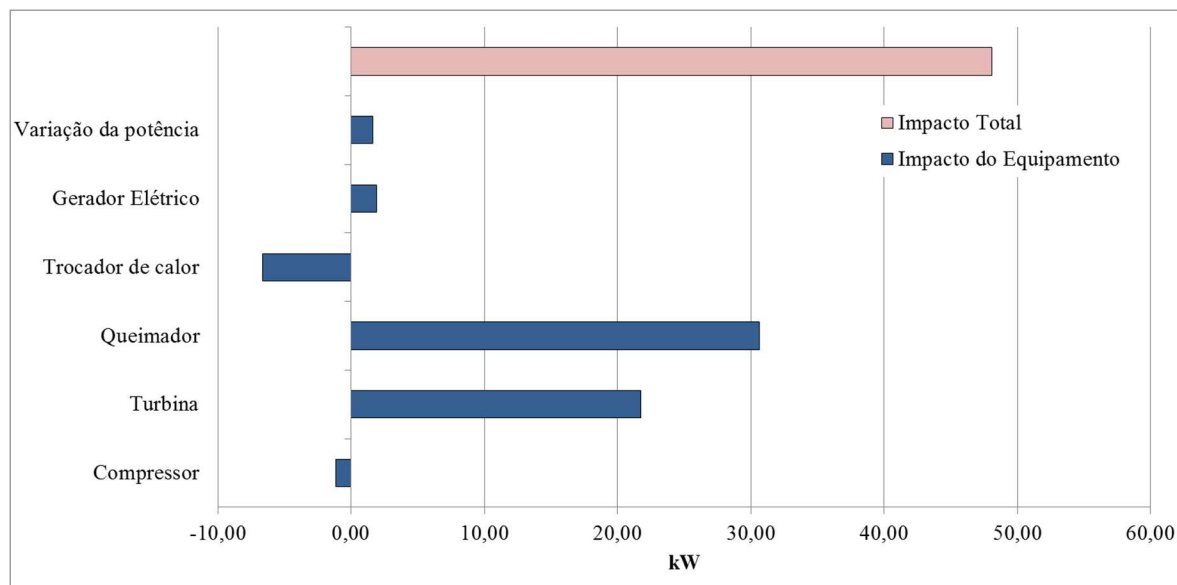


Figura 4.19. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 8

#### 4.3.9. Caso 9. Turbina e trocador de calor com $MF_{int}$

Para a turbina e trocador de calor foram simuladas anomalias intrínsecas simultâneas, representadas por 95% do fator de desempenho de projeto. Os valores obtidos, para a condição real e esperada, são apresentados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 9

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,806	101,32	15,0	0,00	0,806	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,806	470,62	219,4	143,88	0,806	470,62	219,2	143,83
3-Ar que sai do trocador	0,806	470,62	905,3	535,20	0,806	470,62	908,3	537,37
4- Ar que sai da Turbina	0,806	101,32	610,7	235,40	0,806	101,32	594,6	225,66
5- Gases que saem do queimador	0,881	101,32	960,9	525,04	0,881	101,32	960,9	525,07
6- Gases que saem do trocador	0,881	101,32	349,4	103,55	0,881	101,32	349,4	101,94
7- Combustível	0,075	101,40	60,0	412,27	0,075	101,40	60,0	412,27
8-Potência do compressor	-	-	-	167,85	-	-	-	167,75
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	99,93	-	-	-	99,93
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	273,90	-	-	-	288,42

A metodologia de diagnóstico termoeconômico usando operadores exergeticos foi aplicada para a condição simulada, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 4.31 e Tabela 4.32.

Tabela 4.31. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 9.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,25	-0,71
1D2	Operador Exergetico Compressor	-0,04	-0,14
1D8	Operador Exergetico Compressor	0,10	0,28
2	Turbina	-0,90	-2,19
2D4	Operador Exergetico Turbina	-8,36	-20,39
2D11	Operador Exergetico Turbina	14,20	38,23
3	Queimador	-7,35	0,00
3D5	Operador Exergetico Queimador	0,03	0,03
4	Trocador de calor	-0,90	-1,14
4D3	Operador Exergetico Trocador de calor	1,99	4,82
5	Gerador Elétrico	0,23	0,65
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-11,52
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	16,20
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Observa-se que 2D4 apresenta uma anomalia de -8,36 kW e 2D11 apresenta uma anomalia de 14,2016 kW, o que representa uma anomalia do tipo intrínseca na Turbina. Além disso, 4D3 mostra uma anomalia de 1,9877 kW, o que significa que o trocador de calor também tem uma anomalia do tipo intrínseco. Os demais OE têm anomalias entre -0,04 e 0,10 kW. Assim, se identificam os equipamentos com degradações internas (Turbina e trocador de calor).

Tabela 4.32. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 9.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	0,06	-0,25	-0,57	-0,76
2	Turbina	5,84	-0,90	15,64	20,58
3	Queimador	0,03	-7,35	16,23	8,91
4	Trocador de calor	1,99	-0,90	-7,84	-6,76
5	Gerador Elétrico	0,00	0,23	0,65	0,88
Impacto dos equipamentos					22,86
Impacto pela variação da potência					0,64
Impacto total					23,50
Impacto direto					23,50

O compressor apresenta anomalias induzidas (-0,26 kW) e disfunções (-0,57 kW), logo seu

impacto no combustível tem um valor negativo (-0,76 kW).

A turbina tem uma anomalia induzida negativa (-0,90 kW), que compensa um pouco sua anomalia interna, mas tem uma disfunção de 15,64 kW, que faz com que seu impacto no combustível seja de 20,58 kW, tornando-se assim o equipamento com maior influência no consumo adicional de recursos como pode-se observar nas Figura 4.20 e Figura 4.21.

Para o queimador, apesar de trabalhar num ponto de melhor eficiência (anomalia induzida negativa de -7,35 kW), um incremento no seu produto, representado por uma disfunção de 16,23 kW, faz com que seu impacto no combustível seja considerável (8,91 kW).

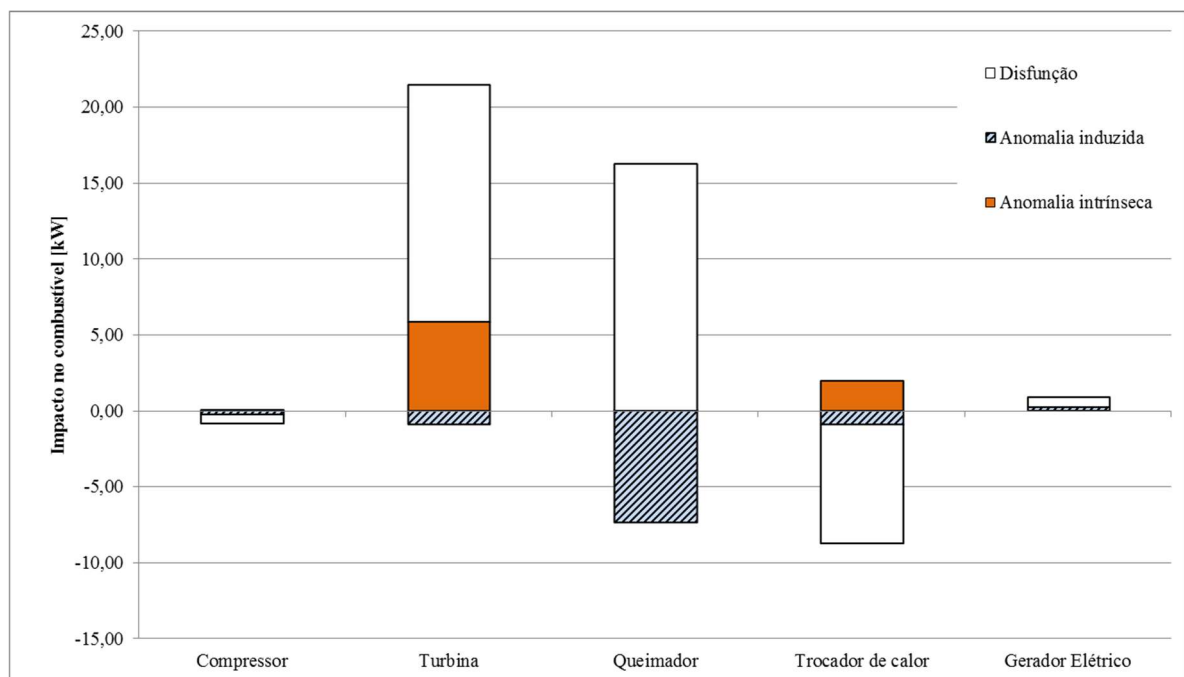


Figura 4.20. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 9

Um caso diferente ocorre com o trocador de calor. Este equipamento apresenta uma anomalia intrínseca de 1,99 kW, mas na condição de operação real tem uma anomalia induzida negativa (-0,9025 kW) e uma disfunção também negativa (-7,84kW), logo seu impacto no combustível tem um valor negativo (-6,76 kW), isto é, o trocador de calor tem uma anomalia intrínseca, mas causa um efeito que tende a diminuir o consumo de combustível, em decorrência da anomalia induzida e disfunção.

Uma anomalia intrínseca na turbina e no trocador de calor faz com que o produto destes dois equipamentos mude. Assim, para manter a produção do ciclo EFGT (potência Gerada) dentro os valores requeridos, o sistema de controle modifica alguns parâmetros, assim anomalias induzidas e disfunções aparecem nos equipamentos, o que faz que equipamentos sem

degradações internas tenham impactos altos, como por exemplo, o queimador (8,91 kW), e que inclusive equipamentos com degradações internas tenham impactos com valores negativos como, por exemplo, o trocador de calor. Neste caso particular, mostra-se que uma metodologia que simplesmente compara duas condições de operação (real e referência), como é o caso das metodologias convencionais de diagnóstico termoeconômico, não tem a suficiente informação para identificar o equipamento degradado, levando a resultados errados. Ao incluir os OE, este inconveniente fica resolvido, independentemente do modelo termoeconômico escolhido, como será mostrado no capítulo 5.

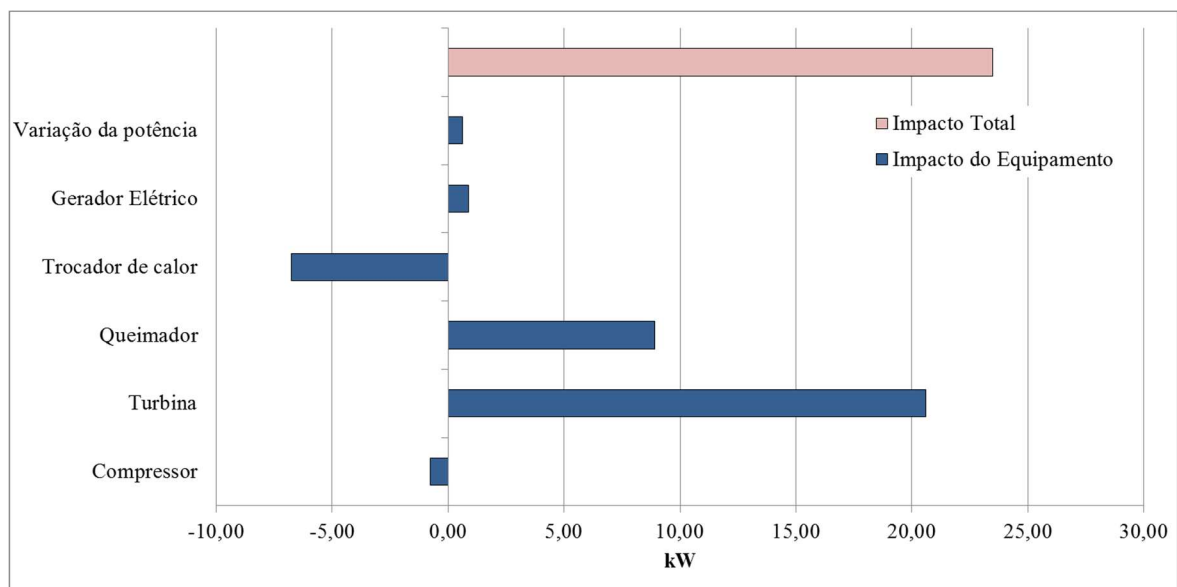


Figura 4.21. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 9.

Ao final, o impacto dos equipamentos, somado ao impacto pela variação da potência gerada, (0,64 kW) indicam um impacto total de 23,50 kW, sendo igual ao obtido diretamente.

#### 4.3.10. Caso 10. Queimador e trocador de calor com $MF_{int}$

O último caso com anomalias intrínsecas acontecendo simultaneamente em dois equipamentos corresponde à presença de degradações no queimador e trocador de calor, onde novamente as anomalias foram simulados no ciclo EFGT multiplicando por 0,95 o fator de desempenho destes dois equipamentos no modelo em GateCycle. Os resultados são apresentados na Tabela 4.33, para a condição real e comportamento esperado.

Os resultados do DTE com OE são mostrados na Tabela 4.34 e Tabela 4.35, assim como na Figura 4.22. O impacto no combustível para cada equipamento é apresentado na Figura 4.23.

Tabela 4.33. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 10

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,808	101,32	15,0	0,00	0,808	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,808	459,95	215,7	141,45	0,808	459,95	215,6	141,41
3-Ar que sai do trocador	0,808	459,95	848,4	494,60	0,808	459,95	851,2	496,58
4- Ar que sai da Turbina	0,808	101,32	554,4	202,33	0,808	101,32	554,4	202,32
5- Gases que saem do queimador	0,885	101,32	899,3	477,34	0,885	101,32	918,9	493,11
6- Gases que saem do trocador	0,885	101,32	335,6	97,00	0,885	101,32	335,6	95,60
7- Combustível	0,077	101,40	60,0	421,03	0,077	101,40	60,0	421,03
8-Potência do compressor	-	-	-	165,24	-	-	-	165,14
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	99,98	-	-	-	99,98
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	271,43	-	-	-	271,42

Tabela 4.34. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 10.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,03	-0,10
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,04	-0,14
1D8	Operador Exergético Compressor	0,09	0,28
2	Turbina	0,07	0,18
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00
3	Queimador	-0,73	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,53	21,20
4	Trocador de calor	2,56	3,69
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	1,96	5,24
5	Gerador Elétrico	0,31	0,92
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	1,06
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	-20,62
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Na Tabela 4.34 pode se observar que o operador exergético 3D5, que pertence ao queimador, tem uma anomalia intrínseca de 15,53 kW, manifestando deste modo a presença de uma degradação interna no Queimador. Também se identifica uma anomalia intrínseca no Trocador

de calor, já que o operador exergético associado a este equipamento (4D3) tem uma anomalia de 1,96 kW. Os operadores exergéticos dos outros componentes exibem anomalias intrínsecas menores do que 0,07 kW, logo pode-se dizer que se existir uma degradação esta é muito pequena.

Observa-se também que as degradações no queimador e trocador de calor induzem no compressor e na turbina anomalias muito pequenas (-0,03 kW e 0,07 kW, respectivamente), assim como também disfunções pequenas (0,03 kW e 0,17 kW, respectivamente) (Tabela 4.35).

Tabela 4.35. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 10.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	0,06	-0,03	0,03	0,06
2	Turbina	0,00	0,07	0,17	0,23
3	Queimador	15,53	-0,73	0,58	15,38
4	Trocador de calor	1,96	2,56	10,00	14,52
5	Gerador Elétrico	0,00	0,31	0,92	1,23
Impacto dos equipamentos					31,42
Impacto pela variação da potência					0,84
Impacto total					32,26
Impacto direto					32,26

Como mostrado na Figura 4.22, o efeito da degradação no queimador é praticamente seu impacto no combustível (15,38 kW), já que as disfunções (0,58 kW) e anomalias induzidas (-0,73 kW) têm valores pequenos se comparados com a anomalia intrínseca deste equipamento (15,53 kW).

Com um impacto no combustível de 14,52 kW, o trocador de calor, juntamente com o queimador, são os dois equipamentos que mais contribuem com o consumo adicional de combustível do ciclo e, neste caso, por coincidência, são os dois equipamentos degradados. Seu impacto em conjunto representa 92,66% do impacto no consumo de combustível dos equipamentos, como mostrado na Tabela 4.35 e Figura 4.23.

O impacto pela variação da potência gerada entre a condição de referência (99,78 kW) e a condição real (99,98 kW) contribui com 0,84 kW, para que o impacto total seja de 32,26 kW, que de novo é igual ao calculado diretamente, como mostrado na Tabela 4.35.

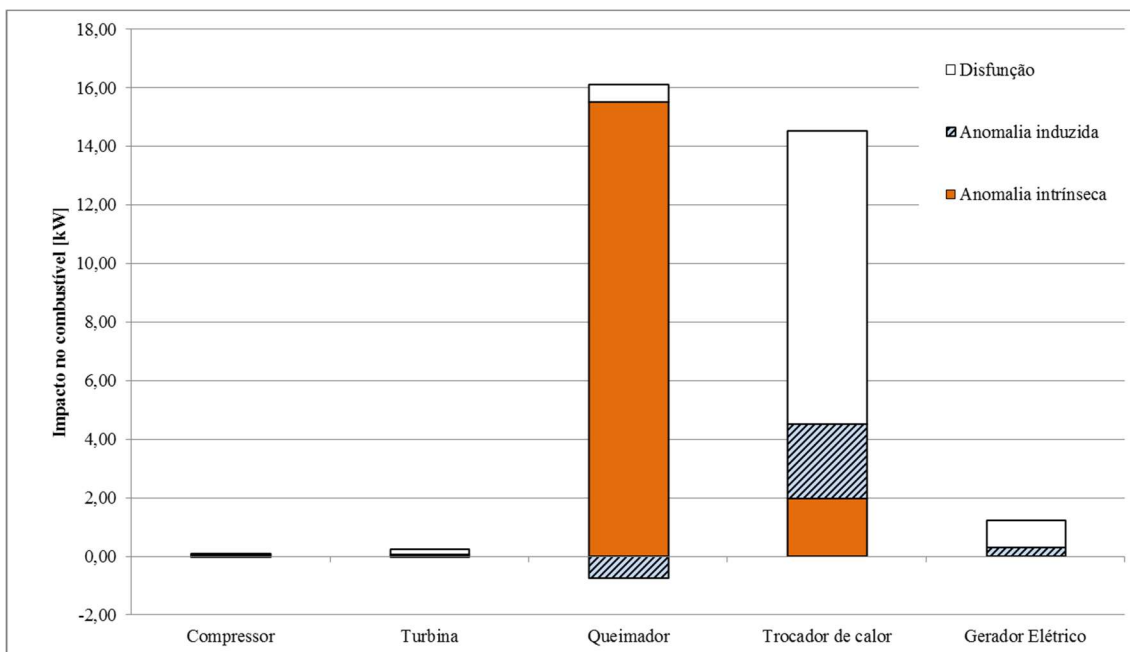


Figura 4.22. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 10

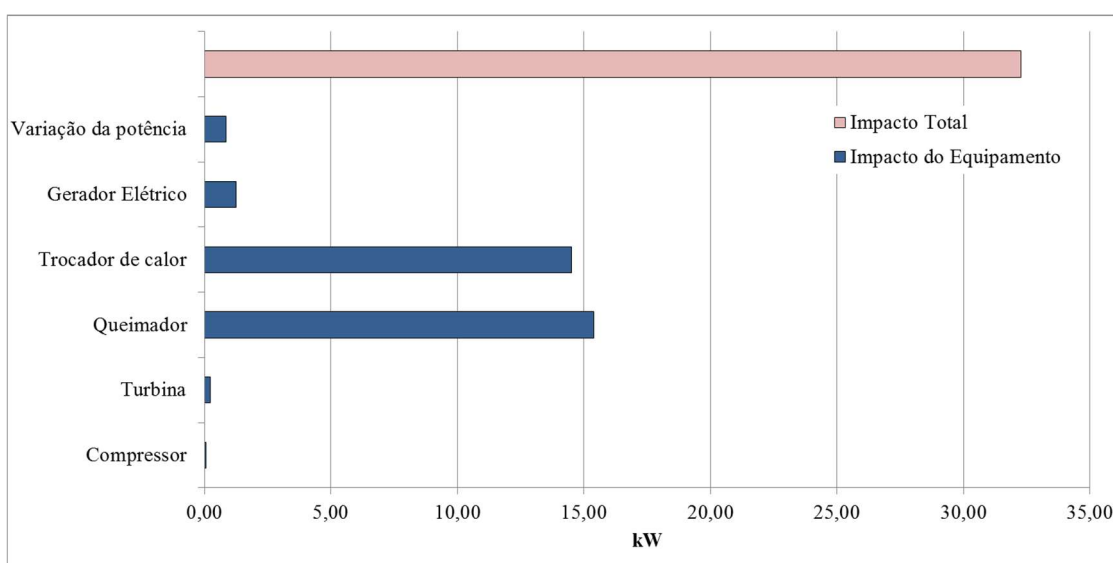


Figura 4.23. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 10

A seguir são apresentados os resultados do diagnóstico termoeconômico com OE quando existem degradações acontecendo de maneira simultânea em três equipamentos do ciclo EFGT.

#### 4.3.11. Caso 11. Compressor, turbina e queimador com $MF_{int}$

Neste caso a condição real foi obtida ao multiplicar por 0,95 o fator de desempenho do compressor, turbina e queimador, no modelo em GateCycle, para simular o efeito das

degradações nestes componentes.

Na Tabela 4.36 são apresentados os parâmetros termodinâmicos principais para cada fluxo do ciclo EFGT considerado.

Tabela 4.36. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 11

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,818	101,32	15,0	0,00	0,818	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,818	484,19	234,8	153,52	0,818	484,19	223,9	149,57
3-Ar que sai do trocador	0,818	484,19	938,0	569,17	0,818	484,19	938,0	569,17
4- Ar que sai da Turbina	0,818	101,32	631,5	251,98	0,818	101,32	614,7	241,47
5- Gases que saem do queimador	0,902	101,32	989,2	562,50	0,902	101,32	1010,4	580,50
6- Gases que saem do trocador	0,902	101,32	369,1	116,58	0,902	101,32	369,1	116,58
7- Combustível	0,085	101,40	60,0	462,72	0,085	101,40	60,0	462,72
8-Potência do compressor	-	-	-	183,43	-	-	-	174,20
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,32	-	-	-	100,32
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	290,38	-	-	-	305,82

Na Tabela 4.37 pode-se observar a presença de anomalias nos operadores exergéticos do compressor (1D2=-3,57 kW e 1D8=8,60 kW), com um valor somado de 5,03 kW, nos OE 2D4 e 2D11 da turbina, com valores de -8,43 kW e 14,24 kW, e no Queimador (3D5), com um valor de 15,04 kW, o que indica que são estes equipamentos os que apresentam degradações internas. OE do trocador de calor (4D3) apresenta um valor de anomalia nulo (0,00 kW), se comparado com os outros valores.

Novamente a metodologia mostra sua capacidade de identificar onde acontecem as degradações na presença de várias anomalias.

Tabela 4.37. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 11

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,47	-1,67
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,57	-15,37
1D8	Operador Exergético Compressor	8,60	28,62
2	Turbina	-1,35	-3,83
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,43	-23,88
2D11	Operador Exergético Turbina	14,24	44,27
3	Queimador	-11,30	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,04	20,94
4	Trocador de calor	5,78	8,49
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,71	2,35
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-12,14
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	4,41
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

As anomalias induzidas negativas nos equipamentos: compressor (-0,47 kW), turbina (-1,35 kW) e queimador (-11,30 kW) indicam que estes componentes trabalham numa condição de operação similar à exibida pela condição mostrada na Figura 3.2, como já foi tratado anteriormente. O trocador de calor, ao contrário, trabalha numa condição onde seu desempenho é inferior à condição de referência, mas este é o seu desempenho esperado, pelo que apresenta uma condição de operação similar à condição mostrada na Figura 3.5. Em termos de anomalias induzidas o gerador elétrico exibe um comportamento similar ao trocador de calor (Tabela 4.38).

Tabela 4.38. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 11.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,03	-0,47	11,57	16,14
2	Turbina	5,81	-1,35	16,55	21,02
3	Queimador	15,04	-11,30	25,35	29,09
4	Trocador de calor	0,00	5,78	-3,64	2,14
5	Gerador Elétrico	0,00	0,71	2,35	3,06
Impacto dos equipamentos					71,45
Impacto pela variação da potência					2,50
Impacto total					73,95
Impacto direto					73,95

Como mostrado na Figura 4.24, com a presença de degradações no compressor, turbina e queimador acontece um aumento no produto destes equipamentos, o que se manifesta com a presença de disfunções com valores positivos (11,57 kW, 16,55 kW e 25,35 kW, respectivamente). O gerador elétrico tem um aumento no seu produto, como tem acontecido em todos os casos anteriores, como consequência de que a potência gerada na condição real (para todos os casos) é maior que na condição de referência, isto se deve a que o sistema de controle que foi criado para o EFGT, usando uma macro em GateCycleTM, não consegue gerar o mesmo valor de potência que na condição de referência (erro de convergência). Assim, em todos os casos, o gerador elétrico tem uma disfunção com valor positivo (2,35 kW). O trocador de calor tem uma disfunção negativa, já que tem um produto menor e, conseqüentemente, requer menos recursos.

Como mostrado na Figura 4.25, os equipamentos com degradação intrínseca são também os que têm maior impacto no consumo de combustível e todos os equipamentos contribuem com o consumo adicional de combustível. Os equipamentos têm um impacto conjunto no consumo adicional de combustível de 71,45 kW, enquanto a variação da potência gerada aporta 2,50 kW.

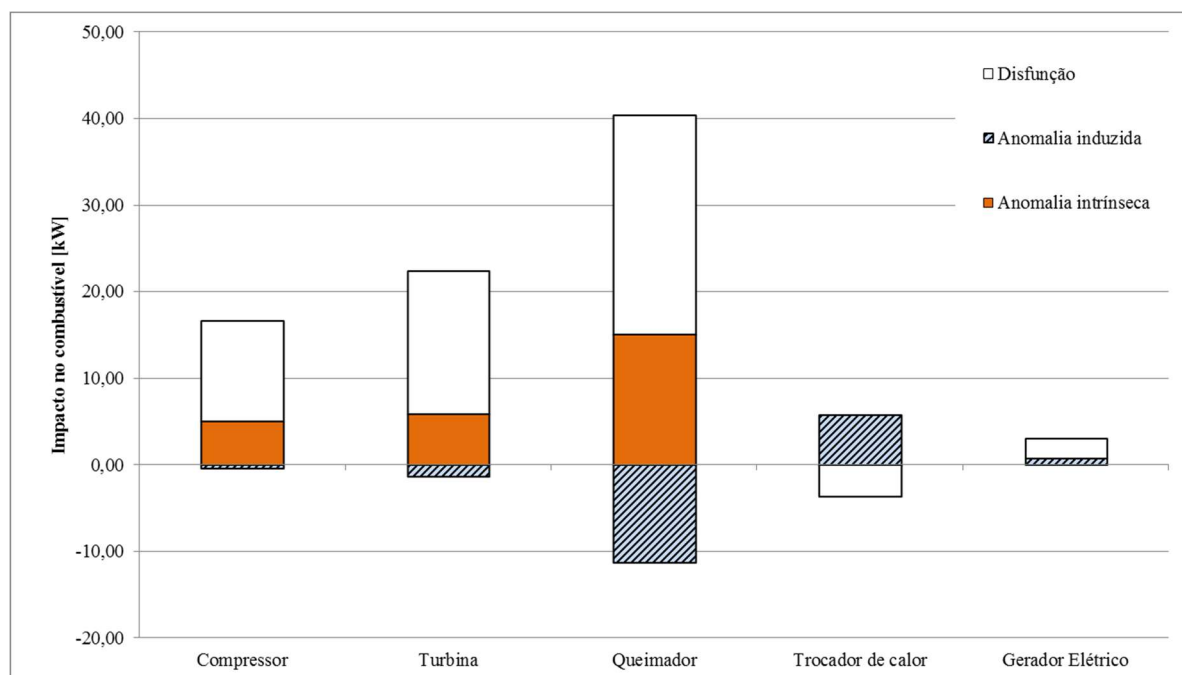


Figura 4.24. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 11

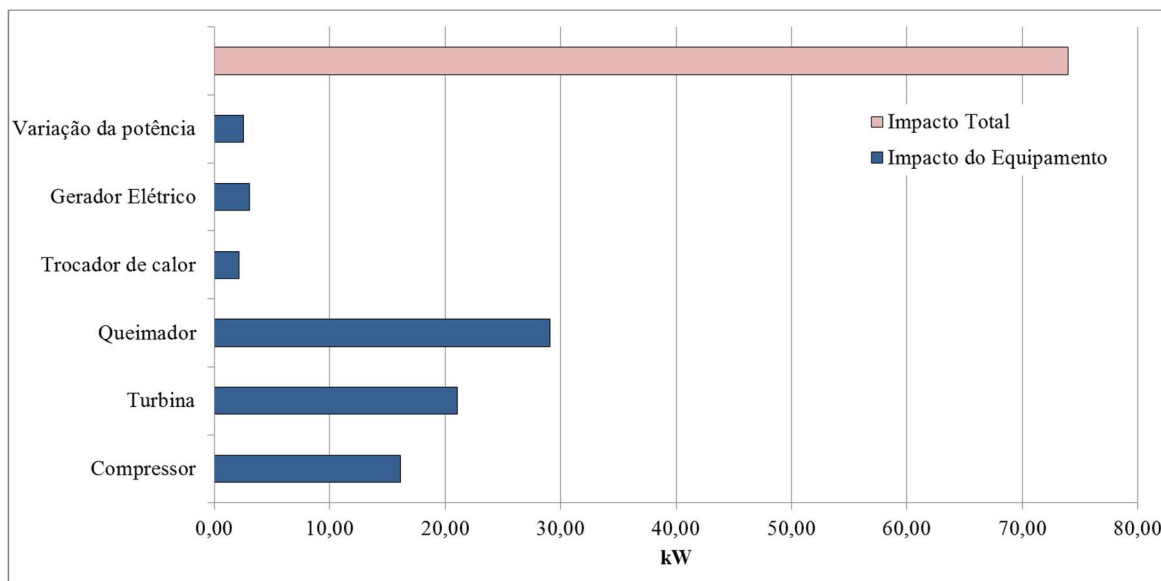


Figura 4.25. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 11

#### 4.3.12. Caso 12. Compressor, turbina e trocador de calor com $MF_{int}$

Na Tabela 4.39 são apresentados os parâmetros termodinâmicos obtidos para a condição real e comportamento esperado quando existem anomalias intrínsecas no compressor, turbina e trocador de calor do ciclo EFGT em estudo.

Tabela 4.39. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e esperada para o caso 12

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,811	101,32	15,0	0,00	0,811	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,811	481,19	233,6	151,50	0,811	481,19	222,8	147,62
3-Ar que sai do trocador	0,811	481,19	939,9	565,78	0,811	481,19	943,2	568,20
4- Ar que sai da Turbina	0,811	101,32	634,2	251,70	0,811	101,32	617,6	241,36
5- Gases que saem do queimador	0,891	101,32	996,2	560,94	0,891	101,32	996,2	560,94
6- Gases que saem do trocador	0,891	101,32	370,2	115,66	0,891	101,32	370,2	113,99
7- Combustível	0,080	101,40	60,0	436,27	0,080	101,40	60,0	436,27
8-Potência do compressor	-	-	-	181,07	-	-	-	171,97
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,13	-	-	-	100,13
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	287,57	-	-	-	302,80

Os resultados do DTE com OE mostra a presença de anomalias em (1D2+1D8), com valor

somado de 5,03 kW, o que indica degradação interna no compressor, em (2D4 +2D11) com anomalia de 5,89 kW, indicando degradação interna na Turbina, e o OE 4D3 com uma anomalia de 2,10 kW, indicando degradação interna no trocador de calor, como mostrado na Tabela 4.40.

O OE do queimador apresentam anomalias de 0,00 kW. Assim foram identificados de forma acertada os equipamentos degradados.

Tabela 4.40. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 12.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1,00	Compressor	-0,43	-1,43
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,55	-14,30
1D8	Operador Exergético Compressor	8,58	26,58
2,00	Turbina	-1,39	-3,66
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,31	-21,85
2D11	Operador Exergético Turbina	14,19	41,03
3,00	Queimador	-10,68	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	0,00
4,00	Trocador de calor	3,26	4,37
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,10	5,50
5,00	Gerador Elétrico	0,46	1,41
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-14,23
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	18,29
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

As anomalias do tipo induzido com valor negativo nos equipamentos que tem degradação interna indicam uma condição de operação real onde a curva de desempenho teria uma melhoria na eficiência se fossem eliminadas as anomalias internas, mas mantendo os mesmos parâmetros de operação da condição real, como é o caso do compressor (-0,43 kW) e da turbina (-1,39 kW). Este comportamento é similar à condição mostrada na Figura 3.2.

As anomalias induzidas positivas nos equipamentos com degradação interna indicam uma condição de operação onde a curva de desempenho do equipamento tem uma eficiência menor que na condição de referência. Este é o caso do trocador de calor (3,26 kW), e seu comportamento é similar à condição mostrada na Figura 3.4. Por sua vez, o queimador não apresenta degradação interna, mas sim anomalias induzidas negativas, logo também sua curva de desempenho na condição real exibe uma eficiência menor que na condição de referência (Tabela 4.41).

Como mostrado na Tabela 4.41, apesar de o queimador não apresentar degradações internas seu impacto no combustível ( 7,61 kW) é inclusive maior que o trocador de calor (1,00 kW), isto se deve ao fato de apresentar uma disfunção considerável (18,29 kW), como mostrado na Figura 4.26.

Tabela 4.41. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 12

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,03	-0,43	10,85	15,45
2	Turbina	5,89	-1,39	15,51	20,01
3	Queimador	0,00	-10,68	18,29	7,61
4	Trocador de calor	2,10	3,26	-4,36	1,00
5	Gerador Elétrico	0,00	0,46	1,41	1,86
Impacto dos equipamentos					45,94
Impacto pela variação da potência					1,56
Impacto total					47,50
Impacto direto					47,50

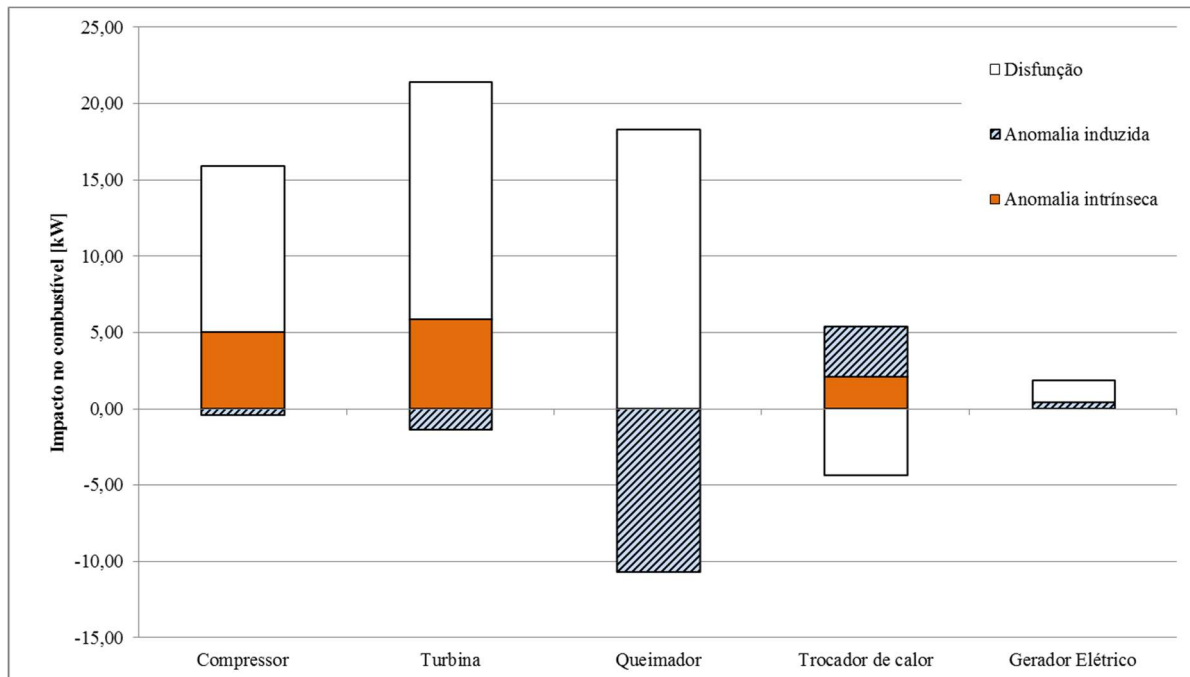


Figura 4.26. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 12

Novamente, neste caso todos os equipamentos contribuem para um aumento no consumo de combustível com um impacto conjunto de 45,94 kW. O impacto pela variação da potência gerada faz com que o impacto total seja de 47,50 kW (Figura 4.27).

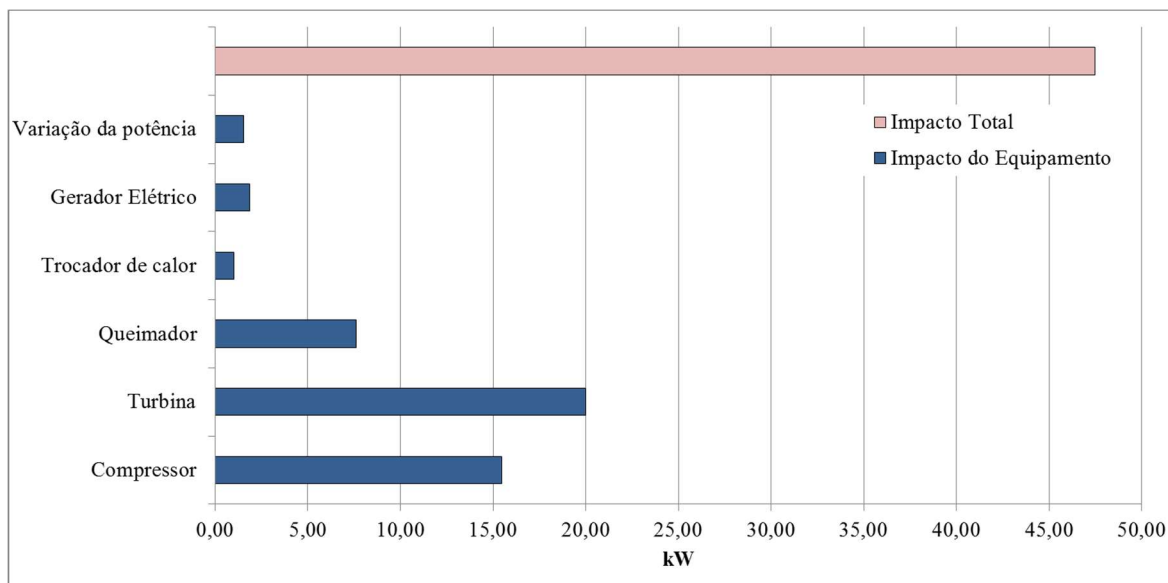


Figura 4.27. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 12

#### 4.3.13. Caso 13. Compressor, queimador e trocador de calor com $MF_{int}$

Quando se considera a presença de anomalias intrínsecas no compressor, queimador e trocador de calor se gera a condição real apresentada na Tabela 4.42. Nesta tabela também é mostrada a condição de comportamento esperado, que é obtida a partir das RNA de cada equipamento.

Tabela 4.42. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 13

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,814	101,32	15,0	0,00	0,814	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,814	469,73	229,5	148,79	0,814	469,73	218,9	145,02
3-Ar que sai do trocador	0,814	469,73	880,8	522,67	0,814	469,73	883,9	524,95
4- Ar que sai da Turbina	0,814	101,32	575,8	216,49	0,814	101,32	575,8	216,50
5- Gases que saem do queimador	0,895	101,32	932,2	510,10	0,895	101,32	952,5	526,90
6- Gases que saem do trocador	0,895	101,32	355,4	108,31	0,895	101,32	355,4	106,82
7- Combustível	0,081	101,40	60,0	445,29	0,081	101,40	60,0	445,29
8-Potência do compressor	-	-	-	178,10	-	-	-	169,16
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,36	-	-	-	100,36
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	284,92	-	-	-	284,91

Na Tabela 4.43 apresentam-se os resultados do diagnóstico termoeconômico com operadores exergéticos para cada um dos equipamentos (reais e fictícios) da estrutura produtiva da Figura 4.3. Observa-se que os OE do compressor (1D2 e 1D8) apresenta uma anomalia conjunta de 5,06 kW, o que indica degradação no compressor. 3D5, por sua vez, tem uma anomalia de 15,48 kW, logo pode-se afirmar que o queimador também apresenta degradação interna. De forma similar 4D3 apresenta uma anomalia (2,14 kW) que representa a anomalia intrínseca do trocador de calor. A turbina, mediante seu OE 2D11, exibe uma anomalia intrínseca de -0,01 kW, o que torna pouco provável a presença de degradações internas neste componente.

Tabela 4.43. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 13.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,22	-0,76
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,52	-14,48
1D8	Operador Exergético Compressor	8,57	27,17
2	Turbina	-0,52	-1,50
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	-0,01	-0,03
3	Queimador	-4,32	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,48	22,28
4	Trocador de calor	6,76	10,27
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,14	6,12
5	Gerador Elétrico	0,53	1,69
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	0,15
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	-21,89
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Na Tabela 4.44 pode-se observar a desagregação do impacto no combustível, nas suas três componentes, para cada equipamento.

Para o compressor e para o trocador de calor é a disfunção a que mais contribui para seu impacto no combustível (11,93 kW e 16,54 kW, respectivamente), inclusive para o trocador de calor a anomalia induzida (6,7626 kW) tem mais relevância que a intrínseca (2,14 kW), enquanto para o queimador é a anomalia intrínseca (15,48 kW) a que contribui em maior medida com seu impacto (11,55 kW).

O efeito da degradação interna para o queimador é compensada um pouco por um valor

negativo de anomalia induzida (-4,32 kW) , como mostrado na Figura 4.28.

Tabela 4.44. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 13.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,06	-0,22	11,93	16,76
2	Turbina	-0,01	-0,52	-1,53	-2,06
3	Queimador	15,48	-4,32	0,38	11,55
4	Trocador de calor	2,14	6,76	16,54	25,44
5	Gerador Elétrico	0,00	0,53	1,69	2,23
Impacto dos equipamentos					53,92
Impacto pela variação da potência					2,60
Impacto total					56,52
Impacto direto					56,52

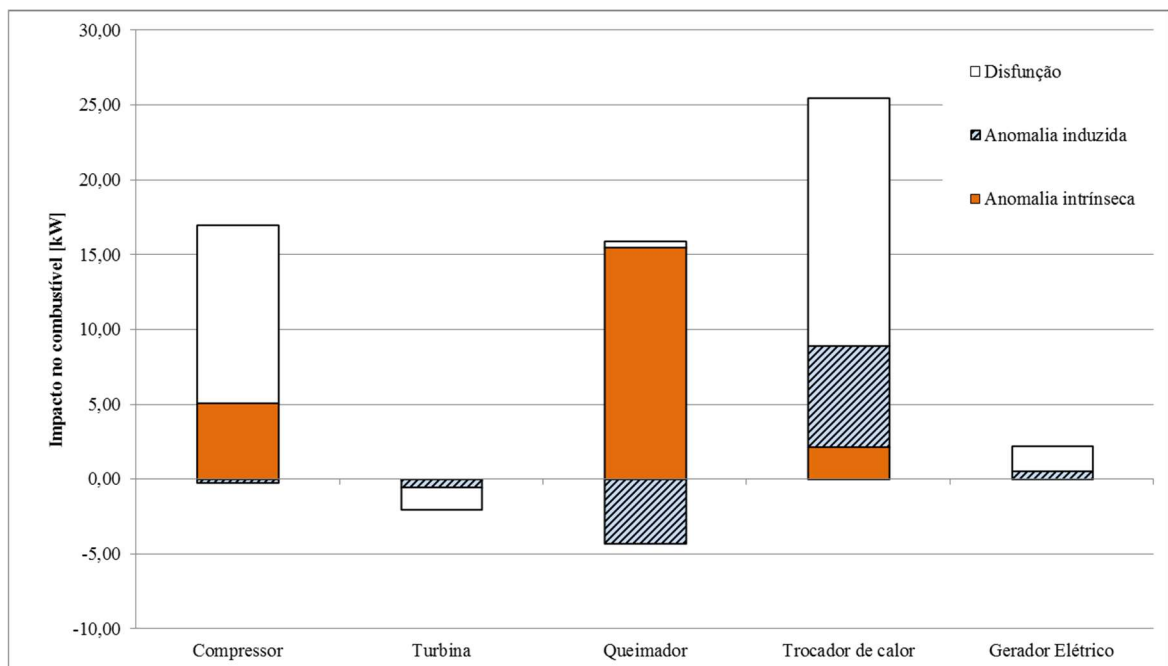


Figura 4.28. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 13.

Ao final, o trocador de calor é o equipamento com maior impacto no combustível (25,44 kW) apesar de ter uma anomalia intrínseca (2,14 kW) menor que os outros dois equipamentos degradados (15,48 kW para o queimador e 5,06 kW para o compressor), como pode-se observar na Figura 4.29. A turbina é o único equipamento que tem um valor negativo de impacto. Neste caso os equipamentos geram um impacto no combustível de 53,92 kW contra 2,60 kW da variação da potência.

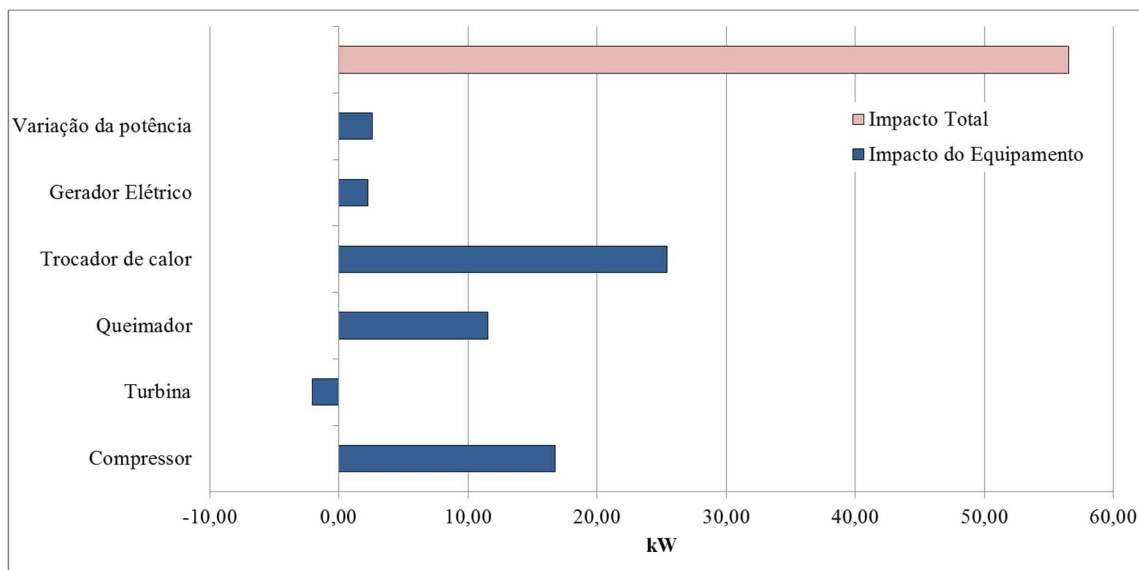


Figura 4.29. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 13

#### 4.3.14. Caso 14. Turbina, queimador e trocador com $MF_{int}$

Este é o último caso analisado com três anomalias simultâneas. Os parâmetros para a condição real e de comportamento esperado apresentam-se na Tabela 4.45.

Tabela 4.45. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e esperada para o caso 14

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,813	101,32	15,0	0,00	0,813	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,813	474,28	220,5	146,08	0,813	474,28	220,5	146,07
3-Ar que sai do trocador	0,813	474,28	903,0	538,77	0,813	474,28	906,0	540,95
4- Ar que sai da Turbina	0,813	101,32	607,6	235,59	0,813	101,32	591,5	225,77
5- Gases que saem do queimador	0,893	101,32	956,8	529,57	0,893	101,32	977,3	546,60
6- Gases que saem do trocador	0,893	101,32	352,3	106,55	0,893	101,32	352,3	104,98
7- Combustível	0,081	101,40	60,0	441,78	0,081	101,40	60,0	441,78
8-Potência do compressor	-	-	-	170,32	-	-	-	170,30
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	100,16	-	-	-	100,16
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	276,90	-	-	-	291,56

Os resultados do DTE com OE para o caso com degradação interna nos equipamentos

Turbina, Queimador e trocador de calor são apresentados na Tabela 4.46 e Tabela 4.47, assim como na Figura 4.30 e Figura 4.31.

Tabela 4.46. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 14.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,30	-0,95
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,01	-0,02
1D8	Operador Exergético Compressor	0,02	0,05
2	Turbina	-0,82	-2,18
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,43	-22,48
2D11	Operador Exergético Turbina	14,20	41,69
3	Queimador	-8,09	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,12	20,00
4	Trocador de calor	1,49	2,09
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	1,99	5,27
5	Gerador Elétrico	0,51	1,60
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-10,48
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	1,06
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Novamente a metodologia permite identificar os equipamentos degradados. Como se observa na Tabela 4.46 os operadores associados aos equipamentos turbina, queimador e trocador de calor são os que apresentam anomalias. Assim, a anomalia de 14,20 kW em 2D11 e -8,43 kW em 2D4 indica degradação na turbina, a anomalia de 15,12 kW em 3D5 indica degradação no queimador, e a anomalia de 1,99 kW em 4D3 indica degradação no trocador de calor. Como mostrado na Tabela 4.47 e Figura 4.30 o compressor tem uma anomalia induzida negativa (-0,30 kW), o que indica que trabalha num ponto de operação de melhor eficiência.

Tabela 4.47. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 14.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	0,01	-0,30	-0,92	-1,21
2	Turbina	5,77	-0,82	17,03	21,98
3	Queimador	15,12	-8,09	21,06	28,09
4	Trocador de calor	1,99	1,49	-3,12	0,36
5	Gerador Elétrico	0,00	0,51	1,60	2,11
Impacto dos equipamentos					51,34
Impacto pela variação da potência					1,67
Impacto total					53,01
Impacto direto					53,01

Para a Turbina e queimador também há anomalias induzidas negativas (-0,82 kW e -8,09 kW, respectivamente), mas eles apresentam anomalias intrínsecas, logo seu comportamento é similar à condição mostrada na Figura 3.2.

A turbina apresenta uma disfunção (17,03 kW) maior que sua anomalia intrínseca (5,77kW), o que daria um impacto no combustível de quase o triplo de sua anomalia intrínseca, já que, apesar que existe uma anomalia induzida negativa na turbina (-0,82 kW), esta é pequena se comparada com a anomalia induzida e a disfunção.

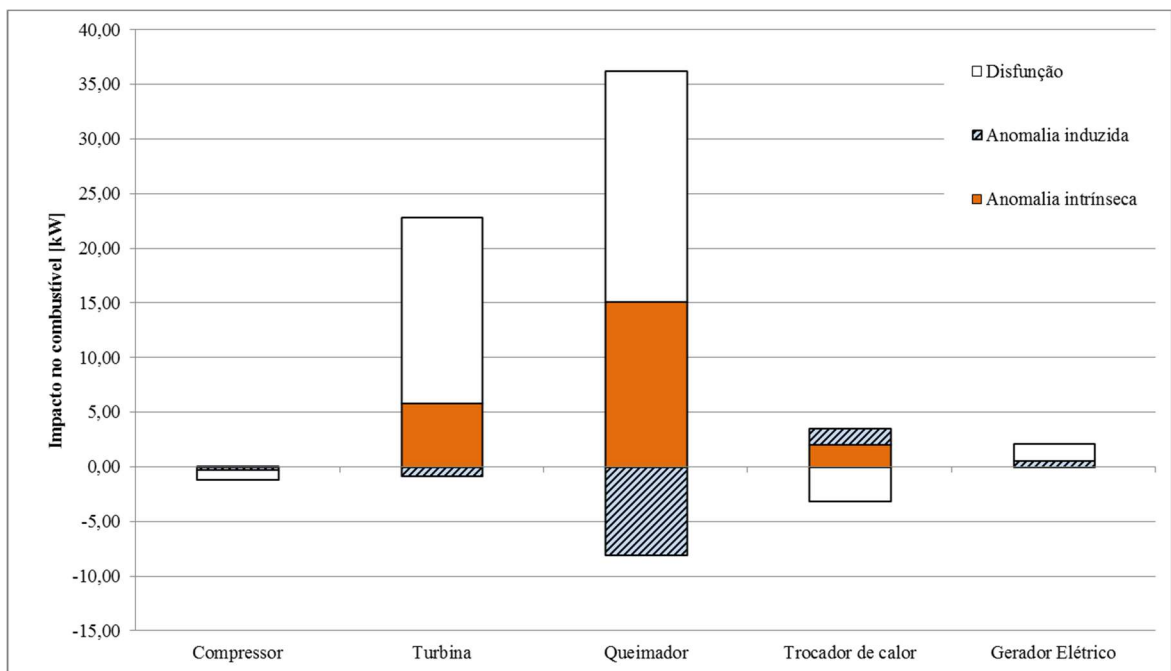


Figura 4.30. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 14.

Para o queimador sua anomalia intrínseca é de 15,12 kW, mas seu impacto é de 1,86 vezes a sua anomalia intrínseca. Isto ocorre porque, apesar de ter uma anomalia induzida negativa de -8,09 kW, o queimador tem um aumento no seu produto na condição real com relação à condição de referência, representado por uma disfunção de 21,06 kW. Assim, o queimador é o equipamento com maior impacto no combustível (28,09 kW), seguido pela turbina (21,98 kW) e pelo gerador elétrico (2,11 kW), que embora não tenha degradações internas, apresentam um aumento no seu produto associado à maior potência gerada na condição real em relação à condição de referência, como mostrado na Figura 4.31. O queimador e a turbina representam mais de 94% do impacto total.

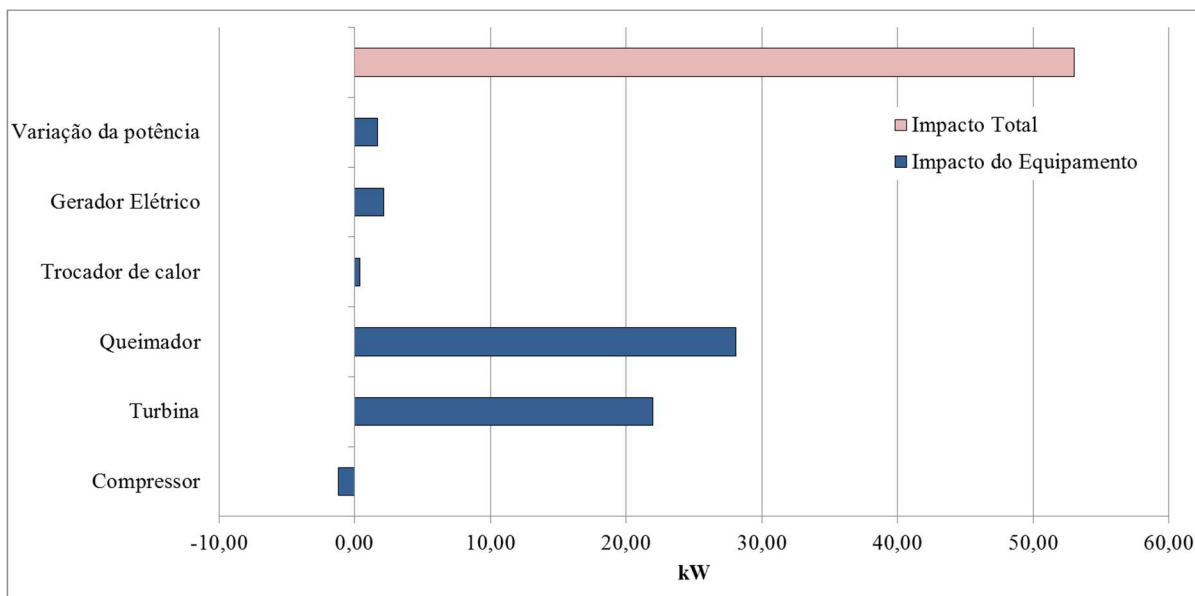


Figura 4.31. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 14

A seguir, como último caso, apresenta-se a condição de operação com anomalias simultâneas nos quatro equipamentos principais do ciclo EFGT, isto é, degradações no compressor, turbina, queimador e trocador de calor.

#### 4.3.15. Caso 15. Compressor, turbina, queimador e trocador de calor com $MF_{int}$

Foi simulada uma diminuição no desempenho dos quatro principais equipamentos do ciclo EFGT, obtendo-se a condição real mostrada na Tabela 4.48, assim como a condição de comportamento esperado simulada usando as RNA.

Os resultados do DTE com OE apresenta-se, para cada uma dos equipamentos da estrutura produtiva da Figura 4.4, na Tabela 4.49 e consolidado para cada um dos equipamentos reais na Tabela 4.50. Na Figura 4.32 mostra-se a desagregação das três componentes do impacto no combustível: disfunção, anomalia intrínseca e anomalia induzida. Na Figura 4.33, apresenta-se o impacto de cada equipamento, assim como o impacto devido à variação na potência gerada.

Como mostrado na Tabela 4.49 cada um dos equipamentos principais (exceto o Gerador elétrico) têm pelo menos um dos seus OE com um valor de anomalia, o que indica que foram identificados o compressor (1D2+1D8=5,04 kW), a turbina (2D4+2D11=5,80 kW), o trocador de calor (4D3=2,14 kW) e o queimador (3D5=15,12 kW), como equipamentos com degradação interna.

Tabela 4.48. Parâmetros termodinâmicos e fluxos de exergia para a condição real e condição esperada para o caso 15.

Fluxo	Teste (Real)				Comportamento esperado (RNA)			
	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E'(kW)	$\dot{m}$ (kg/s)	P(kPa)	T(°C)	E''(kW)
1-Ar que entra ao compressor	0,819	101,32	15,0	0,00	0,819	101,32	15,0	0,00
2- Ar sai do compressor	0,819	484,47	234,9	153,78	0,819	484,47	223,9	149,82
3-Ar que sai do trocador	0,819	484,47	936,0	568,48	0,819	484,47	939,4	570,96
4- Ar que sai da Turbina	0,819	101,32	630,0	251,30	0,819	101,32	613,2	240,82
5- Gases que saem do queimador	0,904	101,32	990,3	564,56	0,904	101,32	1011,6	582,72
6- Gases que saem do trocador	0,904	101,32	372,9	118,86	0,904	101,32	372,9	117,24
7- Combustível	0,085	101,40	60,0	466,86	0,085	101,40	60,0	466,86
8-Potência do compressor	-	-	-	183,75	-	-	-	174,48
10-Potência elétrica do sistema	-	-	-	99,91	-	-	-	99,91
11-Potência de eixo da turbina	-	-	-	290,32	-	-	-	305,74

Tabela 4.49. Resultados do diagnóstico termoeconômico do ciclo EFGT para o caso 15.

Equip.	Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,48	-1,74
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,58	-15,65
1D8	Operador Exergético Compressor	8,62	29,14
2	Turbina	-1,31	-3,78
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,43	-24,29
2D11	Operador Exergético Turbina	14,23	44,97
3	Queimador	-11,25	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,12	21,24
4	Trocador de calor	5,78	8,57
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,14	6,14
5	Gerador Elétrico	0,77	2,59
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-12,79
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00
C	Bifurcação (Gerador elétrico e Compressor)	0,00	0,00
F	Junção (combustor)	0,00	1,43
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00

Como se mostra na Tabela 4.50, existem anomalias induzidas negativas no compressor (-0,48 kW), turbina (-1,31 kW) e queimador (-11,25 kW), o que indica que a condição que foi escolhida para o ciclo EFGT ainda pode ser otimizada mediante a modificação dos parâmetros de operação na condição de referência. Assim, como foram mostrados nos casos anteriores, os equipamentos do ciclo EFGT considerados trabalham na condição de referência num ponto de

operação onde suas eficiências não são as maiores que eles podem atingir. Porém, a eficiência máxima do EFGT, como um conjunto, é obtida num ponto de operação que não representa necessariamente o ponto de máxima eficiência dos seus componentes individuais. Como foi mostrado por Kautz; Hansen (2007) e Orozco, Venturini e Escobar (2015), para uma turbina de queima externa, o ponto de operação de máxima eficiência não coincide com sua máxima potência.

Tabela 4.50. Anomalia intrínseca, anomalia induzida, disfunção e impacto no combustível para cada equipamento do ciclo EFGT para o caso 15.

Equip.	Descrição	Anomalia intrínseca (kW)	Anomalia induzida (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no combustível (kW)
1	Compressor	5,04	-0,48	11,76	16,32
2	Turbina	5,80	-1,31	16,90	21,40
3	Queimador	15,12	-11,25	22,67	26,54
4	Trocador de calor	2,14	5,78	1,92	9,84
5	Gerador Elétrico	0,00	0,77	2,59	3,36
Impacto dos equipamentos					77,46
Impacto pela variação da potência					0,63
Impacto total					78,09
Impacto direto					78,09

Como mostrado na Figura 4.32, o trocador de calor apresenta uma anomalia induzida positiva (5,78 kW), logo este equipamento trabalha, nesta condição, num ponto de operação de menor eficiência que na condição de referência. No final, todos os equipamentos tem incrementado seu produto (representado por disfunções positivas) para fornecer os recursos demandados pelos outros componentes, de acordo com os *setpoints* estabelecidos pelo sistema de controle para cada um dos parâmetros de operação.

Como esperado, este caso representa o maior valor de impacto no combustível que pode ser causado para degradações nos equipamentos não maiores do que 5% (Figura 4.33). Aqui todos os equipamentos tem um impacto com valor positivo, sendo o queimador o equipamento com maior relevância (26,54 kW), seguido pela turbina (21,40 kW) e compressor (16,32 kW). O trocador de calor tem um impacto menor que os demais componentes para um mesmo nível de degradação, mas por ser o equipamento que está em contato direto com os gases produto da combustão (que são gases com um processo de limpeza não muito alto) requer um seguimento adequado de seu nível de degradação na hora de executar as rotinas de manutenção (KAUTZ AND HANSEN, 2007).

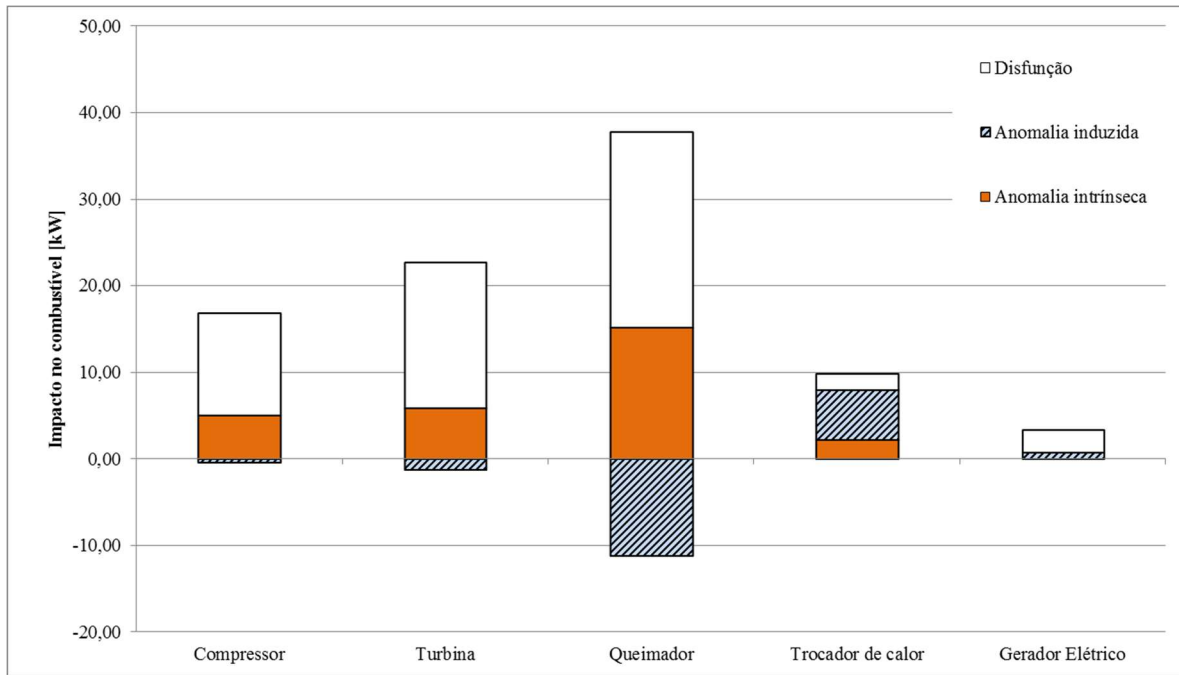


Figura 4.32. Anomalias e disfunções nos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 15

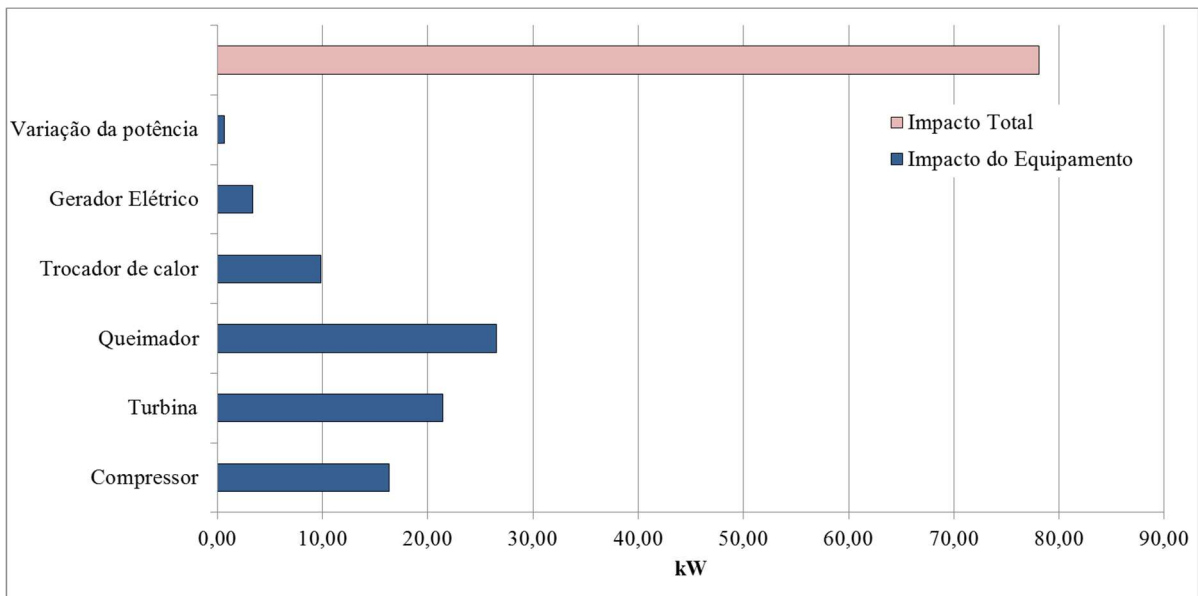


Figura 4.33. Impacto no combustível dos equipamentos do ciclo EFGT para o caso 15.

## CAPÍTULO V

### 5. OPERADORES EXERGÉTICOS, EQUIPAMENTOS DISSIPATIVOS E DESAGREGAÇÃO DA EXERGIA

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos ao se aplicar a metodologia de diagnóstico termodinâmico dos Operadores Exergéticos (OE) a um ciclo Rankine de potência para estabelecer os efeitos causados pela presença de equipamentos dissipativos no sistema, neste caso o condensador. Santos (2009) classifica as metodologias termoeconômicas, tendo em conta o diagrama produtivo utilizado para a alocação dos resíduos e equipamentos dissipativos, e o tipo de fluxo produtivo usado, em três categorias: (i) exergia total (Modelo E), (ii) exergia total juntamente com a neguentropia (Modelo E&S), e (iii) exergia física desagregada nas suas parcelas entálpicas e neguentrópicas (Modelo H&S).

No modelo E a modelagem termoeconômica pode ser de dois formas, baseada na exergia total dos fluxos físicos ou baseada na exergia total dos fluxos produtivos. Na primeira as equações matemáticas usadas para calcular os custos dos fluxos físicos. Para o caso de um ciclo Rankine de potência, em alguns trabalhos, a exergia dissipada pelo condensador é alocada nos equipamentos que aumentam a entropia do fluido de trabalho proporcionalmente à quantidade de entropia gerada em cada um deles. Quando o modelo E é baseado na exergia total dos fluxos produtivos, o processo de formação de custos é representado de forma gráfica. Esta representação gráfica é chamada de Diagrama Produtivo. Para um ciclo Rankine de potência, o condensador e a turbina de baixa pressão se juntam numa única unidade produtiva. Assim, o condensador é um equipamento auxiliar da turbina de baixa pressão. Só desta forma pode ser definida a função do condensador quando se usam fluxos de exergia total no modelo termoeconômico.

No modelo E&S um fluxo fictício chamado de neguentropia é introduzido para poder definir o produto e alocar os custos de equipamentos dissipativos. Na estrutura produtiva de um ciclo Rankine, por exemplo, a neguentropia é usada junto com a exergia total considerando que o condensador produz neguentropia para cancelar a geração de entropia que ocorre nos outros componentes do ciclo.

De acordo com Santos (2009), a neguentropia é a solução para isolar os equipamentos dissipativos, assim como também, a única maneira de alocar explicitamente os resíduos. Este autor afirma que o único problema que a neguentropia tem é a maneira como ela é aplicada, que, conseqüentemente, traz algumas inconsistências, como, por exemplo, que aparecem

equipamentos com produtos maiores que os insumos, isto é, eficiências maiores que 100%. Assim, Santos (2009), propõe usar a neguentropia como uma parcela da exergia física no que é chamado de Modelo H&S.

O leitor encontrará maior informação, sobre os temas tratados nesta seção, nos trabalhos de: Frangopoulos, (1987); Lozano, Valero e Serra (1993); Valero et al. (1994); Von Spakovsky (1994); Tsatsaronis e Pisa (1994); Frangopoulos (1994); Serra (1994); Torres e Valero (2000); Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) e Santos (2009), entre outros autores.

Assim, a metodologia dos operadores exergéticos foi testada nos três modelos termoeconômicos: Modelo E, Modelo E&S e Modelo H&S, para determinar como os resultados do diagnóstico são influenciados pelo tipo de modelo termoeconômico.

## **5.1. Descrição do ciclo Rankine de potência utilizado**

Um ciclo Rankine simples foi elaborado no software comercial GateCycle<sup>TM</sup> para testar a metodologia proposta nesta tese. Os dados para os fluxos de massa e energia e as condições de operação do sistema foram obtidos de Santos (2009) e Secchin (2015). Na Figura 5.1, o esquema do ciclo Rankine considerado (estrutura física) é apresentado. O ciclo está constituído por cinco equipamentos principais: uma bomba de alimentação (B), um gerador de vapor (GV), uma turbina a vapor (TV), um condensador (C) e um gerador elétrico (GE). O combustível é o gás natural, com um consumo em base exergética (QC) de 70.000, kW na condição de referência.

Dos 20.230 kW de potência elétrica que são produzidos pelo gerador elétrico, a bomba de alimentação consome 155 kW (PB) e a bomba que circula a água de resfriamento do condensador consome 75kW (Pc), pelo que o sistema produz uma potência elétrica líquida (PL) de 20.000 kW.

Na Tabela 5.1 mostram-se os principais parâmetros termodinâmicos do modelo apresentado em Santos (2009) e Secchin (2015), enquanto na Tabela 5.2 apresentam-se eficiências usadas para simular cada um dos equipamentos principais. Estas eficiências foram obtidas de Secchin (2015).

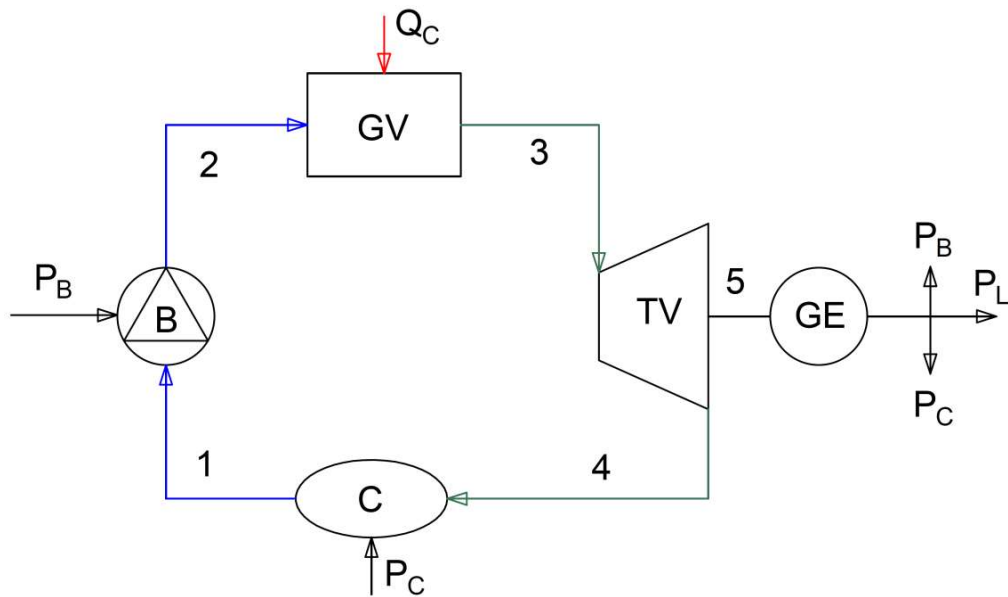


Figura 5.1. Estrutura Física do Ciclo Rankine de Potência. Tomado de Santos (2009)

Tabela 5.1. Valores de eficiência dos equipamentos (condição de Referência). Tomado de Secchin (2015)

Item	Descrição	Valor (%)
$\eta_{GV}$	Eficiência térmica do gerador de vapor (GV)	90,57%
$\eta_{TV}$	Eficiência isentrópica da turbina a vapor (TV)	84,90%
$\eta_B$	Eficiência isentrópica da bomba de alimentação (B)	82,97%
$\eta_{motorB}$	Eficiência do motor elétrico da bomba de alimentação	95,04%
$\eta_{Gerador}$	Eficiência do gerador elétrico	96,00%

Tabela 5.2. Descrição dos fluxos físicos do Ciclo Rankine de potência (condição de referência). Tomado de Secchin (2015)

FLUXOS FÍSICOS				
Nº	DESCRIÇÃO	m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]
0 (ref)	Ambiente	0	1,01	15
1	Água	19,5	0,07	39,04
2	Água	19,5	63	39,5
3	Vapor	19,5	60	500
4	Mistura (x=0,9)	19,5	0,07	39,04

Na Tabela 5.3 apresentam-se os dados obtidos do modelo simulado em GateCycle para a condição de referência.

Tabela 5.3. Dados do modelo simulado em GateCycle para a condição de referência.

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]	E [kW]
N°	DESCRIÇÃO				
0 (ref)	Ambiente	0	1,0132	15	0
1	Água	19,5	0,07	39,02	75,38
2	Água	19,5	63	39,59	201,47
3	Vapor	19,5	60	500	28.108,95
4	Mistura (x=0,913)	19,5	0,07	39,02	3.372,84
5	Potência de Eixo	-	-	-	20.643,84
6	PB	-	-	-	154,99
7	PC	-	-	-	75,06
8	PL	-	-	-	20.000,92
9	QC	-	-	-	70.002,04

Para testar a metodologia dos OE foram simulados dois casos com anomalias nos equipamentos do sistema. No primeiro caso é considerada uma anomalia intrínseca no condensador, que faz com que a quantidade de calor rejeitado seja menor que na condição de referência, como consequência de um aumento no fator de incrustação (*Fouling Factor*) deste equipamento, causando um aumento na pressão e temperatura de condensação e, conseqüentemente, uma queda na potência líquida gerada pelo sistema. O sistema de controle, para manter o mesmo nível de potência gerada, faz com que o fluxo de água de resfriamento aumente. Para compensar o consumo elétrico adicional das bombas do sistema de resfriamento e para ajudar também a suprir a queda na potência gerada, a produção de vapor no gerador de vapor é aumentada até que, no balanço energético, a potência líquida desejada seja atingida. Conseqüentemente um aumento no consumo de combustível é necessário. No segundo caso, além da anomalia intrínseca no condensador, considera-se que a turbina a vapor apresenta uma anomalia intrínseca, representada por uma diminuição da sua eficiência isentrópica. Isto resulta que, além do que já foi descrito anteriormente, um aumento adicional na produção de vapor seja necessário para suprir a queda na potência líquida produto da anomalia intrínseca na turbina a vapor.

A anomalia intrínseca no condensador foi simulada como uma diminuição da efetividade deste trocador de calor de 38% do seu valor de referência. A anomalia intrínseca na turbina a vapor foi simulada como uma queda na eficiência isentrópica de 1,0% do seu valor de referência. Estes valores foram escolhidos de forma arbitrária. Na Tabela 5.4 e Tabela 5.5 os dados de temperatura, fluxo mássico, pressão, potência e exergia são apresentados para as duas condições com anomalias, respectivamente, isto é, Caso 1: anomalia no condensador e Caso 2:

Anomalia no condensador e na Turbina a vapor.

Tabela 5.4. Caso 1: condição com anomalia intrínseca no condensador

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]	E [kW]
Nº	DESCRIÇÃO				
0 (ref)	Ambiente	0	1,0132	15	0
1	Água	20,96	0,1495	53,93	209,45
2	Água	20,96	67,83	54,61	357,80
3	Vapor	20,96	64,35	500	30.326,07
4	Mistura (x=0,929)	20,96	0,1495	53,93	5.704,43
5	Potência de Eixo	-	-	-	20.666,31
6	PB	-	-	-	180,31
7	PC	-	-	-	80,53
8	PL	-	-	-	19.992,15
9	QC	-	-	-	73.653,48

Tabela 5.5. Caso 2: condição com anomalia intrínseca tanto no condensador como na turbina a vapor

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]	E [kW]
Nº	DESCRIÇÃO				
0 (ref)	Ambiente	0	1,0132	15	0
1	Água	21,165	15,3219	54,44	216,92
2	Água	21,165	68,53	55,13	368,37
3	Vapor	21,165	64,98	500	30.645,19
4	Mistura (x=0,932)	21,165	15,3219	54,44	5.847,92
5	Potência de Eixo	-	-	-	20.667,54
6	PB	-	-	-	184,01
7	PC	-	-	-	80,54
8	PL	-	-	-	19.989,64
9	QC	-	-	-	74.320,90

Para efeitos práticos, os parâmetros termodinâmicos para a condição esperada, que permitem o cálculos dos valores de exergia  $E_i''$ , foram obtidos mediante a elaboração dos modelos individuais de cada equipamento do sistema Rankine simulados diretamente no GateCycle, isto é, não foram obtidos mediante RNA, para mostrar que a abordagem dos OE não necessariamente deve ser usado em conjunto com RNA. Os fluxos  $E_i''$  podem ser obtidos mediante simulações, usando equações matemáticas, curvas de operações dos equipamentos, regressão linear ou qualquer outra fonte de informação disponível. O uso das RNA tem como

objetivo ter em conta a degradação não recuperável que sofrem os equipamentos dos sistemas reais.

Os dados para os casos 1 e 2 são apresentados na Tabela 5.6 e Tabela 5.7, respectivamente.

Tabela 5. 6. Condição esperada do caso 1

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]	E [kW]
Nº	DESCRIÇÃO				
0 (ref)	Ambiente	0	1,0132	15	0
1	Água	20,96	0,1495	53,93	209,45
2	Água	20,96	67,83	54,61	357,80
3	Vapor	20,96	64,35	500	30.326,07
4	Mistura (x=0,929)	20,96	0,1495	53,93	5.704,43
5	Potência de Eixo	-	-	-	20.666,31
6	PB	-	-	-	180,31
7	PC	-	-	-	46,69
8	PL	-	-	-	19.992,15
9	QC	-	-	-	73.653,48

Tabela 5. 7. Condição esperada do caso 2

FLUXOS FÍSICOS		m [Kg/s]	p [bar]	T [°C]	E [kW]
Nº	DESCRIÇÃO				
0 (ref)	Ambiente	0	1,0132	15	0
1	Água	21,165	15,3219	54,44	216,92
2	Água	21,165	68,53	55,13	368,37
3	Vapor	21,165	64,98	500	30.645,19
4	Mistura (x=0,928)	21,165	15,3219	54,44	5.847,92
5	Potência de Eixo	-	-	-	20.882,65
6	PB	-	-	-	184,01
7	PC	-	-	-	46,71
8	PL	-	-	-	19.989,64
9	QC	-	-	-	74.320,90

## 5.2. Aplicação da metodologia de diagnóstico dos operadores exergeticos a um ciclo Rankine de potência usando os modelos termoeconômicos E, E&S e H&S

Para o sistema Rankine apresentado na Figura 5.1 elabora-se a correspondente Estrutura de

Transição que é apresentada na Figura 5.2.

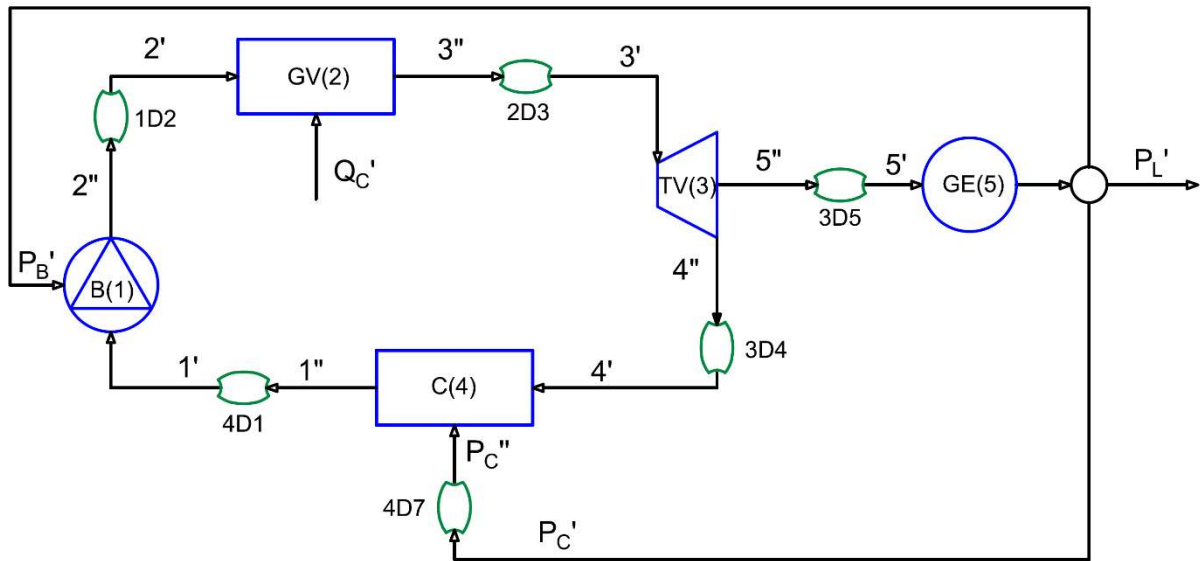


Figura 5.2. Estrutura de transição para um ciclo Rankine de potência

### 5.2.1. Oparadores exergeticos e o modelo E (exergia total)

Na Figura 5.3 é apresentada a estrutura produtiva para a Estrutura de Transição da Figura 5.2, quando é aplicado o diagnóstico termoeconômico baseado na exergia total.

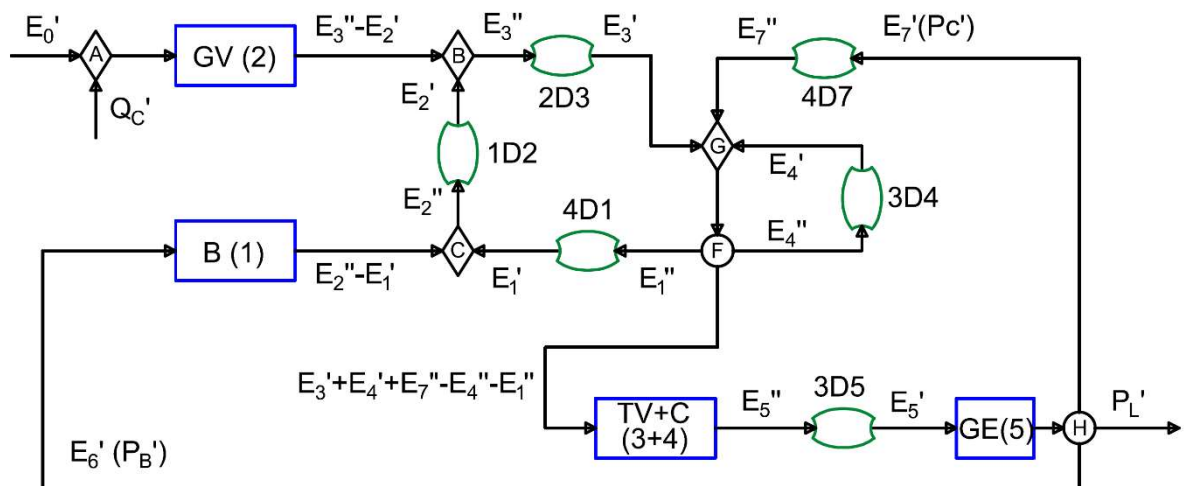


Figura 5.3. Estrutura produtiva para um ciclo Rankine de potência para o modelo E.

Agora o diagnóstico termoeconômico é aplicado para o Caso 1 (Anomalia no condensador), obtendo-se as matrizes próprias do diagnóstico, que são apresentadas no Apêndice E.1.

Os resultados para o diagnóstico apresentam-se na Tabela 5.8, onde se pode observar a presença de uma anomalia de 54,39 kW no operador exergetico 4D7, que é associado ao condensador, identificando assim, uma anomalia intrínseca neste equipamento. A bomba (BOMB) apresenta valores de anomalia induzida e disfunção negativos (-1,73 kW e -4,63 kW, respectivamente), isto, é, a bomba trabalha num ponto de operação onde sua eficiência é maior e o seu produto menor que na condição de referência, causando um impacto no consumo de combustível negativo. O gerador de vapor (GV) apresenta uma anomalia de tipo induzido de -1413,39 kW, já que trabalha numa condição onde sua eficiência é maior que na condição de referência. O produto de GV não muda entre a condição de referência e real, o que se pode observar como uma disfunção nula. A unidade produtiva integrada pela turbina (TV) e o condensador apresentam uma anomalia induzida de 2021,39 kW que junto a uma disfunção de 2979,62 kW causam um impacto no consumo de combustível de 5001,50 kW. O impacto no consumo de combustível dos equipamentos é de 3683,75 kW, mas a potência gerada na condição real é menor que na condição de referência pelo que o impacto pela variação da potência é negativo. Assim, o impacto no consumo de combustível total é de 361,43 kW que é o mesmo valor obtido de forma direta.

Tabela 5. 8. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 1 e Exergia total

Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no consumo de combustível (kW)
BOMB(1)	-1,73	-4,63	-6,36
GV(2)	-1413,39	0,00	-1413,39
TV(3)+CND(4)	2021,89	2979,62	5001,50
GE(5)	0,00	0,00	0,00
A	0,00	0,00	0,00
B	0,00	110,24	110,24
C	0,00	-85,30	-85,30
F	0,00	0,00	0,00
G	0,00	-123,31	-123,31
H	0,00	0,00	0,00
1D2 (bomba)	0,00	0,00	0,00
2D3(GV)	0,00	0,00	0,00
3D4(TV)	0,00	0,00	0,00
3D5(TV)	0,00	0,00	0,00
4D1(CND)	0,00	0,00	0,00
4D7(CND)	<b>54,39</b>	145,98	200,36
Impacto por anomalias nos equipamentos			3683,75
Impacto devido à diferença na potência gerada			-32,32
Total calculado			3651,43
Obtido diretamente			3651,43

De igual forma para o Caso 2 (anomalia intrínseca no condensador e na turbina a vapor) a metodologia de diagnóstico é aplicada obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 5.9.

Observa-se a presença de anomalias nos operadores exergéticos 3D4 e 3D5 associados à turbina a vapor (-14,58kW e 214,86 kW, respectivamente) e no operador exergético 4D7 associado ao condensador (54,36 kW), o que indica que existem degradações internas na turbina a vapor e no condensador. Assim, ao somar as anomalias de 3D4 e 3D5, obtém-se uma anomalia para a turbina a vapor de 200,28 kW. A bomba e o gerador de vapor têm anomalias induzidas negativas (-1,78 kW e, -1497,18 kW, respectivamente) o que indica uma maior eficiência na condição real que na condição de referência. Na condição real a bomba tem menor produto (disfunção de -4,83 kW) e o gerador de vapor não muda seu produto (disfunção nula). A turbina e o condensador tem o maior impacto no consumo de combustível. O impacto no consumo de combustível causado pelos equipamentos e de 4360,80 kW. Novamente o impacto pela variação da potência é negativo (-41,94 kW), assim, o impacto total é 4318,86 kW.

As principais matrizes obtidas ao aplicar a metodologia de diagnóstico são apresentadas no Apêndice E.2.

Tabela 5. 9. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 2 e Exergia total

Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no consumo de combustível (kW)
BOMB(1)	-1,78	-4,83	-6,61
GV(2)	-1497,18	0,00	-1497,18
TV(3)+CND(4)	2042,83	3000,88	5043,71
GE(5)	0,00	0,00	0,00
A	0,00	0,00	0,00
B	0,00	116,83	116,83
C	0,00	-88,62	-88,62
F	0,00	0,00	0,00
G	0,00	-148,24	-148,24
H	0,00	0,00	0,00
1D2 (bomba)	0,00	0,00	0,00
2D3(GV)	0,00	0,00	0,00
3D4(TV)	<b>-14,58</b>	-21,42	-36,00
3D5(TV)	<b>214,86</b>	559,95	774,81
4D1(CND)	0,00	0,00	0,00
4D7(CND)	<b>54,36</b>	147,75	202,11
Impacto por anomalias nos equipamentos			4360,80
Impacto devido à diferença na potência gerada			-41,94
Total calculado			4318,86
Obtido diretamente			4318,86

## 5.2.2. Operadores exergéticos e o modelo E&S

Na Figura 5.4 é apresentada a estrutura produtiva baseada na Estrutura de transição da Figura 5.2, quando é aplicado o diagnóstico termoeconômico baseado no modelo termoeconômico

E&S. As principais matrizes calculadas para o diagnóstico termoeconômico para os casos 1 e 2 são apresentadas nos Apêndices F1 e F2, respectivamente.

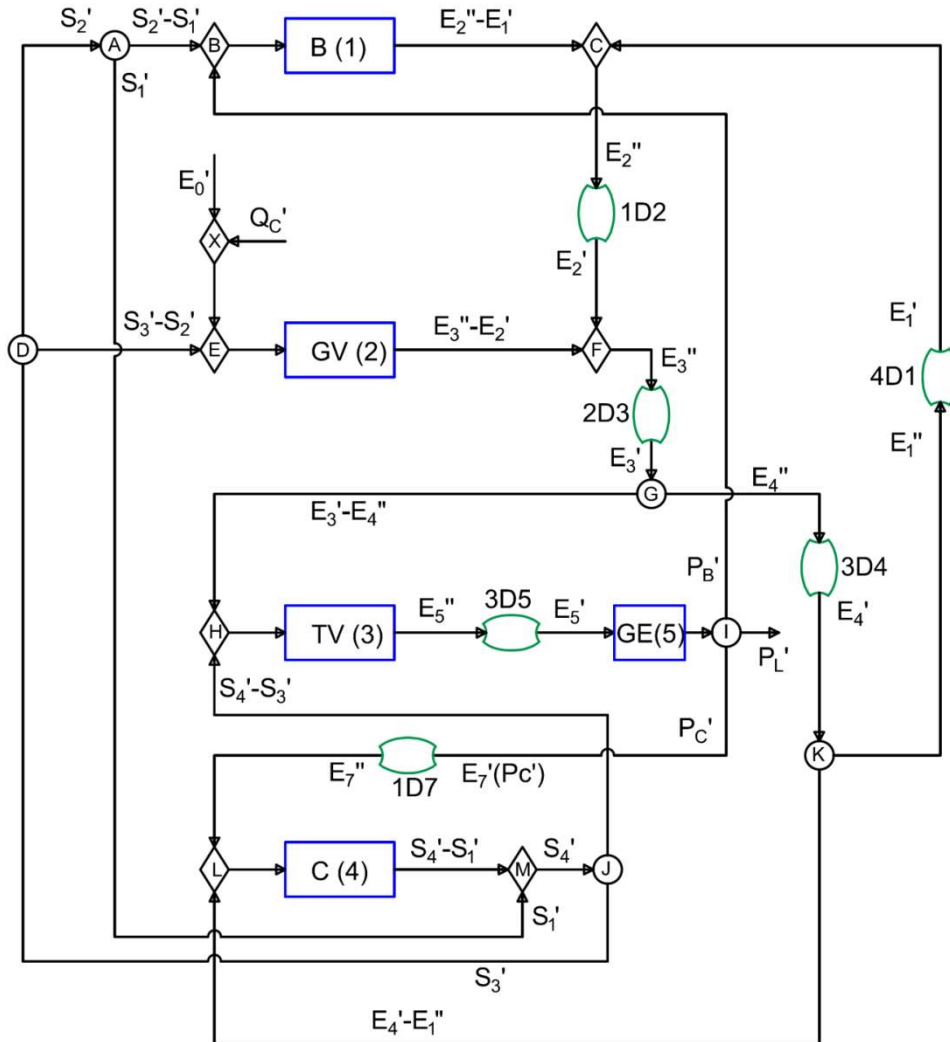


Figura 5.4. Estrutura produtiva para um ciclo Rankine de potência para o modelo E&S.

A metodologia de diagnóstico termoeconômico é aplicada para o Caso 1 obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 5.10. Observa-se que uma anomalia de 54,39 kW aparece no OE 4D7, o que significa a presença de uma anomalia intrínseca no condensador. Este valor de anomalia intrínseca é o mesmo que o obtido pelo modelo de exergia total. Neste caso, três equipamentos apresentam anomalias induzidas negativas: a bomba (-3,36 kW), o gerador de vapor (-2694,27 kW) e a turbina a vapor (-285,16 kW). Isto indica que estes equipamentos estão trabalhando numa condição onde sua eficiência é maior que na condição de referência de forma similar a como foi descrito no Capítulo 4 para o ciclo EFGT. O condensador, além de ter uma anomalia intrínseca, também tem uma anomalia induzida positiva (2018,02 kW) indicando que

o seu desempenho tem sido diminuído tanto pela degradação interna como pelo fato de trabalhar num ponto de menor eficiência de troca de calor. Na condição real, a bomba e a turbina a vapor têm disfunções negativas (-7,25 kW e -460,32 kW, respectivamente) o que indica uma diminuição de seus produtos com relação à condição de referência. O produto do condensador aumentou (disfunção de 424,12 kW). O impacto no consumo de combustível causado pelos equipamentos (3683,75 kW), é o mesmo que foi obtido para o caso 1 do modelo E. O impacto pela variação da potência gerada é o mesmo (-32,32 kW), e conseqüentemente, o impacto total também é igual (3651,43 kW).

Tabela 5. 10. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 1 e modelo E&S

Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no consumo de combustível (kW)
BOMB(1)	-3,36	-7,25	-10,62
GV(2)	-2694,27	531,20	-2163,07
TV(3)	-285,16	-460,32	-745,48
CND(4)	2018,02	4024,12	6042,14
GE(5)	0,00	0,00	0,00
A	0,00	0,00	0,00
B	0,00	3,59	3,59
C	0,00	-68,41	-68,41
D	0,00	0,00	0,00
E	0,00	227,51	227,51
F	0,00	87,79	87,79
G	0,00	0,00	0,00
H	0,00	267,97	267,97
I	0,00	0,00	0,00
J	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00
M	0,00	0,00	0,00
L	0,00	-158,03	-158,03
X	0,00	0,00	0,00
1D2	0,00	0,00	0,00
2D3	0,00	0,00	0,00
3D4	0,00	0,00	0,00
3D5	0,00	0,00	0,00
4D1	0,00	0,00	0,00
4D7	<b>54,39</b>	145,98	200,36
Impacto por anomalias nos equipamentos			3683,75
Impacto devido à diferença na potência gerada			-32,32
Total calculado			3651,43
Obtido diretamente			3651,43

Os resultados para o Caso 2 se mostram na Tabela 5.11. São observados os mesmos valores de anomalias nos mesmos operadores exergéticos do Modelo E, isto é, 3D4 (-14,58 kW), 3D5 (214,86 kW) e 4D7 (56,36 kW), indicando anomalias no compressor e turbina a vapor.

Aqui, a bomba e o gerador de vapor apresentam anomalias intrínsecas negativas(-3,48 kW e -2854,06 kW, respectivamente). Assim, se pode afirmar que estes equipamentos estão

trabalhando numa condição onde sua eficiência é maior que na condição de referência. Para a turbina a vapor ocorre que tem uma diminuição de sua eficiência como consequência da degradação interna que apresenta, no entanto esta degradação é compensada por uma anomalia intrínseca negativa (-209,79 kW), o que indica que na condição real está trabalhando num ponto de sua curva de operação onde a eficiência seria maior que na condição de referência se não apresentara a degradação.

Os valores para o impacto causado pelos equipamentos, pela variação na potência produzida e o impacto no consumo de combustível total são os mesmos que os obtidos no caso 2 do modelo E.

Tabela 5. 11. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 2 e modelo E&S

Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no consumo de combustível (kW)
BOMB(1)	-3,48	-7,61	-11,10
GV(2)	-2854,06	559,01	-2295,05
TV(3)	-209,79	-336,56	-546,35
CND(4)	2087,21	4135,87	6223,08
GE(5)	0,00	-0,01	-0,01
A	0,00	0,00	0,00
B	0,00	3,78	3,78
C	0,00	-71,82	-71,82
D	0,00	0,00	0,00
E	0,00	239,97	239,97
F	0,00	92,46	92,46
G	0,00	0,00	0,00
H	0,00	-44,25	-44,25
I	0,00	0,00	0,00
J	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00
M	0,00	0,00	0,00
L	0,00	-163,59	-163,59
X	0,00	0,00	0,00
1D2	0,00	0,00	0,00
2D3	0,00	0,00	0,00
3D4	<b>-14,58</b>	-28,67	-43,25
3D5	<b>214,86</b>	559,95	774,81
4D1	0,00	0,00	0,00
4D7	<b>54,36</b>	147,75	202,11
Impacto por anomalias nos equipamentos			4360,80
Impacto devido à diferença na potência gerada			-41,94
Total calculado			4318,86
Obtido diretamente			4318,86

### 5.2.3. Operadores exergéticos e o modelo H&S

Na Figura 5.5 é apresentada a estrutura produtiva baseada na Estrutura de transição da Figura

5.2, quando é aplicado o diagnóstico termoeconômico baseado no modelo termoeconômico H&S. Os fluxos E, H e S que aparecem em algumas bifurcações e disjunções foram definidos atendendo à expressão  $E=H-S$ .

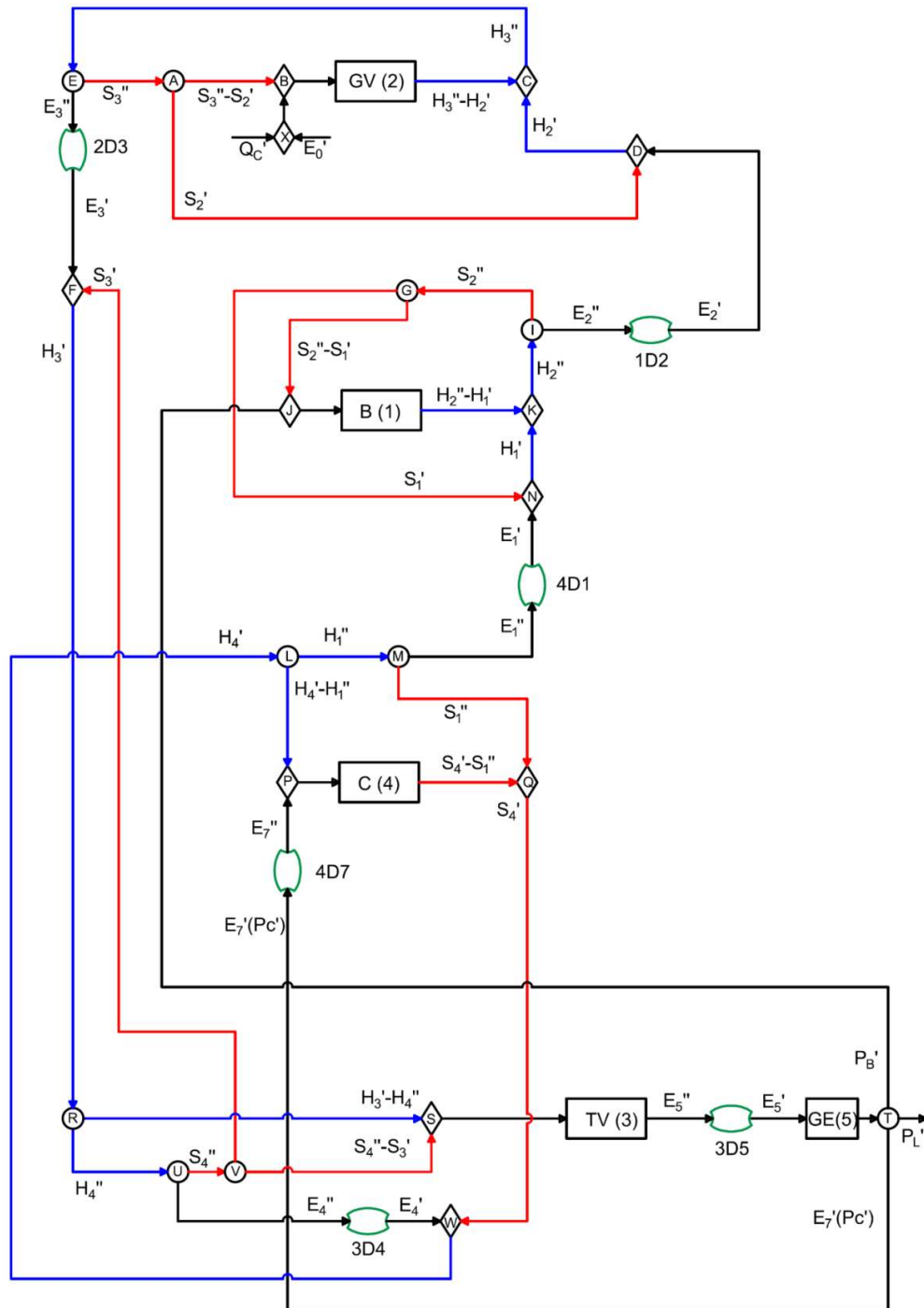


Figura 5.5. Estrutura produtiva para um ciclo Rankine de potência para o modelo H&S.

A metodologia de diagnóstico dos operadores exergéticos foi aplicada para os casos 1 e 2. Os resultados são apresentados nas Tabelas 12 e 13. As principais matrizes calculadas para o

diagnóstico termoeconômico para os casos 1 e 2 são apresentadas nos Apêndices G1 e G2, respectivamente.

Novamente, para o Caso 1, aparece uma anomalia no OE 4D7 o que significa que há uma degradação no condensador, e o valor da anomalia intrínseca, é o mesmo obtido para os modelos E e E&S, isto é, 54,39 kW. Novamente, a bomba, o gerador de vapor e a turbina a vapor apresentam anomalias intrínsecas negativa. A diferença com o Caso 1 do modelo E&S é que agora, além da bomba (-14,85 kW) e a turbina a vapor (-286,77 kW), o gerador de vapor também tem uma disfunção negativa (-388,38 kW).

Tabela 5. 12. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 1 e modelo H&S

Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no consumo de combustível (kW)
BOMB(1)	-1,44	-14,85	-16,29
GV(2)	-574,67	-388,38	-963,05
TV(3)	-141,24	-286,77	-428,00
CND(4)	2018,02	167240,57	169258,59
GE(5)	0,00	0,00	0,00
A	0,00	0,00	0,00
B	0,00	-779,87	-779,87
C	0,00	6213,45	6213,45
D	0,00	434,94	434,94
E	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00
G	0,00	0,00	0,00
I	0,00	0,00	0,00
J	0,00	-51,81	-51,81
K	0,00	1967,14	1967,14
L	0,00	0,00	0,00
M	0,00	0,00	0,00
N	0,00	1477,11	1477,11
P	0,00	2458,30	2458,30
Q	0,00	-12939,50	-12939,50
R	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00
T	0,00	0,00	0,00
U	0,00	0,00	0,00
V	0,00	0,00	0,00
W	0,00	-163147,63	-163147,63
X	0,00	0,00	0,00
1D2	0,00	0,00	0,00
2D3	0,00	0,00	0,00
3D4	0,00	0,00	0,00
3D5	0,00	0,00	0,00
4D1	0,00	0,00	0,00
4D7(CND)	<b>54,39</b>	145,98	200,36
Impacto por anomalias nos equipamentos			3683,75
Impacto devido à diferença na potência gerada			-32,32
Total calculado			3651,43
Obtido diretamente			3651,43

Outro aspecto importante é que a disfunção que aparece no condensador (167240,57 kW) é

45,8 vezes o valor do impacto no consumo de combustível total. Neste caso, os valores do impacto causado pelos equipamentos, pela variação da potência gerada e o impacto no consumo de combustível total tem os mesmos valores que no Caso 1 dos Modelos E e E&S.

No caso 2, os mesmos OE dos modelos termoeconômicos anteriores são identificados apresentando os mesmos valores de anomalias: 3D4 (-14,58 kW), 3D5 (214,86 kW) e 4D7 (54,36 kW). Aqui, todos os equipamentos, exceto o condensador, apresentam anomalias induzidas e disfunção negativas. Os valores do impacto causado pelos equipamentos, pela variação da potência gerada e o impacto no consumo de combustível total tem os mesmos valores que no Caso 1 dos Modelos E e E&S.

Tabela 5. 13. Resultados do diagnóstico termoeconômico para o Caso 2 e modelo H&S

Descrição	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Impacto no consumo de combustível (kW)
BOMB(1)	-1,48	-15,19	-16,68
GV(2)	-609,44	-412,27	-1021,71
TV(3)	-197,41	-401,48	-598,90
CND(4)	2087,21	170599,21	172686,42
GE(5)	0,00	-0,01	-0,01
A	0,00	0,00	0,00
B	0,00	-828,81	-828,81
C	0,00	6428,85	6428,85
D	0,00	495,22	495,22
E	0,00	0,00	0,00
F	0,00	0,00	0,00
G	0,00	0,00	0,00
I	0,00	0,00	0,00
J	0,00	-53,68	-53,68
K	0,00	1960,84	1960,84
L	0,00	0,00	0,00
M	0,00	0,00	0,00
N	0,00	1490,22	1490,22
P	0,00	2462,05	2462,05
Q	0,00	-13268,58	-13268,58
R	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00
T	0,00	0,00	0,00
U	0,00	0,00	0,00
V	0,00	0,00	0,00
W	0,00	-166307,15	-166307,15
X	0,00	0,00	0,00
1D2	0,00	0,00	0,00
2D3	0,00	0,00	0,00
3D4	<b>-14,58</b>	-29,65	-44,24
3D5	<b>214,86</b>	559,95	774,81
4D1	0,00	0,00	0,00
4D7(CND)	<b>54,36</b>	147,75	202,11
Impacto por anomalias nos equipamentos			4360,80
Impacto devido à diferença na potência gerada			-41,94
Total calculado			4318,86
Obtido diretamente			4318,86

Como se pode observar, nos resultados do diagnóstico, o valor do impacto no consumo de combustível das anomalias intrínsecas é igual para os modelos termoeconômicos que foram escolhidos, o que indica que ao se usar a metodologia de diagnóstico dos Operadores Exergéticos, independentemente da estrutura produtiva escolhida ou se a exergia é desagregada ou não, as anomalias intrínsecas calculadas são as mesmas. Inclusive, as anomalias intrínsecas no condensador foram identificadas, independentemente se o Condensador é considerado um equipamento independente (Modelo E&S e Modelo H&S) ou um equipamento auxiliar da turbina a vapor (Modelo E). Agora, o valor das anomalias induzidas é diferente para cada modelo, assim como são diferentes os valores das disfunções. Isto indica que ao se aplicar a metodologia de diagnóstico usando os Operadores Exergéticos, o tipo de estrutura produtiva vai determinar o valor que vai se obter para as anomalias intrínsecas e disfunções. No entanto, estas duas componentes do impacto no consumo de combustível (Anomalias intrínsecas e disfunções) são variáveis que dependem das anomalias intrínsecas, como será mostrado na seção 5.3.

Na seção 5.3 apresentam-se algumas considerações sobre as anomalias, disfunções e impacto no consumo de combustível, necessárias para analisar os resultados obtidos.

### **5.3. Algumas considerações sobre o impacto no consumo de combustível**

O impacto no consumo de combustível tem três componentes: anomalia intrínseca, anomalia induzida e disfunção, como mostrado na Equação 5.1.

$$\Delta F_T = \sum MF_{int} + \sum MF_{ind} + \sum DF \quad (5.1)$$

As anomalias induzidas e as disfunções são dependentes das anomalias intrínsecas, já que ao eliminar as intrínsecas, tanto as anomalias induzidas como as disfunções desaparecem, isto é:

Se  $\sum MF_{int} = 0$  então:  $\sum MF_{ind} = 0$  e  $\sum DF = 0$ . Também  $\sum MF_{ind} = f1(MF_{int})$  e  $\sum DF = f2(MF_{int})$ , isto é, as anomalias induzidas e as disfunções são funções das anomalias intrínsecas.

Ou seja:

$$\Delta F_T = \sum MF_{int} + f1(MF_{int}) + f2(MF_{int}) \quad (5.2)$$

Ou

$$\Delta F_T = \sum MF_{int} + f(MF_{int}) \quad (5.3)$$

Onde  $f(MF_{int})$  representa a soma das anomalias induzidas e disfunções.

O primeiro termo da Equação (5.3) será chamado de Impacto no consumo de combustível intrínseco (Eq.(5.4)). O segundo termo da Equação (5.3) será chamado de Impacto no consumo de combustível induzido (Eq.(5.5)).

$$\Delta F_{int} = \sum MF_{int} \quad (5.4)$$

$$\Delta F_{ind} = f(MF_{int}) = \sum MF_{ind} + \sum DF \quad (5.5)$$

A Equação (5.4) e Equação (5.5) serão usadas para fazer uma comparativa dos resultados obtidos ao se aplicar a metodologia dos operadores exeréticos com cada um dos modelos termoeconômicos.

Na Tabela 5.14 são apresentados os valores de anomalias intrínsecas, anomalias induzidas e disfunções para cada um dos três modelos termoeconômicos dos casos 1 e 2. Observa-se que o valor do impacto causado pelas anomalias intrínsecas é o mesmo para os três modelos, em cada caso: 54,39 kW no caso 1 e 254,64 kW no caso 2. Isto é chamado de impacto intrínseco (Eq. 5.4).

Tabela 5. 14. Comparativa dos resultados do diagnóstico para os Modelos termoeconômicos E, E&S e H&S.

Modelo	Caso 1					Caso 2				
	Impacto Intrínseco	Impacto Induzido			Impacto	Impacto Intrínseco	Impacto Induzido			Impacto
		MF <sub>int</sub>	MF <sub>ind</sub>	DF			Total	MF <sub>int</sub>	MF <sub>ind</sub>	
E <sub>total</sub>	54,39	606,77	3022,60	3629,37	3683,75	254,64	543,87	3562,29	4106,16	4360,80
E&S	54,39	-964,77	4594,14	3629,37	3683,75	254,64	-980,13	5086,29	4106,16	4360,80
H&S	54,39	1300,68	2328,69	3629,37	3683,75	254,64	1278,87	2827,29	4106,16	4360,80

Se forem somados os valores das anomalias induzidas com os valores de disfunção, obtém-se o que é chamado de Impacto induzido (Eq. 5.5). Como observado na Tabela 5.14, o valor do impacto induzido também é igual para os três modelos Termoeconômicos. Assim, com a

aplicação da metodologia dos operadores exergeticos identificam-se os equipamentos com anomalias intrínsecas e obtêm-se os mesmos valores de impacto no consumo de combustível intrínseco e impacto no consumo de combustível induzido, independentemente do modelo termoeconômico usado e, conseqüentemente, do tipo de estrutura produtiva elaborada. A importância que traz esta implicação abre um novo campo de pesquisa: encontrar a função que relaciona a anomalia intrínseca de cada equipamento com seu impacto induzido sobre o consumo de combustível.

### 5.3.1. O impacto dos resíduos no consumo de combustível

Se a Equação (2.23) for escrita na forma vetorial e em termos de anomalias e disfunções, obtêm-se a expressão mostrada na Equação (5.6).

$$\Delta \mathbf{F}_T = \mathbf{MF} + \mathbf{DF} + {}^t\mathbf{k}_P^* \Delta \mathbf{P}_S \quad (5.6)$$

onde, como já foi falado no Capítulo 2 e Capítulo 5 o último termo da Equação (5.6) representa o impacto no consumo de combustível causado pela variação do produto do sistema, entre a condição real e a condição de referência. Mas este último termo da expressão pode ser modificado para obter o impacto dos resíduos sobre o consumo de combustível, quando se usa o modelo termoeconômico de exergia total. Num contexto mais amplo o vetor  $\Delta \mathbf{P}_S$  pode ser um vetor que inclua, além dos produtos do sistema, também o subprodutos e os resíduos e o vetor  ${}^t\mathbf{k}_P^*$  poderia incluir também os custos exergeticos desses subprodutos ou resíduos. Assim, se propõe modificar a Equação (5.6), obtendo-se a Equação (5.7), que será usada no Capítulo 6 para calcular o impacto no consumo de combustível causado pelos resíduos.

$$\Delta \mathbf{F}_T = \mathbf{MF} + \mathbf{DF} + {}^t\mathbf{k}_P^* \Delta \mathbf{P}_S + {}^t\mathbf{k}_R^* \Delta \mathbf{R}_S \quad (5.7)$$

onde  ${}^t\mathbf{k}_R^*$  é o custo exergetico dos resíduos ou subprodutos e  $\Delta \mathbf{R}_S$  é a variação dos resíduos entre a condição real e a condição de referência.

Para o ciclo EFGT apresentado no Capítulo 4 foi aplicada a metodologia de diagnóstico proposta, agora sim, tendo em conta ao operador exergetico 4D6, assim como também o impacto no consumo adicional de combustível causado pela variação dos resíduos. Os resultados do diagnóstico para os mesmos 15 casos descritos na Seção 4.3 são apresentados na

Tabela 5.15. Deforma similar que no capítulo 4, o método permite identificar os equipamentos com anomalias intrínsecas (coluna “int.” na Tabela 5.15). Também se pode observar na última coluna da Tabela 5.15 que o impacto no consumo adicional de combustível tem valores menores quando as anomalias intrínsecas só acontecem no queimador y/ou no trocador. Isto é, as anomalias intrínsecas no compressor e turbina tem maior influencia na variação dos resíduos que as anomalias intrínsecas no queimador e trocador de calor.

Tabela 5. 15. Resultado do diagnóstico por operadores exergéticos para um ciclo EFGT, tendo em conta os resíduos.

Caso	Compressor			Turbina			Queimador			Trocador de Calor			Impacto no combustível por		
	Int.	Ind.	Disf.	Int.	Ind.	Disf.	Int.	Ind.	Disf.	Int.	Ind.	Disf.	Equip.	Var. potência	Resíduos
1	<b>5,14</b>	-0,16	4,23	0,01	-0,60	-0,62	0,06	-3,72	0,26	0,00	-0,89	-1,17	3,00	0,63	18,77
2	0,01	-0,25	-0,29	<b>14,14</b>	-9,85	5,58	0,00	-7,24	6,09	0,00	0,01	-5,55	3,07	0,37	15,57
3	0,05	-0,02	0,02	0,05	-0,05	0,01	<b>15,48</b>	-0,63	5,82	0,00	-0,01	0,83	22,16	0,66	4,90
4	-0,06	-0,01	-0,06	-0,01	0,05	0,04	0,00	-0,11	-0,78	<b>0,62</b>	-0,03	0,82	0,56	0,20	3,57
5	<b>5,02</b>	-0,40	3,89	<b>14,24</b>	-10,65	4,86	0,00	-10,49	6,56	0,00	-0,78	-7,26	5,87	0,94	35,43
6	<b>5,11</b>	-0,20	4,66	-0,05	-0,49	-0,64	<b>15,41</b>	-4,13	5,71	0,00	-0,80	-0,06	25,68	0,60	24,70
7	<b>5,12</b>	-0,17	4,29	0,01	-0,59	-0,63	0,01	-3,82	-0,58	<b>0,82</b>	-1,02	-0,30	3,71	0,81	22,39
8	0,00	-0,29	-0,39	<b>14,19</b>	-9,85	6,18	<b>15,08</b>	-8,00	12,42	0,00	0,05	-4,96	25,51	0,93	21,65
9	0,06	-0,25	-0,25	<b>14,20</b>	-9,94	5,64	0,03	-7,35	5,47	<b>0,56</b>	0,09	-4,86	3,90	0,37	19,23
10	0,06	-0,03	0,01	0,00	0,07	0,07	<b>15,53</b>	-0,73	4,88	<b>0,63</b>	-0,01	1,84	23,04	0,50	8,72
11	<b>5,03</b>	-0,47	4,28	<b>14,24</b>	-10,56	5,46	<b>15,04</b>	-11,30	12,60	0,00	-0,75	-6,61	28,64	1,37	43,94
12	<b>5,03</b>	-0,43	3,95	<b>14,19</b>	-10,54	5,02	0,00	-10,68	5,87	<b>0,77</b>	-0,83	-6,44	6,95	0,86	39,69
13	<b>5,06</b>	-0,22	4,67	-0,01	-0,52	-0,64	<b>15,48</b>	-4,32	4,75	<b>0,87</b>	-1,00	0,79	26,17	1,47	28,88
14	0,01	-0,30	-0,40	<b>14,20</b>	-9,85	6,31	<b>15,12</b>	-8,09	11,61	<b>0,63</b>	0,10	-4,10	26,43	0,96	25,62
15	<b>5,04</b>	-0,48	4,37	<b>14,23</b>	-10,50	5,63	<b>15,12</b>	-11,25	11,78	<b>0,89</b>	-0,95	-5,58	30,13	0,35	47,62

Como será visto no Capítulo 6, ao somar o impacto devido aos equipamentos com o impacto devido à variação da potência gerada e o impacto gerado pelos resíduos obtém-se o mesmo valor que aquele obtida de forma direta.

## CAPÍTULO VI

### **6. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DOS OPERADORES EXERGÉTICOS DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO A UM CICLO COMBINADO**

Neste capítulo a metodologia desenvolvida nesta tese será aplicada ao diagnóstico termoeconômico de um ciclo combinado de potência. Como caso de estudo foi escolhido o ciclo combinado apresentado inicialmente em Valero et al. (2004b), e que se conhece como o problema TADEUS. A escolha deste ciclo combinado é feita com a finalidade de poder comparar os resultados do diagnóstico termoeconômico usando operadores exergéticos com as outras metodologias num mesmo ciclo de referência.

#### **6.1. Descrição do ciclo combinado do problema TADEUS**

O ciclo combinado do problema TADEUS está composto por duas turbinas a gás (125 MW cada), uma turbina a vapor (110 MW) e duas caldeiras de recuperação com dois níveis de pressão.

Na Figura 6.1 é apresentado o esquema do ciclo combinado em estudo e na Tabela 6.1, Tabela 6.2 e Tabela 6.3 são apresentados os dados de operação na condição de referência.

Um modelo termodinâmico do ciclo combinado foi elaborado usando o software comercial GateCycle™, como o objetivo de obter aqueles dados que não aparecem nas Tabelas 6.1 a 6.3, assim como também para obter os dados de fluxo mássico, pressão, temperatura, etc., para calcular os fluxos de exergia  $E_i''$ , necessários para a aplicação da metodologia proposta.

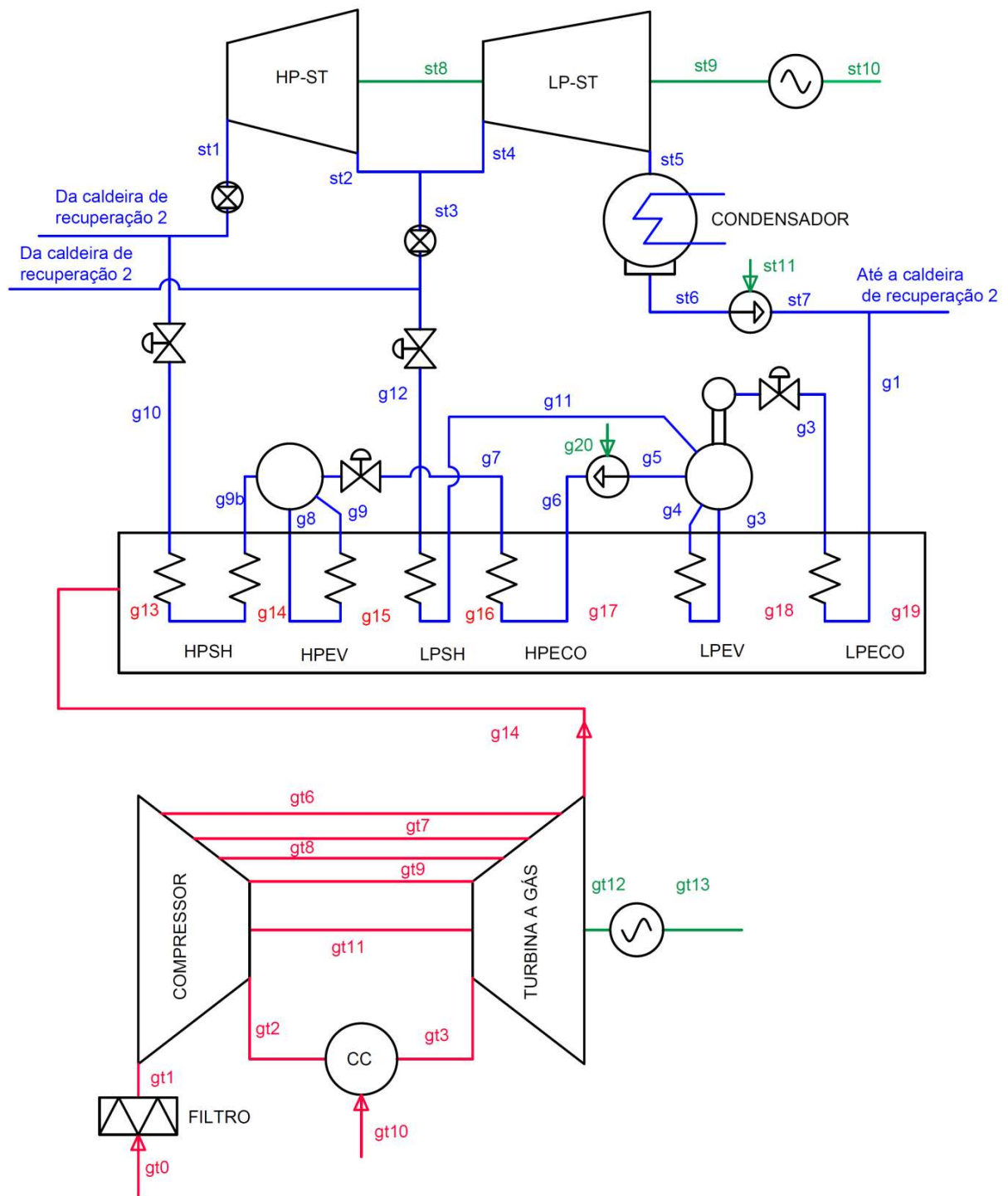


Figura 6.1. Ciclo combinado do problema TADEUS. Adaptado de Lazzaretto et al.(2006)

A Tabela 6.1 apresenta os dados de fluxo mássico, pressões, temperaturas e potência para as duas turbinas a gás do ciclo combinado na condição de referência. Por sua vez, a Tabela 6.2 apresenta os dados para cada fluxo das duas caldeiras de recuperação do sistema, na condição de referência. No Apêndice H apresenta-se a nomenclatura e os fluxos de exergia para o diagnóstico termoeconômico do ciclo combinado TADEUS.

Tabela 6. 1. Dados de operação para as turbinas a gás 1 e 2 na condição de referência. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Turbinas a gás 1 e 2</b>	<b>m(kg/s)</b>	<b>T(°C)</b>	<b>p(bar)</b>	<b>E (kW)</b>
gt0 - Ambiente	425,9	15	0,987	
gt1 - Entrada no compressor	425,9	15	0,9781	
gt2 - Saída do compressor	372,4	385,4	13,04	
gt3 - Entrada na turbina	380,5	1152	12,91	
gt4 - Saída da turbina	422,2	509,8	1,007	
gt5 - Saída da caldeira de recuperação (HRSG)	422,2	117,2	0,987	
gt6 - Resfriamento do estágio 4° da turbina	1,727	103,1	2,216	
gt7 - Resfriamento do estágio 3° da turbina	6,573	195,4	4,382	
gt8 - Resfriamento do estágio 2° da turbina	16,03	260,2	6,596	
gt9 - Resfriamento do rotor	17,4	385,4	13,04	
gt10 - Combustível	8,043			365477
gt11 - Potência mecânica do compressor				159141
gt12 - Potência mecânica da turbina				129222
gt13 - Potência elétrica				126630

Tabela 6. 2. Dados de operação para as caldeiras de recuperação 1 e 2 na condição de referência. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Caldeiras de recuperação 1 e 2</b>	<b>m(kg/s)</b>	<b>T(°C)</b>	<b>p(bar)</b>
g1 – Entrada no economizador de baixa pressão	58,8	53,28	7,779
g2 – Saída do economizador de baixa pressão	58,8	161,2	6,535
g3 – Entrada no evaporador de baixa pressão	235,2	161,2	6,535
g4 – Saída do evaporador de baixa pressão	235,2	161,2	6,535
g5 – Entrada na bomba de circulação	49,58	161,2	6,535
g6 – Entrada no economizador de alta pressão	49,58	163,1	63,94
g7 – Saída do economizador de alta pressão	49,58	267,5	53,71
g8 – Entrada no evaporador de alta pressão	198,3	268,5	53,71
g9 – Saída do evaporador de alta pressão	198,3	268,5	53,71
g9b – Entrada no superaquecedor de alta pressão	49,58	268,5	53,71
g10 – Saída do superaquecedor de alta pressão	49,58	484,9	52,1
g11 – Saída do superaquecedor de baixa pressão	9,223	162,2	6,536
g12 – Entrada no superaquecedor de baixa pressão	9,223	260,5	6,338
g13 -. Entrada dos gases no superaquecedor de alta pressão	422,2	509,8	1,007
g14 - Entrada dos gases no evaporador de alta pressão	422,2	447,6	1,005
g15 - Entrada dos gases no superaquecedor de baixa pressão	422,2	276,5	1
g16 - Entrada dos gases no economizador de alta pressão	422,2	272,1	0,999
g17 - Entrada dos gases no evaporador de baixa pressão	422,2	220,1	0,996
g18 - Entrada dos gases no economizador de baixa pressão	422,2	177,2	0,991
g19 – Saída dos gases da caldeira de recuperação	422,2	117,2	0,987

A Tabela 6.3 mostra os valores para os fluxos mássicos, pressões, temperaturas e potência da turbina a vapor para o ciclo combinado do problema TADEUS na condição de referência.

Tabela 6. 3. Dados de operação para a turbina a vapor na condição de referência. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Turbina a vapor</b>	m(kg/s)	T(°C)	p(bar)	E (kW)
st1 – Entrada na turbina de alta pressão	99,15	484,9	52,1	
st2 – Saída da turbina de alta pressão	99,15	191,8	4149	
st3 – Vapor de baixa pressão	18,45	257	4149	
st4 – Entrada na turbina de baixa pressão	117,6	201,9	4149	
st5 – Saída da turbina de baixa pressão	117,6	53,22	0,1448	
st6 – Saída do condensador	117,6	53,22	0,1448	
st7 - Saída da bomba de extração	117,6	53,28	7,779	
st8 – Potência mecânica da turbina de alta pressão				53490
st9 – Potência mecânica total da turbina				103782
st10 – Potência elétrica da turbina a vapor				100733
st11 – Potência elétrica da bomba de extração				109,11

Para a condição real (com anomalias) foram consideradas as seguintes anomalias na turbina a gás 1 e na caldeira de recuperação 1: (i) Saturação no filtro de ar do compressor 1, representado por um aumento de 25% na queda de pressão; (ii) Degradação da turbina a gás 1, representada por um aumento de 2,5% no coeficiente de fluxo e uma diminuição de 1% na eficiência politrópica da turbina a gás 1 e (iii) Bloqueio parcial no superaquecedor de alta pressão da caldeira de recuperação 1, representado por um aumento de 10% na temperatura de aproximação. Os dados de operação na condição real (com anomalias) são apresentados nas Tabela 6.4, Tabela 6.5, Tabela 6.6 , Tabela 6.7 e Tabela 6.8. Na Tabela 6.4 apresentam-se os dados dos fluxos da turbina a gás 1 para a condição real. Estas anomalias são as mesmas que foram propostas em Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006).

Tabela 6. 4. Dados de operação para a turbina a gás 1 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Turbina a gás 1</b>	m(kg/s)	T(°C)	p(bar)	E (kW)
gt0 - Ambiente	434,5	15	0,987	
gt1 - Entrada no compressor	434,5	15	0,9759	
gt2 - Saída do compressor	380	386,7	12,94	
gt3 - Entrada na turbina	388,1	1145	12,81	
gt4 - Saída da turbina	430,7	511,5	1,007	
gt5 - Saída da caldeira de recuperação (HRSG)	430,7	117,3	0,987	
gt6 - Resfriamento do estágio 4° da turbina	1,763	103,3	2,207	
gt7 - Resfriamento do estágio 3° da turbina	6,707	195,9	4,358	
gt8 - Resfriamento do estágio 2° da turbina	16,35	261	6,555	
gt9 - Resfriamento do rotor	17,75	386,7	12,94	
gt10 - Combustível				368618
gt11 - Potência mecânica do compressor				163036
gt12 - Potência mecânica da turbina				126885
gt13 - Potência elétrica				124348

Na Tabela 6.5 se mostram os dados para a turbina a gás 2, na condição real.

Tabela 6. 5. Dados de operação para a turbina a gás 2 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Turbina a gás 2</b>	m(kg/s)	T(°C)	p(bar)	E (kW)
gt0 - Ambiente	432,4	15	0,987	
gt1 - Entrada no compressor	432,4	15	0,9781	
gt2 - Saída do compressor	378,1	349,6	13,23	
gt3 - Entrada na turbina	386,2	1151	13,1	
gt4 - Saída da turbina	428,6	506,6	1,007	
gt5 - Saída da caldeira de recuperação (HRSG)	428,6	118	0,987	
gt6 - Resfriamento do estagio 4° da turbina	17,54	103,9	2,227	
gt7 - Resfriamento do estagio 3° da turbina	6,674	197,2	4,419	
gt8 - Resfriamento do estagio 2° da turbina	16,27	262,8	6,668	
gt9 - Resfriamento do rotor	17,67	398,6	13,23	
gt10 - Combustível				368753
gt11 - Potência mecânica do compressor				163565
gt12 - Potência mecânica da turbina				129214
gt13 - Potência elétrica				127715

A Tabela 6.6 apresenta os valores para os fluxos mássicos, temperatura e pressões dos fluxos da caldeira de recuperação 1, na condição real.

Tabela 6. 6. Dados de operação para a caldeira de recuperação 1 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Caldeira de recuperação 1</b>	m(kg/s)	T(°C)	p(bar)
g1 – Entrada no economizador de baixa pressão	62,26	53,68	7,867
g2 – Saída do economizador de baixa pressão	62,26	161,7	6,608
g3 – Entrada no evaporador de baixa pressão	241	162,7	6,608
g4 – Saída do evaporador de baixa pressão	241	162,7	6,608
g5 – Entrada na bomba de circulação	50,9	162,7	6,608
g6 – Entrada no economizador de alta pressão	50,9	163,7	64,77
g7 – Saída do economizador de alta pressão	50,9	268,3	54,4
g8 – Entrada no evaporador de alta pressão	203,6	269,3	54,4
g9 – Saída do evaporador de alta pressão	203,6	269,3	54,4
g9b – Entrada no superaquecedor de alta pressão	50,9	269,3	54,4
g10 – Saída do superaquecedor de alta pressão	50,9	484,2	52,77
g11 – Saída do superaquecedor de baixa pressão	9,366	162,7	6,608
g12 – Entrada no superaquecedor de baixa pressão	9,366	261,3	6,41
g13 - . Entrada dos gases no superaquecedor de alta pressão	430,7	511,5	1,007
g14 - Entrada dos gases no evaporador de alta pressão	430,7	449	1,005
g15 - Entrada dos gases no superaquecedor de baixa pressão	430,7	277,3	1
g16 - Entrada dos gases no economizador de alta pressão	430,7	272,9	0,999
g17 - Entrada dos gases no evaporador de baixa pressão	430,7	220,3	0,996
g18 - Entrada dos gases no economizador de baixa pressão	430,7	177,7	0,991
g19 – Saída dos gases da caldeira de recuperação	430,7	117,3	0,987

A Tabela 6.7 mostra os dados dos fluxos, na condição real, para a caldeira de recuperação 2.

Por sua vez, a Tabela 6.8 mostra informações dos fluxos da turbina a vapor, para a condição real.

Tabela 6. 7. Dados de operação para a caldeira de recuperação 2 na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Caldeira de recuperação 2</b>	m(kg/s)	T(°C)	p(bar)
g1 – Entrada no economizador de baixa pressão	59,26	54	8
g2 – Saída do economizador de baixa pressão	59,26	161,7	7
g3 – Entrada no evaporador de baixa pressão	237	162,7	7
g4 – Saída do evaporador de baixa pressão	237	162,7	7
g5 – Entrada na bomba de circulação	49,74	162,7	7
g6 – Entrada no economizador de alta pressão	49,74	163,6	65
g7 – Saída do economizador de alta pressão	49,74	268,3	544
g8 – Entrada no evaporador de alta pressão	199	269,3	544
g9 – Saída do evaporador de alta pressão	199	269,3	544
g9b – Entrada no superaquecedor de alta pressão	49,74	269,3	544
g10 – Saída do superaquecedor de alta pressão	49,74	481,4	53
g11 – Saída do superaquecedor de baixa pressão	9,518	162,7	7
g12 – Entrada no superaquecedor de baixa pressão	9,518	261,3	6
g13 - . Entrada dos gases no superaquecedor de alta pressão	428,6	506,6	1
g14 - Entrada dos gases no evaporador de alta pressão	428,6	445,9	1
g15 - Entrada dos gases no superaquecedor de baixa pressão	428,6	277,3	1
g16 - Entrada dos gases no economizador de alta pressão	428,6	272,9	0,999
g17 - Entrada dos gases no evaporador de baixa pressão	428,6	221,2	0,996
g18 - Entrada dos gases no economizador de baixa pressão	428,6	177,7	0,991
g19 – Saída dos gases da caldeira de recuperação	428,6	118	0,987

Tabela 6. 8. Dados de operação para a turbina a vapor na condição real. Obtidos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al.(2006)

<b>Turbina a vapor</b>	m(kg/s)	T(°C)	p(bar)	E (kW)
st1 – Entrada na turbine de alta pressão	100,6	482,8	52,77	
st2 – Saída da turbine de alta pressão	100,6	190,4	4,211	
st3 – Vapor de baixa pressão	18,88	257,8	4,211	
st4 – Entrada na turbina de baixa pressão	119,5	200,9	4,211	
st5 – Saída da turbine de baixa pressão	119,5	53,62	0,1476	
st6 – Saída do condensador	119,5	53,62	0,1476	
st7 -. Saída da bomba de extração	119,5	53,68	7,867	
st8 – Potência mecânica da turbine de alta pressão				54043
st9 – Potência mecânica total da turbina				105047
st10 – Potência elétrica da turbine a vapor				101938
st11 – Potência elétrica da bomba de extração				112,14

O modelo do ciclo combinado em estudo foi simulado usando para sua elaboração o software Gatecycle™ (GATE CYCLE, 2003) e os dados técnicos apresentados em Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al. (2006). Na Figura 6.2 apresenta-se o sistema simulado em GateCycle™.

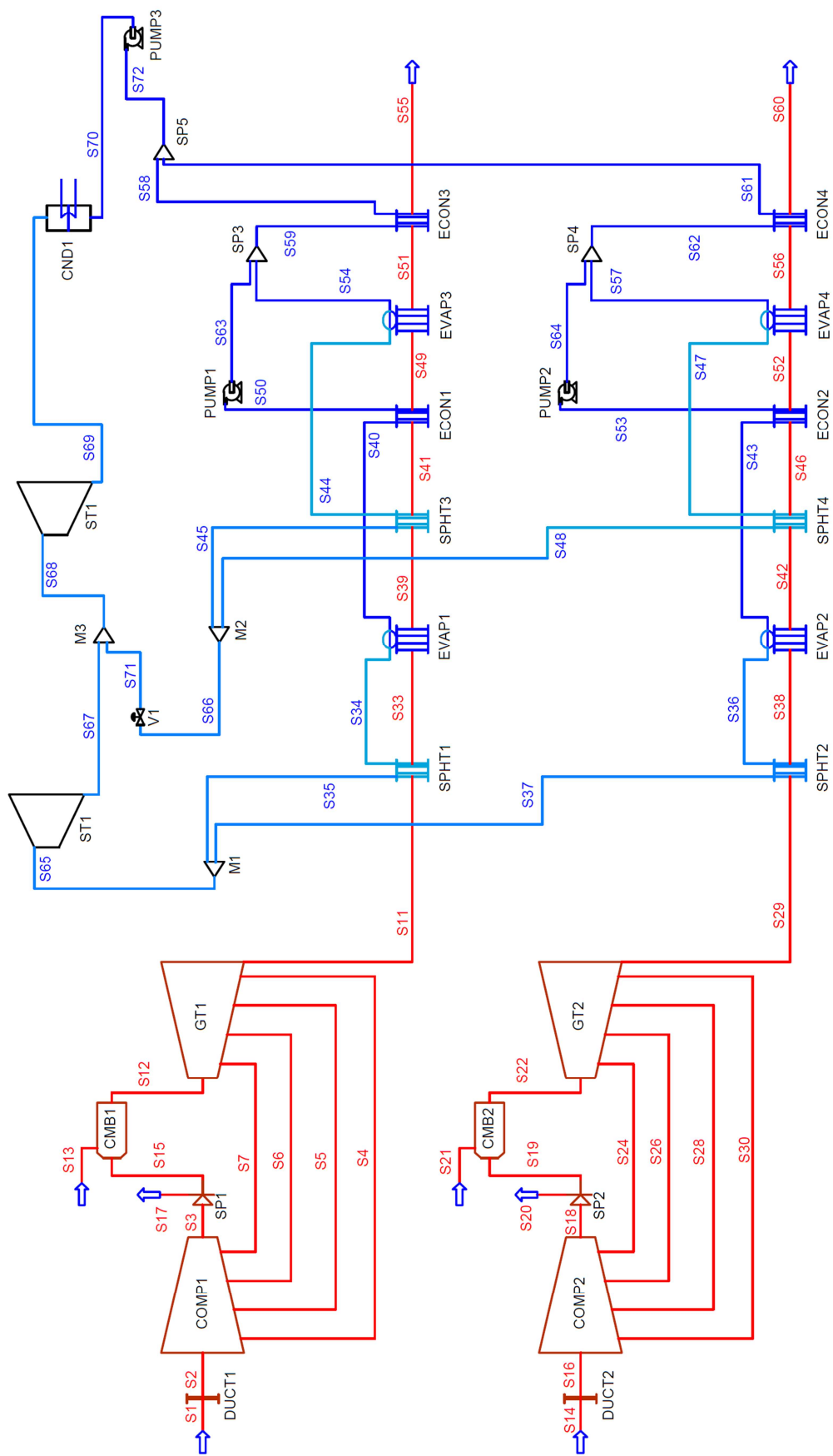


Figura 6.2. Esquema do ciclo combinado do problema TADEUS simulado no GateCycle.

Na Figura 6.3 é mostrada a estrutura de transição para a turbina a gás 1 do ciclo combinado e na Figura de 6.4 a estrutura de transição da turbina a gás 2.

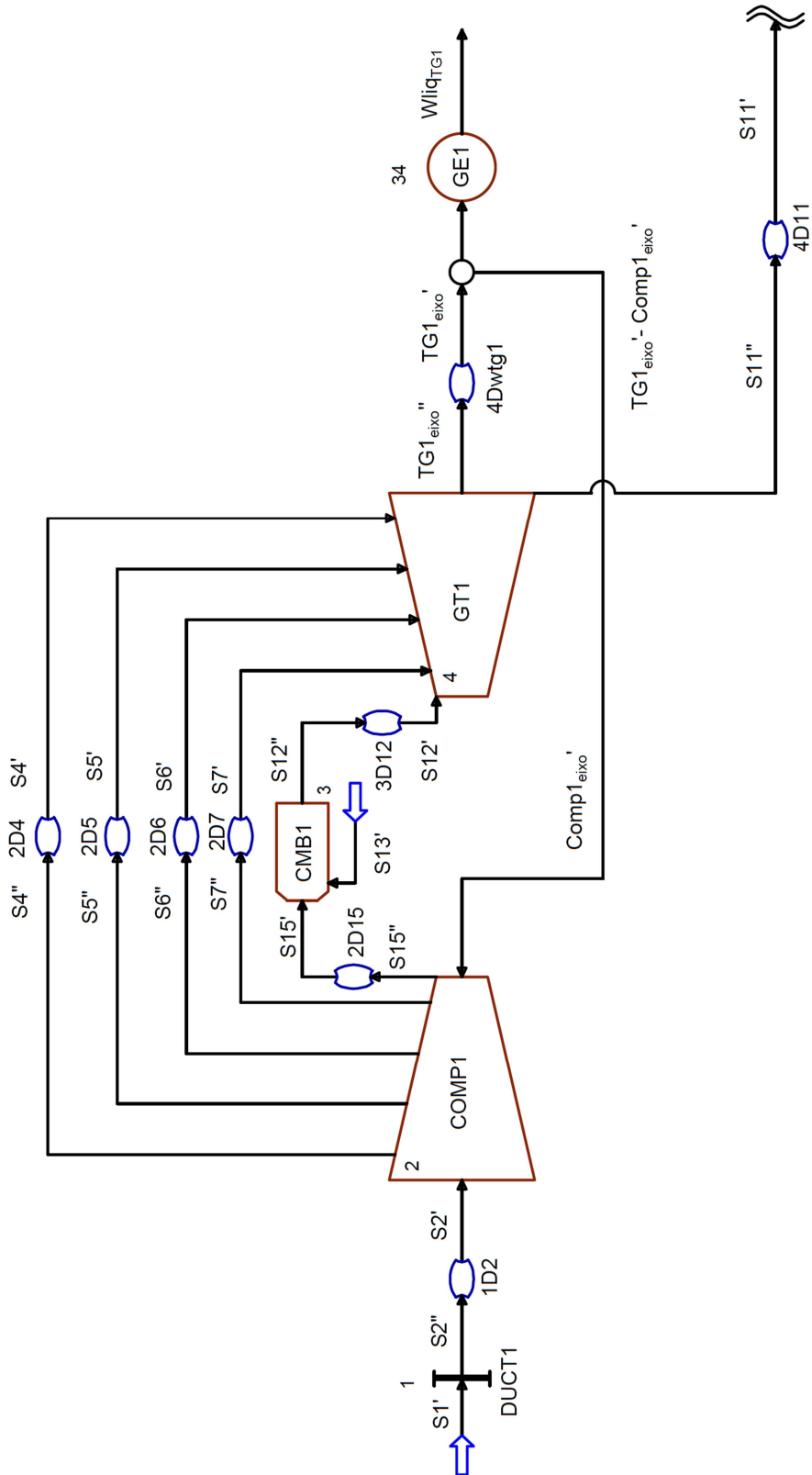


Figura 6.3. Estrutura de Transição para a turbina a gás 1 (TADEUS).

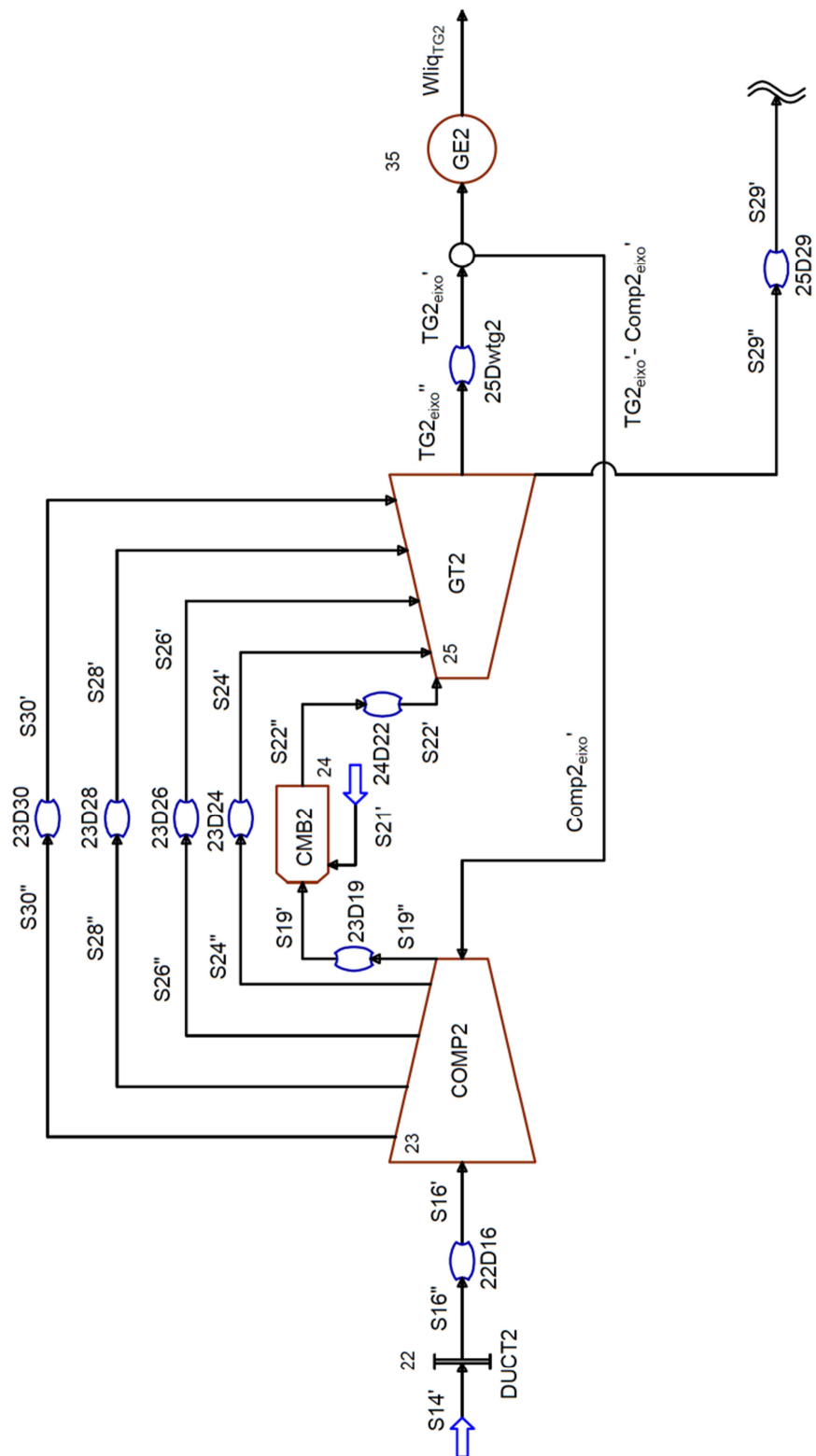


Figura 6.4. Estrutura de Transição para a turbina a gás 2 (TADEUS).

Na Figura 6.5 é apresentada a estrutura de transição para o conjunto turbina a vapor e caldeira de recuperação 1. Na Figura 6.6 apresenta-se a estrutura de transição da caldeira de recuperação 2.

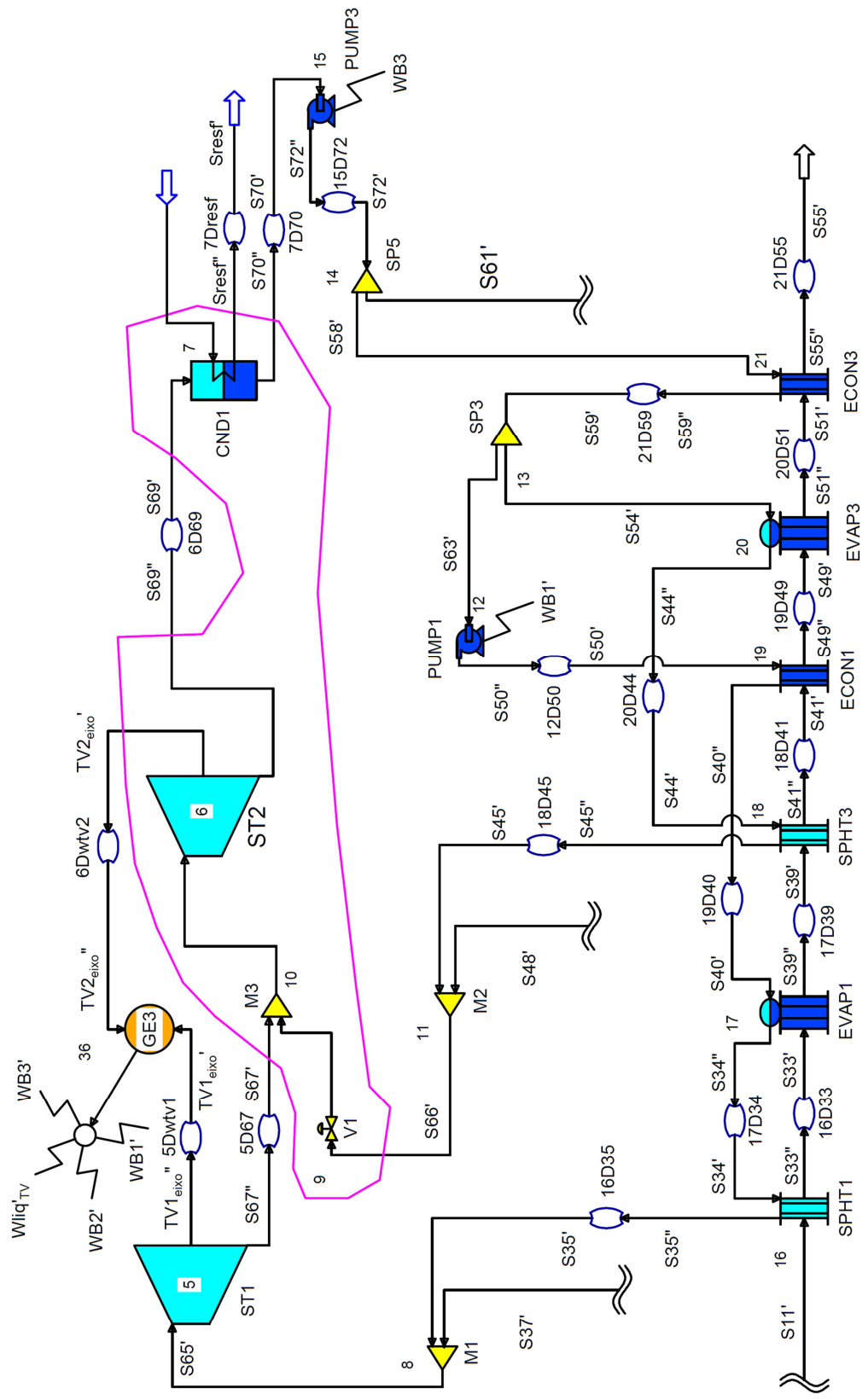


Figura 6.5. Estrutura de Transição para a turbina a vapor e caldeira de recuperação 1 (TADEUS).

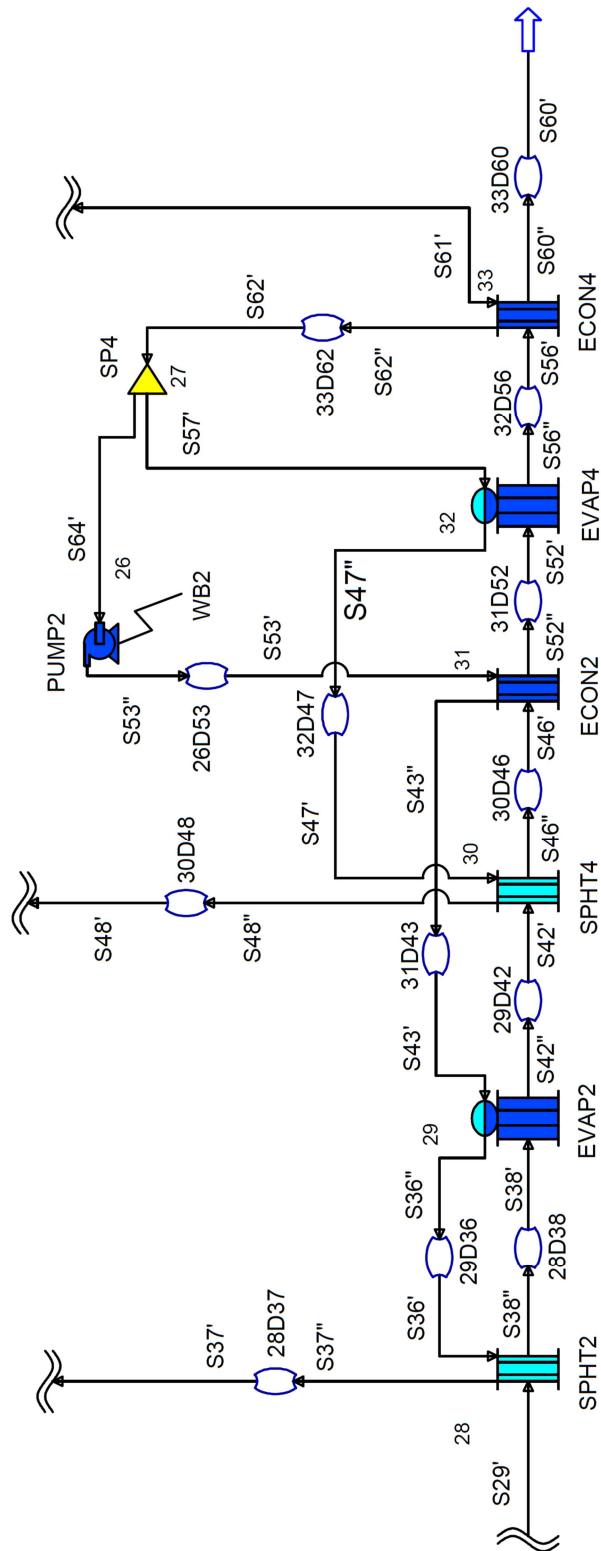


Figura 6.6. Estrutura de Transição para caldeira de recuperação 2 (TADEUS).

Nas figuras 6.7 a 6.11 apresentam-se as estruturas produtivas para a turbina a gás 1 (Fig. 6.7), turbina a gás 2 (Fig. 6.8), turbina a vapor (Fig.6.9), caldeira de recuperação 1 (Fig. 6.10) e caldeira de recuperação 2 (Fig. 6.11).

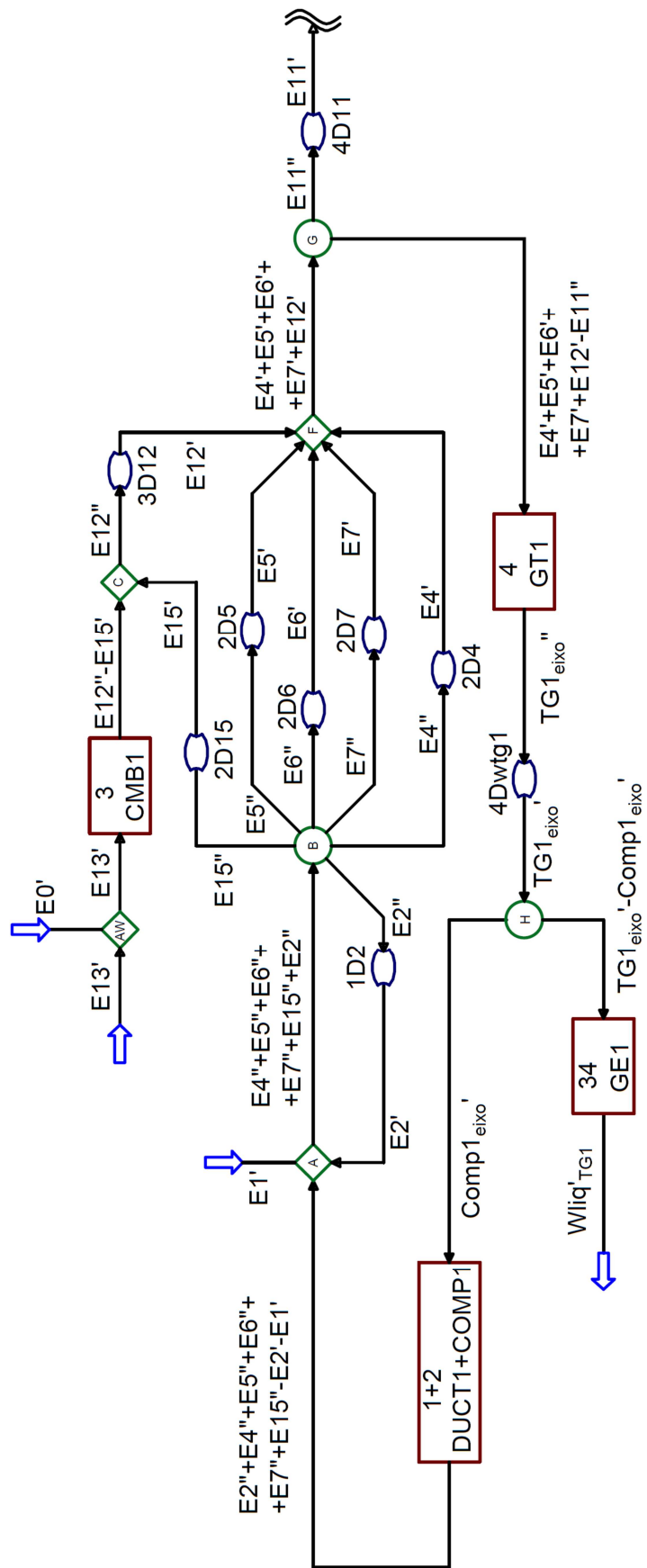


Figura 6.7. Estrutura produtiva da Turbina a Gás 1

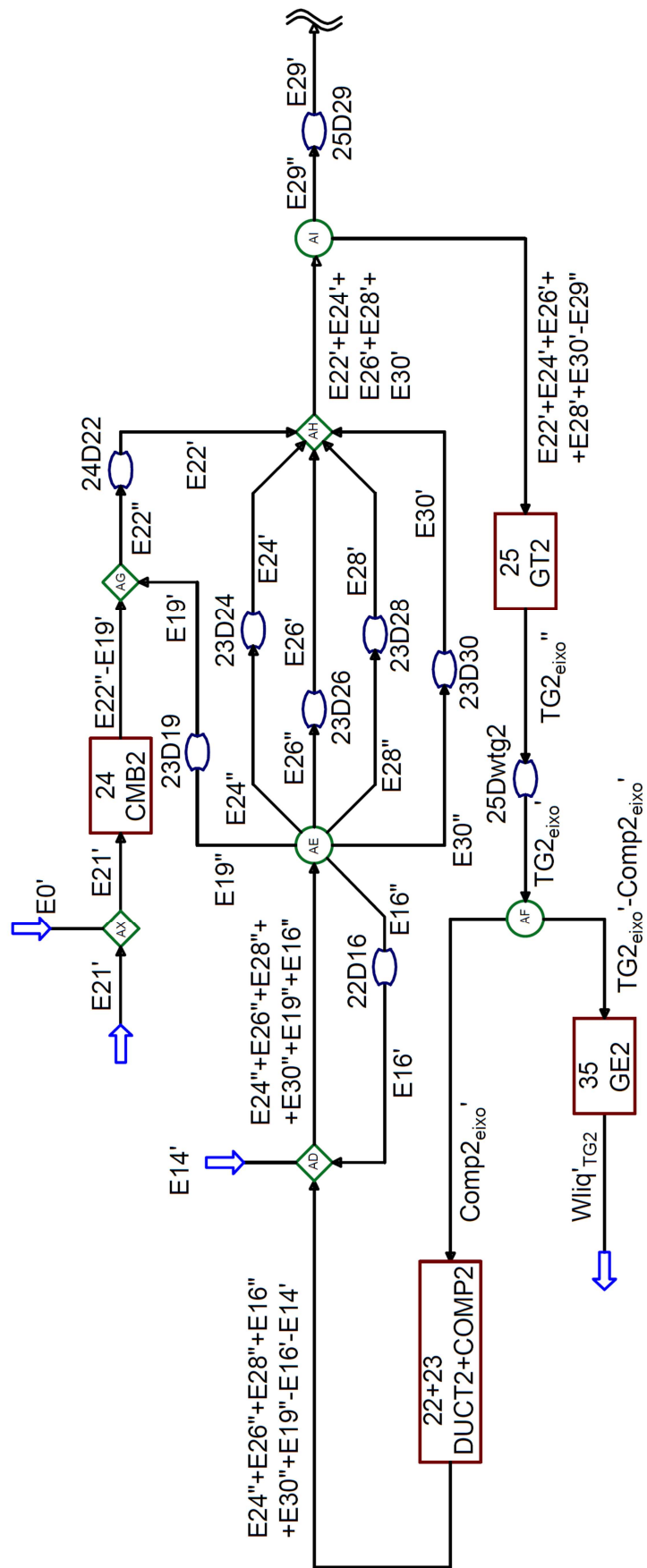


Figura 6.8. Estrutura de produção da Turbina a Gás 2

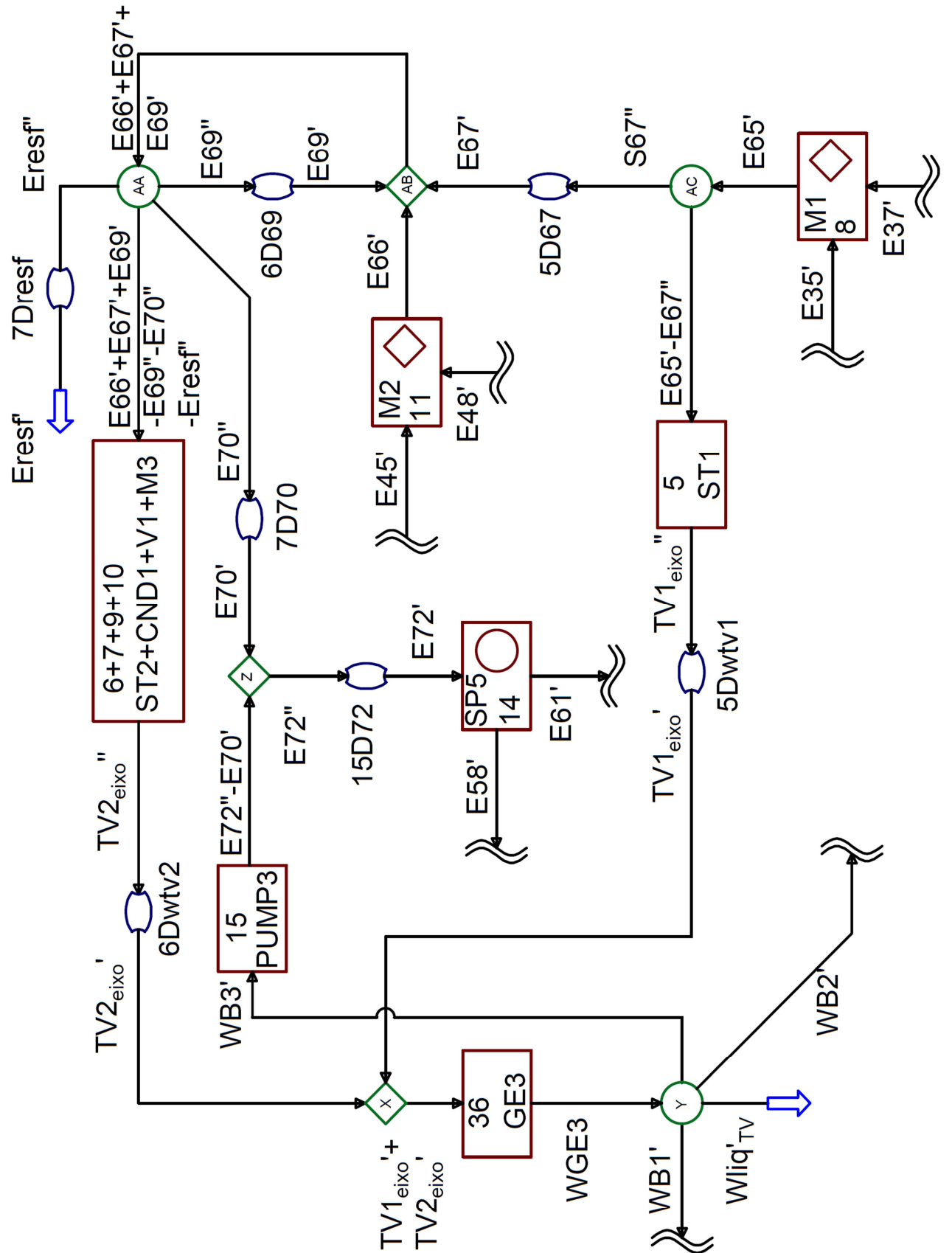


Figura 6.9. Estrutura produtiva da Turbina a vapor

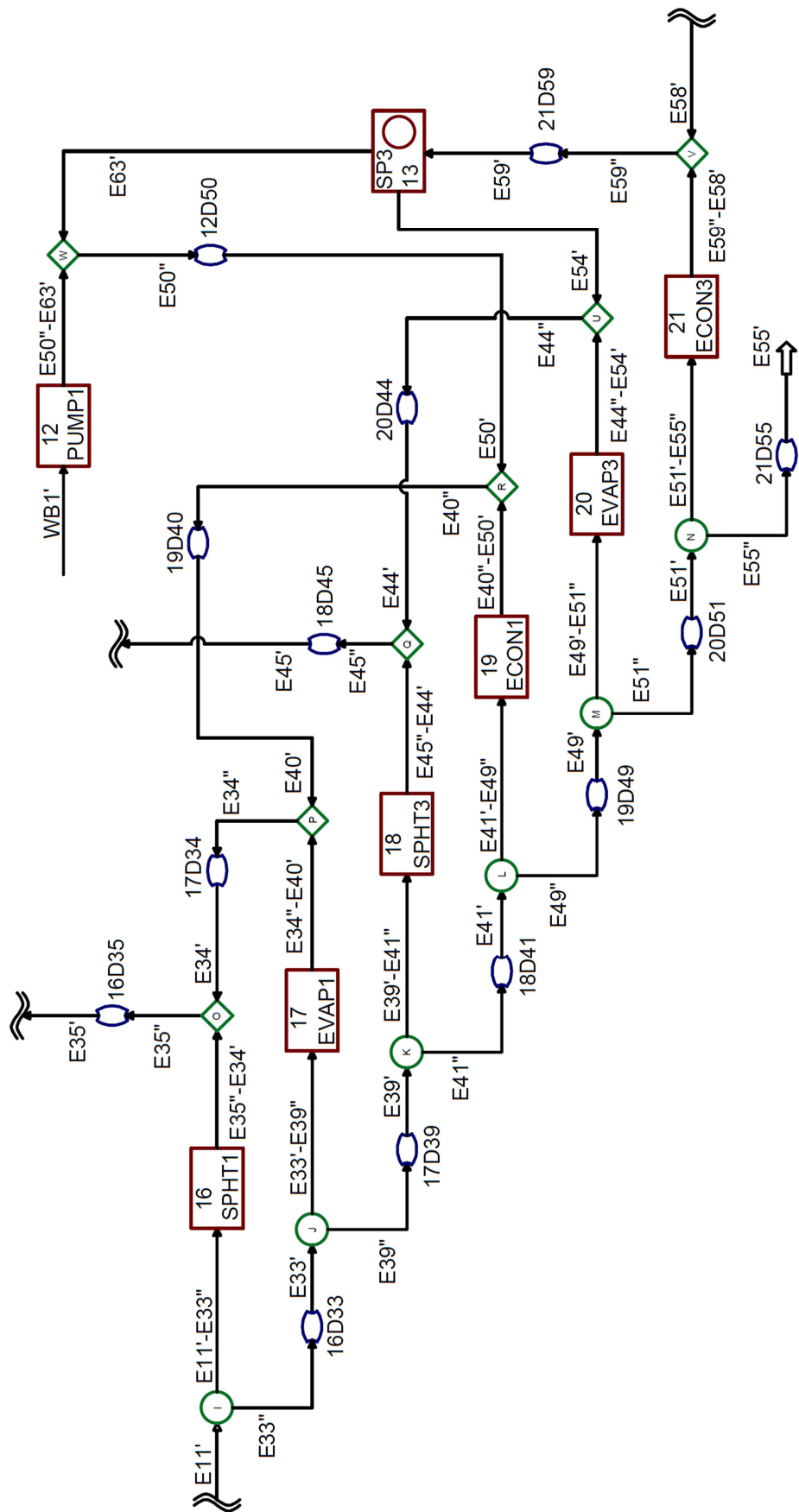


Figura 6.10. Estrutura produtiva da HSRG1

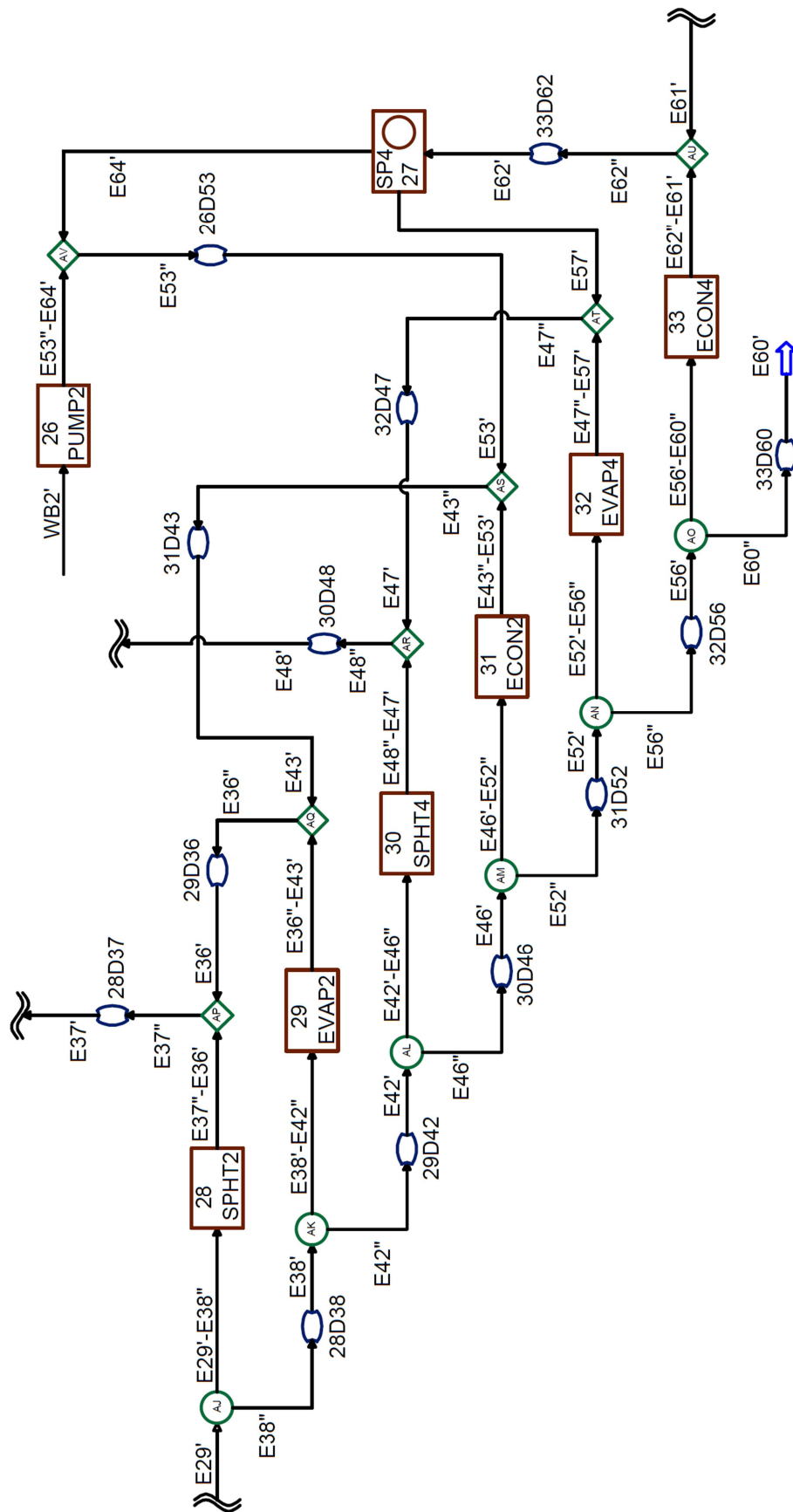


Figura 6.11. Estrutura produtiva da HSRG2

A exergia dos fluxos que aparecem no modelo em GateCycle (Figura 6.2), na estrutura de transição (Figura 6.3) e na estrutura produtiva mostrada nas Figuras 6.4 até 6.8 é apresentada na Tabela 6.9.

Tabela 6. 9. Exergia dos fluxos da estrutura produtiva do ciclo combinado do problema TADEUS

Fluxos	Referência E [kW]	Real E' [kW]	Esperado E" [kW]
S1	0,000	0,000	0,000
S2	-319,592	-407,839	-326,008
S4	135,365	137,652	137,652
S5	1081,613	1102,302	1102,302
S6	3638,168	3710,906	3710,906
S7	6128,372	6257,885	6257,885
S11	97406,511	99886,049	98502,148
S12	390195,492	395009,994	395009,994
S13	365486,255	368618,039	368618,039
S14	0,000	0,000	0,000
S15	131213,048	134019,185	134019,185
S16	-319,592	-324,448	-324,448
S19	131217,154	134716,321	134716,321
S21	365468,706	368753,625	368753,625
S22	390186,660	396294,633	396294,633
S24	6128,559	6291,147	6291,147
S26	3638,242	3729,601	3729,601
S28	1081,629	1107,851	1107,851
S29	97401,295	97987,504	97987,504
S30	135,366	138,453	138,453
S33	78756,602	80771,035	80593,675
S34	53571,175	55049,777	55049,777
S35	69767,475	71629,771	71813,588
S36	53571,175	53795,205	53795,205
S37	69767,475	69794,284	69794,284
S38	78751,545	79563,962	79563,962
S39	34732,571	35535,331	35535,331
S40	16021,662	16450,152	16450,152
S41	33733,515	34522,760	34522,760
S42	34728,301	35423,753	35423,753
S43	16021,662	16075,257	16075,257
S44	7581,992	7714,154	7714,154
S45	8355,618	8497,932	8497,932
S46	33729,277	34395,146	34395,146
S47	7581,992	7839,345	7839,345
S48	8355,618	8635,843	8635,843
S49	22899,688	23394,579	23394,579
S50	6234,585	6405,371	6405,371
S51	15232,357	15598,615	15598,615
S52	22895,884	23501,540	23501,540
S53	6234,585	6259,394	6259,394
S54	1098,506	1115,602	1115,602
S55	6612,863	6781,779	6781,779
S56	15229,002	15565,538	15565,538
S57	1098,506	1133,707	1133,707
S58	615,981	643,615	643,615
S59	7003,737	7178,395	7178,395
S60	6610,363	6866,718	6866,718

Tabela 6.9. Exergía dos fluxos da estrutura produtiva do ciclo combinado do problema TADEUS (Continuação)

Fluxos	Referência E [kW]	Real E' [kW]	Esperado E'' [kW]
S61	615,981	632,850	632,850
S62	7003,737	7058,331	7058,331
S63	5905,230	6062,793	6062,793
S64	5905,230	5924,624	5924,624
S65	139534,950	141423,946	141423,946
S66	16711,236	17133,775	17133,775
S67	78831,255	80080,671	80080,671
S68	94441,473	96092,682	96092,682
S69	31540,390	32313,298	32313,298
S70	1137,222	1179,067	1179,067
S71	15689,980	17133,775	17133,775
S72	1231,961	1276,465	1276,465
Sresf	5405,375	5485,261	5485,261
Comp1eixo	159135,925	163036,102	163036,102
Comp2eixo	159140,610	163565,186	163565,186
TG1eixo	288357,735	289921,459	292082,405
TG2eixo	288354,572	293886,726	293886,726
TV1eixo	53489,867	54043,320	54043,320
TV2eixo	50292,234	51004,039	51004,039
WB1	361,068	375,567	375,567
WB2	361,068	367,008	367,008
WB3	109,106	112,144	112,144
WliqTG1	126637,365	124347,642	124347,642
WliqTG2	126629,675	127715,102	127715,102
WliqTV	100733,305	101938,320	101938,320

A metodologia de diagnóstico termoeconômico com OE foi aplicada para identificar os equipamentos com anomalias intrínsecas no ciclo combinado do problema TADEUS. A condição de referência e a condição real foi dada nos trabalhos de Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al. (2006). Os operadores exergéticos necessários foram determinados usando os mesmos critérios que foram adotados para elaborar a estrutura de transição, tanto do sistema simples da seção 3.1.4, como do ciclo EFGT (seção 4.2). Neste caso, de forma similar que no caso do ciclo Rankine do capítulo 5, não foram usadas RNA para determinar o fluxos  $E_i''$ , estes foram simulados usando diretamente o modelo em GateCycle. Foi aplicada então a mesma sequência de passos da seção 3.1.4, com a diferença de que as matrizes obtidas aqui foram de 128x128. Assim, os resultados do diagnóstico são apresentados na Tabela 6.10, onde aparecem as anomalias, disfunções e impacto no consumo de combustível de cada um dos componentes da estrutura produtiva. Observa-se, na Tabela 6.10, que o OE 1D2, que está associado ao filtro de ar do compressor 1, apresenta uma anomalia de 64,125 kW, pelo que se pode afirmar que existe uma anomalia intrínseca no compressor 1, mais especificamente no filtro de ar. Os dois OE da Turbina a gás 1, 4D11 e 4DWtg1 apresentam anomalias de -1349,57 kW e 2149,291 kW, respectivamente, o que indica que existe uma anomalia intrínseca na turbina a gás 1 de

799,743 kW (soma do OE da turbina 1). Os operadores exergéticos 16D33 e 16D35, associados ao superaquecedor de alta pressão da caldeira de recuperação 1, apresentam anomalias de -172,937 kW e 179,038 kW, pelo que este superaquecedor apresenta anomalias intrínsecas. Os equipamentos com anomalias intrínsecas identificados pela metodologia de diagnóstico dos OE são os mesmos considerados com degradações por Valero et al. (2004b) e Lazzaretto et al. (2006). Conclui-se que a metodologia dos OE consegue o objetivo de identificar os equipamentos com anomalias intrínsecas.

Tabela 6. 10. Anomalias e disfunções para cada equipamento da estrutura produtiva do problema TADEUS

Equipamento	Descrição	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Impacto [kW]
1+2	DUCT1+COMP1	407,202	276,039	683,241
	1D2	64,125	56,663	120,788
	2D4	0	0	0
	2D5	0	0	0
	2D6	0	0	0
	2D7	0	0	0
	2D15	0	0	0
3	CMB1	295,211	0	295,211
	3D12	0	0	0
4	GT1	20,053	11,648	31,701
	4D11	-1349,547	-783,898	-2133,446
	4Dwtg1	2149,291	1430,306	3579,597
5	ST1	11,477	2,285	13,762
	5D67	0	0	0
	5Dwtv1	0	0	0
6+7	ST2+CND1	286,52	244,311	530,831
	6D69	0	0	0
	6Dwtv2	0	0	0
	7D70	0	0	0
	7Dresf	0	0	0
12	PUMP1	0,002	0,004	0,007
	12D50	0	0	0
15	PUMP3	-0,022	-0,038	-0,06
	15D72	0	0	0
16	SPHT1	-10,646	-5,95	-16,596
	16D33	-172,937	-96,664	-269,601
	16D35	179,038	148,598	327,635
17	EVAP1	-18,976	-10,542	-29,517
	17D39	0	0	0
	17D34	0	0	0
18	SPHT3	0,4	0,222	0,622
	18D41	0	0	0
	18D45	0	0	0
19	ECON1	8,856	4,92	13,776
	19D40	0	0	0
	19D49	0	0	0

Tabela 6.10. Anomalias e disfunções para cada equipamento da estrutura produtiva do problema TADEUS  
(Continuação)

Equipamento	Descrição	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Impacto [kW]
20	EVAP3	-7,315	-4,064	-11,378
	20D44	0,000	0,000	0,000
	20D51	0,000	0,000	0,000
21	ECON3	-1,025	-0,569	-1,595
	21D55	0,000	0,000	0,000
	21D59	0,000	0,000	0,000
22+23	DUCT2+COMP2	186,608	121,493	308,102
	22D16	0,000	0,000	0,000
	23D19	0,000	0,000	0,000
	23D24	0,000	0,000	0,000
	23D26	0,000	0,000	0,000
	23D28	0,000	0,000	0,000
	23D30	0,000	0,000	0,000
24	CMB2	-392,781	0,000	-392,781
	24D22	0,000	0,000	0,000
25	GT2	-22,436	-12,730	-35,165
	25D29	0,000	0,000	0,000
	25Dwtg2	0,000	0,000	0,000
26	PUMP2	0,002	0,004	0,007
	26D53	0,000	0,000	0,000
28	SPHT2	0,899	0,510	1,410
	28D37	0,000	0,000	0,000
	28D38	0,000	0,000	0,000
29	EVAP2	-82,480	-46,798	-129,278
	29D36	0,000	0,000	0,000
	29D42	0,000	0,000	0,000
30	SPHT4	0,046	0,026	0,073
	30D46	0,000	0,000	0,000
	30D48	0,000	0,000	0,000
31	ECON2	28,268	16,039	44,306
	31D43	0,000	0,000	0,000
	31D52	0,000	0,000	0,000
32	EVAP4	6,206	3,521	9,727
	32D47	0,000	0,000	0,000
	32D56	0,000	0,000	0,000
33	ECON4	29,109	16,517	45,626
	33D60	0,000	0,000	0,000
	33D62	0,000	0,000	0,000
34	GE1	0,000	0,000	0,000
35	GE2	0,000	0,000	0,000
36	GE3	9,823	16,376	26,199
-	Fictícios	0,000	1398,417	1398,417
Impacto no consumo de combustível total [kW]				4411,618

Como mostrado na Tabela 6.10, o impacto no consumo de combustível causado pelos equipamentos do sistema é de 4411,618 kW, este valor é diferente do valor obtido de forma direta, isto é, subtraindo os valores para a exergia do combustível entre a condição de referência e a condição real que é o fluxo “gt10” da Tabela 6.1, Tabela 6.4 e Tabela 6.5. O valor obtido de forma direta é de 6416,703 kW. Esta diferença decorre de que ainda falta somar o impacto

causado pela variação da potência gerada ( $k_p^* \Delta P_S$ ) e o impacto causado pelos resíduos ( $k_R^* \Delta R_S$ ), entre a condição real e a condição de referência, que podem ser calculados usando os dois últimos termos da Equação (5.7). Este valores de impacto aparecem na Tabela 6.11, onde  $\phi$  é obtido da matriz operador irreversibilidade |I), como já foi mostrado na seção 2.3.3, e  $k^* = 1 + \phi$  (Eq. (2.42)). Assim, se tem um impacto causado pela variação da potência gerada, entre a condição de referência e a condição real, de 1192,847 kW e um impacto no consumo de combustível causado pela variação dos resíduos, entre a condição de referência e a condição atual, de 812,239 kW. Se este valores são somados ao valor do impacto causado pelos equipamentos, se obtém o valor de impacto total de 4411,618 kW que é o mesmo obtido de forma direta. Estes resultados aparecem na Tabela 6.12, onde se pode observar também as anomalias intrínsecas, induzidas e a disfunções para cada equipamento do ciclo combinado.

Tabela 6. 11. Impacto no consumo de combustível pela variação da potência gerada e resíduos entre a condição de referência e real

Equipamento	$\phi$	$k^*$	Potência			Impacto
			Referência	Real	$\Delta P$	$k^* \Delta P$
GE1 (Gerador elétrico TG1)	0,712	1,712	126637,365	124347,640	-2289,723	-3920,315
GE2 (Gerador elétrico TG2)	0,685	1,685	126629,675	127715,100	1085,427	1828,678
GE3 (Gerador elétrico TV)	1,726	2,726	100733,305	101938,320	1205,016	3284,484
Impacto total pela variação da potência gerada (kW)						<b>1192,847</b>
Equipamento	$\phi$	$k^*$	Resíduo			Impacto
			Referência	Real	$\Delta R$	$k^* \Delta R$
OE 7Dresf (CND1)	0,849	1,849	5405,375	5485,261	79,885	147,675
OE 21D55 (ECON3)	0,556	1,556	6612,863	6781,779	168,916	262,754
OE 33D60 (ECON4)	0,567	1,567	6610,363	6866,718	256,355	401,809
Impacto total pela variação dos resíduos (kW)						<b>812,239</b>

Tabela 6. 12. Consolidação das informações obtidas pelo diagnóstico usando operadores exergeticos

Equipamentos		Mfint [kW]	MF ind [kW]	DF [kW]	Impacto [kW]
Turbina a gás 1	DUCT1+COMP1	<b>64,125</b>	407,202	332,702	804,029
	CMB1	0,000	295,211	0,000	295,211
	GT1	<b>799,743</b>	20,053	658,056	1477,852
Turbina a vapor e condensador	ST1	0,000	11,477	2,285	13,762
	ST2+CND1	0,000	286,520	244,311	530,831
	PUMP1	0,000	0,002	0,004	0,007
Caldeira de recuperação 1	PUMP3	0,000	-0,022	-0,038	-0,060
	SPHT1	<b>6,101</b>	-10,646	45,983	41,438
	EVAP1	0,000	-18,976	-10,542	-29,517
	SPHT3	0,000	0,400	0,222	0,622
	ECON1	0,000	8,856	4,920	13,776
	EVAP3	0,000	-7,315	-4,064	-11,378
	ECON3	0,000	-1,025	-0,569	-1,595
Turbina a gás 2	DUCT2+COMP2	0,000	186,608	121,493	308,102
	CMB2	0,000	-392,781	0,000	-392,781
	GT2	0,000	-22,436	-12,730	-35,165
Caldeira de recuperação 2	PUMP2	0,000	0,002	0,004	0,007
	SPHT2	0,000	0,899	0,510	1,410
	EVAP2	0,000	-82,480	-46,798	-129,278
	SPHT4	0,000	0,046	0,026	0,073
	ECON2	0,000	28,268	16,039	44,306
	EVAP4	0,000	6,206	3,521	9,727
	ECON4	0,000	29,109	16,517	45,626
Gerador TG1	GE1	0	0,000	0,000	0,000
Gerador TG2	GE2	0	0,000	0,000	0,000
Gerador TV	GE3	0	9,823	16,376	26,199
-	Fictícios	0	0,000	1398,417	1398,417
Impacto no consumo de combustível total causado pelos equipamentos [kW]					4411,618
Impacto total pela variação da potência gerada [kW]					1192,847
Impacto total pela variação dos resíduos [kW]					812,239
Impacto no consumo de combustível total [kW]					6416,703
Impacto no consumo de combustível obtido de forma direta [kW]					6416,703

Assim, a abordagem de diagnóstico termoeconômico usando operadores exergeticos se mostrou efetiva para resolver o que é conhecido como o problema TADEUS, como ficou demonstrado.

## CAPÍTULO VI.

### 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

#### 7.1. Conclusões

A abordagem de diagnóstico termoeconômico usando operadores exergéticos permite a identificação dos equipamentos com anomalias intrínsecas. A metodologia permite identificar equipamentos com anomalias intrínsecas inclusive quando se tem degradações em vários equipamentos de um sistema térmico.

O método tem potencial para ser aplicado, em princípio, a qualquer ciclo térmico de potência e não é necessário conhecer a priori as anomalias dos sistema, já que os dados que se usam para os fluxos  $E_i$  são dados considerando os equipamentos sem degradação.

A metodologia dos OE calcula o mesmo valor das anomalias intrínsecas, independentemente do modelo termoeconômico usado.

O uso de RNA para obter os fluxos  $E_i$  é recomendável já, que as Redes de Neurônios Artificiais permitem uma atualização dos pesos e bias da rede, o que permite considerar a degradação não recuperável dos equipamentos. No entanto, para obter os fluxos  $E_i$  pode-se usar equações matemáticas que descrevam os equipamentos ou um simulador. Pode-se inicialmente, num sistema onde se implemente o método de diagnóstico dos OE, usar um simulador para obter os dados  $E_i$  quando não se dispõe de dados suficientes para treinar uma RNA, para em seguida, quando se tenham as informações suficientes, criar uma RNA.

A metodologia dos OE permite identificar anomalias em equipamentos dissipativos, inclusive quando estes equipamentos são considerados como complementares a um sistema, como é o caso do condensador e da turbina a vapor de baixa pressão, quando se usa o modelo termoeconômico da exergia total.

Algumas metodologias, como a metodologia de impacto no consumo de combustível com filtragem dos efeitos induzidos, procuram inicialmente identificar as anomalias induzidas e as disfunções. No entanto, a metodologia de OE calcula de forma inicial as anomalias intrínsecas, que são as que realmente importam, já que as anomalias induzidas e as disfunções que são chamadas em conjunto como impacto no consumo de combustível intrínseco, são dependentes das anomalias intrínsecas. Isto é, as demais metodologias se centram nos efeitos (impacto induzido) e não na causa preliminar (anomalias intrínseca).

Com a metodologia proposta se pode calcular de forma direta o impacto no consumo de combustível dos resíduos, sem serem alocados aos equipamentos.

A metodologia de OE mostra que, para um conjunto de anomalias intrínsecas presentes num sistema térmico, a relação entre o impacto intrínseco e o impacto induzido para um sistema é uma constante, independentemente da estrutura produtiva ou do modelo termoeconômico usado.

A metodologia aplicada permitiu estabelecer também, para o ciclo EFGT, que o impacto causado por uma anomalia tem mais relevância para alguns equipamentos do que para outros, e que não existe uma relação bem definida entre a magnitude da anomalia intrínseca e o impacto no combustível (pelo menos para o modelo termoeconômico usado), já que o impacto é a soma de todas as contribuições dos equipamentos que ademais apresentam anomalias induzidas e disfunções.

A metodologia proposta cumpre com os quatro critérios apresentados na Tabela 1.1 para o diagnóstico termoeconômico.

## 7.2. Sugestões

### 7.2.1. Cálculo do fator $\lambda$ para o prognóstico nos sistemas térmicos

De acordo com o mostrado na Seção 5.3 desta Tese, para um conjunto específico de anomalias intrínsecas acontecendo num sistema térmico, a relação que existe entre o impacto no consumo de combustível induzido e intrínseco é um valor que é o mesmo para todos os modelos termoeconômicos usados, isto é:

$$\frac{\Delta F_{\text{ind}}}{\Delta F_{\text{int}}} = \lambda \quad (7.1)$$

Assim, a equação (5.3) pode ser escrita como:

$$\Delta F_{\text{T}} = \Delta F_{\text{int}} + \Delta F_{\text{ind}} = \Delta F_{\text{int}} + \lambda \Delta F_{\text{int}} = (1 + \lambda) \Delta F_{\text{int}} \quad (7.2)$$

Para cada conjunto de anomalias existe um  $\lambda$  que relaciona  $\Delta F_{\text{int}}$  com  $\Delta F_{\text{T}}$ , independentemente do modelo termoeconômico. Como  $\Delta F_{\text{int}}$  é encontrado mediante a metodologia dos OE, trabalhos futuros deveriam focar em encontrar  $\lambda$ , mais que num modelo

termoeconômico específico. Isto é,  $\lambda$  está mais relacionado com a forma matemática da equação do impacto no consumo de combustível, que no modelo termoeconômico adotado. O fator  $\lambda$  teria uma relevância na etapa posterior ao diagnóstico, isto é, o prognóstico em sistemas térmicos.

### 7.2.2. Uso de operadores exergeticos e indicadores termodinâmicos para o diagnóstico de sistemas térmicos

Outra proposta para trabalhos futuros é integrar o diagnóstico por impacto no consumo de combustível com o diagnóstico que usa indicadores termodinâmicos. Isto poderia ser feito transformando os operadores exergeticos (OE) de aqueles fluxos de exergia que não estão associados a potência elétrica, potência mecânica, calor nem exergia química, num conjunto de sub-OE, cada um deles representando a variação na temperatura, pressão e fluxo mássico. Assim, por exemplo, para o ciclo EFGT do capítulo 5, o OE 1D2 pode ser dividido em três sub-OE sequenciais: 1P2, 1T2 e 1M2 que representariam os efeitos sobre o consumo de combustível causado pela variação da pressão, da temperatura e do fluxo mássico, respectivamente, para o fluxo 2 entre a condição de referência e a condição real. Assim a Estrutura de transição para o ciclo EFGT é apresentada na Figura 8.1, onde os fluxos de exergia entre 1P2 e 1T2 e entre 1T2 e 1M2 podem ser calculados usando a Equação (7.3) e Equação (7.4), respectivamente. Estas equações são válidas para os outros sub-OE, que aparecem na Figura 7.1.

$$E_i^{P'} = f(P', T'', m'') \quad (7.3)$$

$$E_i^{P'T'} = f(P', T', m'') \quad (7.4)$$

Um trabalho relacionado com este tema já foi apresentado em Orozco, Venturini e Escobar (2016), mas ainda precisa de um aprofundamento, isto é, tentar outro tipo de divisão dos OE em sub-OE que não sejam sequenciais.

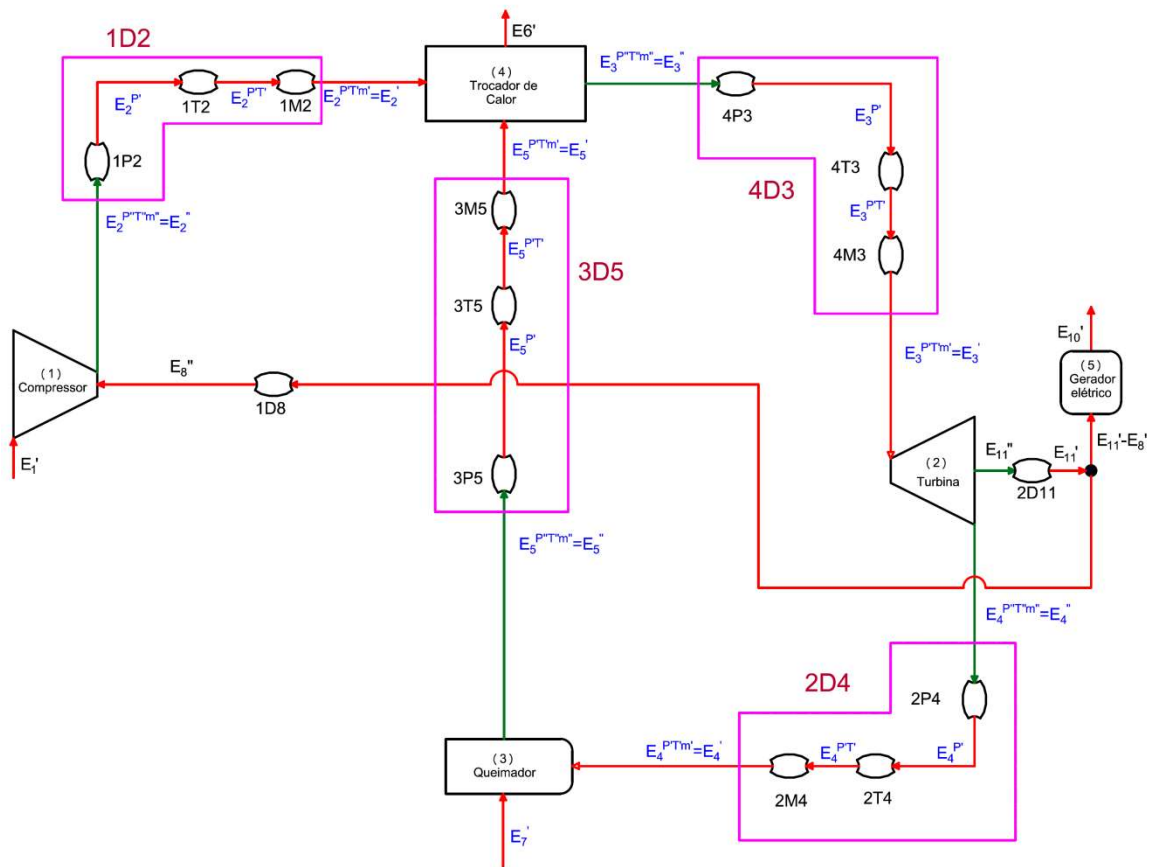


Figura 7.1. Estrutura de transição usando OE e sub-OE para um ciclo EFGT

### 7.2.3. Influência de recursos externos diferentes do combustível em um sistema térmico

A equação do impacto no consumo de combustível foi desenvolvida para determinar como as mudanças num sistema influenciam na quantidade de combustível utilizado para um dado nível de produto gerado, no entanto, além do combustível, num sistema podem existir outros recursos entrando no mesmo, por exemplo, potência elétrica procedente de um sistema solar térmico, ou variação da exergia de uma entrada de água tratada para o processo, que tem um valor monetário, etc. Assim, para ter em conta estes outros recursos se propõe modificar a Equação (5.7) que ficaria assim (Eq.(7.5)):

$$\Delta F_T = \Delta F_{\text{Combustível}} + \Delta F_{\text{Outros}} = MF + DF + {}^t k_P^* \Delta P_S + {}^t k_R^* \Delta R_S \quad (7.5)$$

Reescrevendo, tem-se:

$$\Delta F_{\text{Combustível}} = MF + DF + {}^t k_P^* \Delta P_S + {}^t k_R^* \Delta R_S - \Delta F_{\text{Outros}} \quad (7.8)$$

Que seria a equação do impacto no consumo de combustível mais completa. Fica também como sugestão para um trabalho futuro testar esta nova Equação.

Também, como trabalhos futuros, poderia ser aplicada a metodologia proposta nesta Tese a sistema de refrigeração e acondicionamento de ar, assim como a outros sistemas térmicos.

# APÊNDICES

## APÊNDICE A. DADOS PARA TREINAR AS REDES DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA SIMPLES DA SEÇÃO 3.1.4

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
1	0	5,23	6,53	5,58	38,75	106,59	36,57	18,28	16,45
2	0	5,51	6,89	4,4	38,12	108,94	41,02	20,51	18,46
3	0	5,92	7,4	5,92	38,55	104,25	37,14	18,57	16,72
4	0	6,1	7,63	4,95	37,83	105,3	39,26	19,63	17,67
5	0	5,13	6,41	5,58	38,15	104,03	37,61	18,81	16,93
6	0	5,19	6,49	4,47	38,17	108,87	38,05	19,03	17,12
7	0	5,2	6,5	4,88	38,41	108,08	39,24	19,62	17,66
8	0	6,1	7,63	4,57	37,38	105,04	36,31	18,15	16,34
9	0	5,43	6,79	4,45	37,7	106,92	39,01	19,5	17,55
10	0	5,05	6,32	4,57	36,73	102,28	37,36	18,68	16,81
11	0	5,28	6,6	5,76	38,22	103,51	37,22	18,61	16,75
12	0	6,1	7,62	6,04	38,07	101,71	37,7	18,85	16,96
13	0	4,56	5,69	5,05	37,21	102,26	36,66	18,33	16,5
14	0	4,55	5,69	4,36	37,46	106,28	40,25	20,12	18,11
15	0	5,64	7,05	4,43	36,22	100,68	40,88	20,44	18,39
16	0	5,4	6,75	5,48	37,14	100,13	36,85	18,43	16,58
17	0	5,51	6,88	6,12	39,07	105,64	37,11	18,55	16,7
18	0	5,79	7,24	5,63	38,15	103,8	37,47	18,73	16,86
19	0	5,75	7,19	5,07	37,22	102,24	39,09	19,55	17,59
20	0	4,7	5,87	5,29	38,32	105,98	36,27	18,14	16,32
21	0	6,11	7,64	5,63	37,6	101,47	39,07	19,54	17,58
22	0	4,92	6,15	4,36	36,68	102,94	40,09	20,04	18,04
23	0	5,08	6,34	5,18	37,96	104,91	36,8	18,4	16,56
24	0	5,34	6,67	5,27	36,88	99,97	37,81	18,91	17,02
25	0	4,81	6,01	5,46	38,68	106,77	37,81	18,9	17,01
26	0	4,68	5,84	5,47	38,12	104,39	38,94	19,47	17,53
27	0	4,66	5,82	4,9	37,32	103,37	38,2	19,1	17,19
28	0	5,13	6,41	4,74	38,33	108,36	37,45	18,72	16,85
29	0	4,55	5,68	4,99	37,58	104,1	39,8	19,9	17,91
30	0	4,88	6,1	5,61	37,48	101,04	39,22	19,61	17,65
31	0	4,58	5,72	4,87	36,55	100,27	39,14	19,57	17,61
32	0	6,01	7,52	5,59	37,93	103,04	40,64	20,32	18,29
33	0	4,64	5,8	4,59	37,91	107,23	37,4	18,7	16,83
34	0	5,05	6,31	5,21	38,61	107,57	38,53	19,27	17,34
35	0	5,18	6,47	4,4	37,68	107,07	38,1	19,05	17,14
36	0	4,93	6,16	5,18	37,06	101,06	39,38	19,69	17,72
37	0	4,92	6,15	5,16	37,19	101,7	40,49	20,24	18,22
38	0	4,66	5,83	4,68	37,16	103,67	40,8	20,4	18,36
39	0	5,19	6,49	6,11	38,45	103,02	39,63	19,81	17,83
40	0	5,37	6,71	5,18	36,86	100,22	40,94	20,47	18,42
41	0	5,24	6,55	4,51	37,92	107,58	36,17	18,09	16,28
42	0	5,14	6,42	5,36	37,28	101,26	37,24	18,62	16,76
43	0	5,04	6,3	5,87	39,1	106,85	40,58	20,29	18,26
44	0	4,92	6,15	5,91	38,06	102,24	37,98	18,99	17,09
45	0	5,84	7,3	4,69	36,87	102,39	36,48	18,24	16,41

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 (Continuação)

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
46	0	5,91	7,39	6,17	38	100,88	40,86	20,43	18,39
47	0	5,69	7,11	5,44	37,27	100,87	36,92	18,46	16,62
48	0	5,24	6,55	5,35	36,97	99,97	37,84	18,92	17,03
49	0	5,48	6,85	5,84	38,43	104,11	37,2	18,6	16,74
50	0	4,74	5,93	4,91	37,12	102,48	39,76	19,88	17,89
51	0	4,65	5,82	4,63	37,38	104,78	40,08	20,04	18,03
52	0	4,82	6,03	4,51	37,4	105,4	39,95	19,98	17,98
53	0	5,8	7,25	5,68	39,46	109,2	40,01	20,01	18
54	0	4,84	6,06	4,93	37,66	104,68	37,35	18,68	16,81
55	0	4,57	5,71	4,58	37,71	106,38	38,23	19,11	17,2
56	0	4,73	5,92	4,48	37,75	106,98	36,35	18,18	16,36
57	0	5,63	7,03	5,16	37,76	104,15	37,91	18,95	17,06
58	0	5,68	7,1	6,26	38,23	101,45	38,02	19,01	17,11
59	0	5,48	6,85	5,55	37,21	100,15	41,01	20,51	18,45
60	0	5,67	7,09	4,66	37,03	103,15	40,66	20,33	18,3
61	0	4,59	5,74	5,89	38,28	103,23	36,68	18,34	16,51
62	0	5,8	7,24	4,8	36,31	99,54	40,28	20,14	18,13
63	0	5,56	6,96	6,21	38,23	101,66	36,87	18,43	16,59
64	0	4,88	6,1	5,68	39,47	109,24	38,58	19,29	17,36
65	0	5,57	6,97	4,52	37,21	104,5	38,67	19,34	17,4
66	0	5,48	6,85	5,99	38,62	104,28	39,89	19,94	17,95
67	0	5,38	6,72	4,95	38,71	109,09	36,7	18,35	16,51
68	0	5,56	6,95	5,42	38,5	106,2	39,4	19,7	17,73
69	0	4,93	6,17	5,59	39,15	108,25	36,17	18,09	16,28
70	0	5,72	7,15	5,58	38,05	103,58	36,1	18,05	16,25
71	0	5,1	6,37	5,79	37,85	101,83	37,37	18,69	16,82
72	0	5,6	7	4,96	37,15	102,38	36,44	18,22	16,4
73	0	4,72	5,9	6,17	38,44	102,73	37,14	18,57	16,71
74	0	5,94	7,42	5,48	38,17	104,51	40,65	20,32	18,29
75	0	4,62	5,78	4,57	36,51	101,33	40,48	20,24	18,21
76	0	5,31	6,64	6,28	38,41	102,16	37,35	18,67	16,81
77	0	4,61	5,76	5,92	39,2	107,05	39,01	19,51	17,56
78	0	5,82	7,27	5,87	39,54	108,75	39,7	19,85	17,86
79	0	5,29	6,61	5,2	37,67	103,62	39,18	19,59	17,63
80	0	5,58	6,98	5,5	37,58	101,96	38,78	19,39	17,45
81	0	5,44	6,8	5,25	37,12	101,03	37,58	18,79	16,91
82	0	5,28	6,6	5,79	39,35	108,24	37,03	18,51	16,66
83	0	5,01	6,26	5,92	37,4	99,39	40,8	20,4	18,36
84	0	5,6	7	4,34	37,22	105,34	37,62	18,81	16,93
85	0	5,4	6,76	4,6	37,46	105,23	39,02	19,51	17,56
86	0	5,6	7,01	5,94	37,87	101,29	39,39	19,69	17,72
87	0	4,95	6,19	6,27	38,91	104,32	40,71	20,35	18,32
88	0	5,14	6,42	5,96	37,48	99,58	38,2	19,1	17,19
89	0	5,09	6,36	6,01	38,41	103,32	40,58	20,29	18,26
90	0	5,69	7,12	5,87	37,47	99,9	37,91	18,96	17,06
91	0	5,33	6,66	5,68	37,6	101,28	37,13	18,56	16,71
92	0	5,3	6,62	5,42	38,49	106,17	40,63	20,32	18,29
93	0	5,02	6,27	5,16	37,81	104,39	39,57	19,78	17,8
94	0	5,97	7,46	4,76	37,6	105,16	39,54	19,77	17,79
95	0	5,3	6,62	4,48	38,1	108,51	37,71	18,86	16,97

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 (Continuação)

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
96	0	5,65	7,07	4,37	36,24	101,03	36,55	18,27	16,45
97	0	5,92	7,41	5,28	37,18	101,16	37,36	18,68	16,81
98	0	4,69	5,86	5,23	37,11	101,08	38,64	19,32	17,39
99	0	5,01	6,26	6,15	39,92	109,18	37,47	18,74	16,86
100	0	5,54	6,93	5,41	38,38	105,73	40,01	20	18
101	0	5,98	7,47	6,17	38,95	104,93	40,44	20,22	18,2
102	0	4,98	6,23	6,08	38,43	103,06	36,73	18,37	16,53
103	0	5	6,26	5,1	37,52	103,4	39,24	19,62	17,66
104	0	4,86	6,08	5,38	37,83	103,52	39,49	19,75	17,77
105	0	5,52	6,9	4,91	37,47	103,93	37,82	18,91	17,02
106	0	5,63	7,04	4,54	36,42	101,05	37,39	18,7	16,83
107	0	5,13	6,41	4,99	37,11	102,09	37,95	18,98	17,08
108	0	4,97	6,21	5,92	38,28	103,12	39,97	19,99	17,99
109	0	5,91	7,39	6,3	38,57	102,72	38,68	19,34	17,4
110	0	4,68	5,86	6,21	38,54	103	39,65	19,83	17,84
111	0	4,7	5,87	5,49	39,11	108,51	37,47	18,74	16,86
112	0	4,95	6,18	6,03	37,62	99,87	39,54	19,77	17,79
113	0	5,82	7,28	4,53	36,84	102,88	36,55	18,27	16,45
114	0	5,63	7,03	6,26	38,59	103,02	38,83	19,41	17,47
115	0	5,63	7,04	6,18	39,1	105,5	36,74	18,37	16,53
116	0	4,62	5,78	6,24	39,39	106,48	37,43	18,71	16,84
117	0	4,71	5,88	6,33	38,56	102,57	39,28	19,64	17,68
118	0	5,33	6,67	5,78	38,13	103,05	37,81	18,9	17,01
119	0	5,92	7,4	6,22	39,64	107,63	39,55	19,77	17,8
120	0	5,59	6,99	6,2	38,6	103,29	36,98	18,49	16,64
121	0	5,5	6,87	5,01	37,01	101,6	37,82	18,91	17,02
122	0	5,84	7,31	4,82	38,61	109,24	40,96	20,48	18,43
123	0	4,88	6,1	5,77	37,78	101,62	40,67	20,33	18,3
124	0	5,79	7,24	6,01	38,95	105,6	38,37	19,18	17,26
125	0	5,59	6,98	5,36	37,95	104,1	39,05	19,52	17,57
126	0	4,87	6,09	5,93	38,99	106,11	40,94	20,47	18,42
127	0	5,41	6,76	5,89	39,39	107,98	36,44	18,22	16,4
128	0	4,9	6,12	5,79	38,77	105,77	38,8	19,4	17,46
129	0	4,62	5,77	5,86	37,6	100,46	38,29	19,14	17,23
130	0	5,61	7,01	5,63	39,08	107,76	40,81	20,41	18,36
131	0	6	7,5	5,71	37,29	99,82	39,09	19,54	17,59
132	0	5,29	6,61	4,34	37,59	106,91	40,31	20,15	18,14
133	0	5,49	6,87	5,23	37,72	103,66	39,55	19,77	17,8
134	0	4,6	5,75	4,88	37,19	102,89	39,27	19,63	17,67
135	0	5	6,25	5,57	38,32	104,78	37,03	18,52	16,66
136	0	5,94	7,42	5,27	37,4	102,15	37,42	18,71	16,84
137	0	5,65	7,06	4,5	36,68	102,35	38,27	19,14	17,22
138	0	5	6,25	5,19	37,08	101,14	40,67	20,34	18,3
139	0	4,68	5,85	5,57	37,12	99,73	37,57	18,79	16,91
140	0	4,59	5,73	6,01	37,92	101,19	39,56	19,78	17,8
141	0	5,9	7,37	5,38	38,38	105,87	38,11	19,05	17,15
142	0	5,22	6,52	5,88	37,9	101,66	37,09	18,54	16,69
143	0	5,28	6,6	5,38	38,31	105,56	37,46	18,73	16,86
144	0	4,74	5,93	4,96	37,74	104,92	40,95	20,47	18,43
145	0	5,05	6,31	5,03	38,01	105,76	39,74	19,87	17,88

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 (Continuação)

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
146	0	5,57	6,96	6,05	37,72	100,2	39,46	19,73	17,76
147	0	4,81	6,02	5,53	38,37	105,16	40,58	20,29	18,26
148	0	6,02	7,52	4,65	36,32	100,22	40,07	20,04	18,03
149	0	5,79	7,23	4,67	36,42	100,51	38,07	19,03	17,13
150	0	5,26	6,57	6,02	37,79	100,62	37,17	18,59	16,73
151	0	5,98	7,48	5,78	37,71	101,32	37,12	18,56	16,7
152	0	4,78	5,97	5,96	38,54	104,04	36,21	18,11	16,3
153	0	4,77	5,96	4,88	38,19	107,21	37,25	18,63	16,76
154	0	4,87	6,09	5,93	38,72	104,93	38,85	19,43	17,48
155	0	5,55	6,94	5,24	38,69	107,81	39,4	19,7	17,73
156	0	5,14	6,43	5,13	37,22	101,99	39,62	19,81	17,83
157	0	4,75	5,94	4,5	37,16	104,41	38,79	19,39	17,45
158	0	5,27	6,59	5,26	38,17	105,43	36,75	18,38	16,54
159	0	5,26	6,58	5,81	39,57	109,1	39,77	19,89	17,9
160	0	5,65	7,06	4,84	36,57	100,44	40,76	20,38	18,34
161	0	4,78	5,98	5,28	38,88	108,41	40,33	20,17	18,15
162	0	5,61	7,01	4,78	36,38	99,91	39,27	19,64	17,67
163	0	5,72	7,15	5,12	37,11	101,55	38,52	19,26	17,34
164	0	6,05	7,56	6,07	38,78	104,63	38,4	19,2	17,28
165	0	4,96	6,2	4,79	37,68	105,4	36,81	18,4	16,56
166	0	6,12	7,64	6,33	38,09	100,57	36,79	18,4	16,56
167	0	4,68	5,84	5,88	38,62	104,74	39,02	19,51	17,56
168	0	4,97	6,21	6,23	39,23	105,86	36,53	18,26	16,44
169	0	5,83	7,29	5,34	38,74	107,58	37,21	18,6	16,74
170	0	5,84	7,3	5,54	37,45	101,18	37,24	18,62	16,76
171	0	5,31	6,64	5	37,4	103,3	39,64	19,82	17,84
172	0	5,67	7,09	5,83	39,39	108,25	36,11	18,06	16,25
173	0	4,71	5,89	6,06	38,9	105,16	39,96	19,98	17,98
174	0	5,08	6,34	5,06	38,16	106,27	40,61	20,31	18,28
175	0	4,72	5,9	5,15	37,31	102,26	38,07	19,04	17,13
176	0	5,5	6,87	5,9	39,19	107,08	40,73	20,36	18,33
177	0	5,26	6,58	5,16	37,63	103,59	37,81	18,9	17,01
178	0	5,21	6,51	4,86	37,71	105,22	38,23	19,12	17,2
179	0	5,43	6,79	5,95	39,19	106,85	37,68	18,84	16,96
180	0	4,85	6,07	4,55	37,45	105,42	40,99	20,5	18,45
181	0	4,82	6,03	4,9	38,71	109,33	39,69	19,84	17,86
182	0	5,53	6,92	5,67	38,07	103,27	36,13	18,07	16,26
183	0	4,9	6,12	4,88	38,12	106,91	39,35	19,68	17,71
184	0	4,84	6,05	4,39	38,08	108,81	39,17	19,58	17,62
185	0	5,36	6,71	6,29	39,8	108,05	39,06	19,53	17,58
186	0	5,62	7,02	4,84	36,36	99,55	40,87	20,43	18,39
187	0	6,02	7,53	5,84	37,44	99,9	38,32	19,16	17,24
188	0	4,68	5,84	6,08	38,04	101,42	38,18	19,09	17,18
189	0	4,57	5,71	5,5	38,33	105,1	39,34	19,67	17,7
190	0	5,54	6,93	5,82	38,5	104,5	37,16	18,58	16,72
191	0	4,92	6,15	6,27	39,18	105,5	40,91	20,45	18,41
192	0	5,49	6,86	5,82	37,71	101,13	40,07	20,04	18,03
193	0	4,84	6,04	5,28	38,93	108,61	38,31	19,15	17,24
194	0	5,58	6,97	4,88	37,28	103,3	36,23	18,12	16,3
195	0	4,75	5,94	4,93	36,62	100,29	36,05	18,03	16,22

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 (Continuação)

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
196	0	6,12	7,65	4,88	36,4	99,57	37,88	18,94	17,05
197	0	6,08	7,6	6,26	39,79	108,13	37,53	18,77	16,89
198	0	5,3	6,62	6,17	39,48	107,16	38	19	17,1
199	0	5,51	6,89	5,55	38,07	103,79	39,14	19,57	17,61
200	0	4,59	5,74	6,21	38,88	104,46	39,93	19,97	17,97
201	0	5,33	6,67	5,33	37,04	100,34	37,04	18,52	16,67
202	0	4,58	5,73	5,49	38,95	107,81	36,31	18,16	16,34
203	0	5,11	6,39	5,14	38,41	106,99	36,84	18,42	16,58
204	0	5,1	6,37	5,23	38,87	108,58	36,54	18,27	16,44
205	0	5,13	6,42	5,07	38,23	106,53	38,95	19,48	17,53
206	0	5,74	7,17	4,84	38,05	106,72	38,8	19,4	17,46
207	0	4,69	5,86	5,99	38,26	102,74	36,27	18,13	16,32
208	0	4,55	5,69	5,18	36,83	100,11	40,03	20,02	18,01
209	0	4,96	6,2	5,65	37,64	101,55	41	20,5	18,45
210	0	4,67	5,84	4,57	38,2	108,52	39,12	19,56	17,61
211	0	4,74	5,92	5,25	37,55	102,87	36,33	18,17	16,35
212	0	5,2	6,5	6,12	38,61	103,67	36,71	18,36	16,52
213	0	5,77	7,21	6,27	38,29	101,68	40,52	20,26	18,24
214	0	4,73	5,91	5,65	38,52	105,3	39,22	19,61	17,65
215	0	6,07	7,59	5,49	38,6	106,31	38,49	19,24	17,32
216	0	5,87	7,34	4,43	36,07	100,09	38,36	19,18	17,26
217	0	4,69	5,87	4,81	36,6	100,69	39,98	19,99	17,99
218	0	5,46	6,82	4,54	37,44	105,41	39,83	19,91	17,92
219	0	5,75	7,18	5,92	37,89	101,46	38,42	19,21	17,29
220	0	4,94	6,18	5,7	38,62	105,5	38,35	19,17	17,26
221	0	4,73	5,91	5,91	39,45	108,2	38,44	19,22	17,3
222	0	5,67	7,09	4,96	37,34	103,18	37,5	18,75	16,87
223	0	6,08	7,59	4,54	36,96	103,37	38,06	19,03	17,13
224	0	6,01	7,51	4,8	36,27	99,35	39,53	19,76	17,79
225	0	5,42	6,78	5,37	37,91	103,9	39,27	19,64	17,67
226	0	5,95	7,43	5,84	38,59	104,8	39	19,5	17,55
227	0	4,84	6,06	6,03	39,21	106,6	36,18	18,09	16,28
228	0	5,35	6,68	5,2	38,45	106,95	37,33	18,67	16,8
229	0	4,82	6,03	5,67	39	107,26	37,5	18,75	16,88
230	0	5,35	6,69	6,27	39	104,69	39,07	19,54	17,58
231	0	5,32	6,65	4,88	38,12	106,85	39,92	19,96	17,96
232	0	4,62	5,78	5,69	38,75	106,1	37,14	18,57	16,71
233	0	4,76	5,95	5,05	36,93	101,12	39,08	19,54	17,59
234	0	5,18	6,47	5,62	37,7	101,97	40,93	20,47	18,42
235	0	5,75	7,19	5,21	37,21	101,58	40,98	20,49	18,44
236	0	4,93	6,16	5,27	37,96	104,54	37,39	18,69	16,83
237	0	4,69	5,86	5,94	38,31	103,18	40,2	20,1	18,09
238	0	4,8	6	5,46	38,69	106,85	40,26	20,13	18,12
239	0	5,41	6,76	5,51	37,57	101,82	38,46	19,23	17,31
240	0	5,81	7,26	5,39	37,98	104,12	38,91	19,46	17,51
241	0	5,59	6,99	4,62	38,06	107,73	36,93	18,46	16,62
242	0	5,09	6,37	5,41	38,08	104,45	38,31	19,16	17,24
243	0	6,05	7,56	4,65	37,67	105,95	40,98	20,49	18,44
244	0	5,74	7,18	4,83	37,92	106,24	37,9	18,95	17,06
245	0	4,86	6,08	4,35	36,1	100,53	40,31	20,15	18,14

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 (Continuação)

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
246	0	5,47	6,83	5,19	37,02	100,86	39	19,5	17,55
247	0	5,94	7,42	4,97	37,32	103,06	37,84	18,92	17,03
248	0	5,55	6,94	4,85	36,38	99,58	40,95	20,48	18,43
249	0	5,2	6,5	4,41	37,24	105,14	40,69	20,35	18,31
250	0	5,32	6,65	4,35	37,88	108,11	36,16	18,08	16,27
251	0	4,71	5,89	4,69	36,19	99,48	40,67	20,34	18,3
252	0	4,68	5,85	5,05	38,38	107,28	40,68	20,34	18,31
253	0	4,82	6,02	5,88	37,79	101,24	39,19	19,6	17,64
254	0	5,76	7,19	6,01	39,58	108,26	38,32	19,16	17,24
255	0	5,7	7,13	5,2	37,35	102,24	36,81	18,4	16,56
256	0	5,22	6,53	6,31	39,87	108,27	39,81	19,9	17,91
257	0	4,99	6,24	5,72	37,91	102,42	36,3	18,15	16,34
258	0	4,62	5,78	6,27	39,65	107,48	37,81	18,91	17,01
259	0	4,54	5,67	5,39	37,67	102,82	36,47	18,23	16,41
260	0	5,64	7,05	5	38,68	108,75	37,94	18,97	17,07
261	0	5,91	7,39	5,83	38,6	104,85	40,87	20,44	18,39
262	0	5,81	7,26	6,2	38,29	101,96	36,21	18,11	16,29
263	0	5,76	7,2	4,83	36,66	100,87	37,47	18,73	16,86
264	0	5,99	7,49	4,61	36,27	100,2	36,92	18,46	16,61
265	0	4,77	5,96	5,92	38,13	102,48	40,94	20,47	18,42
266	0	5,62	7,02	5,61	37,56	101,37	37,36	18,68	16,81
267	0	5,78	7,22	5,72	39,25	108,15	40,74	20,37	18,33
268	0	4,93	6,17	4,99	37,24	102,65	40,11	20,06	18,05
269	0	5,25	6,56	5,88	38,22	103,03	40,14	20,07	18,06
270	0	5,99	7,48	4,43	35,98	99,7	36,66	18,33	16,5
271	0	6,01	7,51	4,56	37,34	104,91	38,32	19,16	17,24
272	0	4,98	6,22	5,42	38,06	104,32	38,24	19,12	17,21
273	0	5,92	7,4	5,67	38,36	104,53	36,11	18,06	16,25
274	0	5,02	6,28	4,38	36,94	103,99	37,54	18,77	16,89
275	0	5,24	6,55	5,97	39,11	106,45	38,62	19,31	17,38
276	0	4,71	5,89	5,44	39,11	108,7	40,81	20,41	18,37
277	0	5,14	6,43	4,42	37,83	107,62	38,9	19,45	17,5
278	0	5,84	7,3	5,03	36,96	101,32	36,21	18,1	16,29
279	0	4,68	5,84	5	37,22	102,53	39,21	19,61	17,65
280	0	4,77	5,96	4,75	37,22	103,61	37,89	18,95	17,05
281	0	4,87	6,09	5,81	38,65	105,16	40,31	20,16	18,14
282	0	4,98	6,22	5,75	38,89	106,42	38,66	19,33	17,4
283	0	5,95	7,44	5,77	38,38	104,17	37,31	18,65	16,79
284	0	4,69	5,86	5,92	37,49	99,78	39,08	19,54	17,59
285	0	5,79	7,24	6,26	38,55	102,83	36,34	18,17	16,35
286	0	5,67	7,08	4,48	36,35	101,04	38,17	19,08	17,18
287	0	5,9	7,37	4,55	37,36	105,06	39,52	19,76	17,78
288	0	5,11	6,39	4,56	36,87	102,89	36,72	18,36	16,52
289	0	5,75	7,19	5,2	38,98	109,23	36,16	18,08	16,27
290	0	5,48	6,85	5,18	37,37	102,39	37,22	18,61	16,75
291	0	5,22	6,53	6,08	38,99	105,44	37,49	18,74	16,87
292	0	5,76	7,2	4,84	37,11	102,72	39,33	19,66	17,7
293	0	4,53	5,67	4,72	37,57	105,21	37,85	18,93	17,03
294	0	4,63	5,78	4,76	36,48	100,42	39,3	19,65	17,69
295	0	5,84	7,3	5,1	37,25	102,24	36,37	18,19	16,37

Tabela A.1. Dados de operação do sistema simples da seção 3.1.4 (Continuação)

Padrão	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C		
	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C
296	0	4,7	5,88	6,11	37,83	100,41	37,96	18,98	17,08
297	0	5,74	7,17	5,41	36,97	99,72	37,17	18,59	16,73
298	0	5,43	6,79	5,94	39,27	107,23	38,23	19,11	17,2
299	0	5,38	6,72	6,05	38,57	103,82	39,35	19,68	17,71
300	0	4,94	6,18	6,2	39,78	108,33	38,66	19,33	17,4

# APÊNDICE B. PROCEDIMENTO PARA CRIAR, TREINAR E SIMULAR AS REDES DE NEURÔNIOS ARTIFICIAIS (RNA) DO SISTEMA SIMPLES DA SEÇÃO 3.1.4.

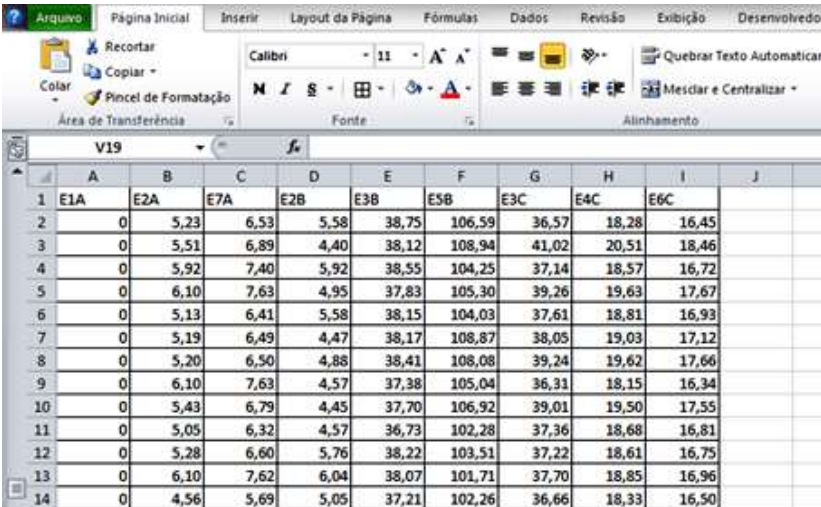
As RNA foram criadas usando o software comercial MATLAB. A seguir serão descritos os passos necessários para tal fim.

## Considerações iniciais

- Como o sistema está composto por três equipamentos principais serão criadas três RNA, uma para cada equipamento.
- O tipo de rede escolhida terá as seguintes características: uma camada oculta, topologia *feed-forward*, algoritmo de treinamento *backpropagation*, função de transferência Tangente Hiperbólica Sigmoide na camada oculta e função linear na camada de saída.
- Os componentes A, B, C têm cada um três fluxos já seja entrando ou saindo, além que a Tabela A.1 contém 300 padrões para treinar as Redes. Assim usando a Equação (42)  $NNO = \frac{1}{2}(3) + \sqrt{300} = 18,82$ , foram escolhidos 18 neurônios para a camada oculta. Os dados foram ordenados de forma aleatória e divididos em 70% para treinar as RNA e 30% para testar as RNA.

## B.1. TREINAR AS REDES DE NEURONIOS ARTIFICIAIS

1. Com os dados da Tabela A.1 do Apêndice A, foi elaborado um arquivo em Excel que foi nomeado como: “TAB-SIMPLES.xlsx”. Este arquivo é uma tabela no Excel como mostrado na Figura B.1



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	E1A	E2A	E7A	E2B	E3B	E5B	E3C	E4C	E6C	
2	0	5,23	6,53	5,58	38,75	106,59	36,57	18,28	16,45	
3	0	5,51	6,89	4,40	38,12	108,94	41,02	20,51	18,46	
4	0	5,92	7,40	5,92	38,55	104,25	37,14	18,57	16,72	
5	0	6,10	7,63	4,95	37,83	105,30	39,26	19,63	17,67	
6	0	5,13	6,41	5,58	38,15	104,03	37,61	18,81	16,93	
7	0	5,19	6,49	4,47	38,17	108,87	38,05	19,03	17,12	
8	0	5,20	6,50	4,88	38,41	108,08	39,24	19,62	17,66	
9	0	6,10	7,63	4,57	37,38	105,04	36,31	18,15	16,34	
10	0	5,43	6,79	4,45	37,70	106,92	39,01	19,50	17,55	
11	0	5,05	6,32	4,57	36,73	102,28	37,36	18,68	16,81	
12	0	5,28	6,60	5,76	38,22	103,51	37,22	18,61	16,75	
13	0	6,10	7,62	6,04	38,07	101,71	37,70	18,85	16,96	
14	0	4,56	5,69	5,05	37,21	102,26	36,66	18,33	16,50	

Figura B.1. Tela principal do arquivo TAB-SIMPLES.xlsx.

2. Uma rotina em MATLAB foi escrita para obter as informações do arquivo de Excel TAB-SIMPLES.xlsx. O código da rotina é apresentado a seguir. Ao executar a rotina os dados são carregados no MATLAB.

```
%*****PROGRAMA PARA DEFINIR OS PARÂMETROS PARA TREINAR AS REDES
%*****NEURAIS PARA SIMULAR UN CICLO SIMPLES*****
%*****DIMAS JOSE RUA OROZCO*****
%*****UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBA*****
%*****NEST/IEM/UNIFEI*****
%*****CARREGAR OS DADOS PARA TREINAR A REDE DE CADA COMPONENTE
TREIN_SIMPLES=xlsread('TAB-SIMPLES.xlsx');
%CHAMAR DADOS PARA O EQUIPAMENTO A
E1_A=(TREIN_SIMPLES(:,1));
E2_A=(TREIN_SIMPLES(:,2));
E7_A=(TREIN_SIMPLES(:,3));
%CHAMAR DADOS PARA O EQUIPAMENTO B
E2_B=(TREIN_SIMPLES(:,4));
E3_B=(TREIN_SIMPLES(:,5));
E5_B=(TREIN_SIMPLES(:,6));
%CHAMAR DADOS PARA O EQUIPAMENTO C
E3_C=(TREIN_SIMPLES(:,7));
E4_C=(TREIN_SIMPLES(:,8));
E6_C=(TREIN_SIMPLES(:,9));
%CRIAR OS VETORES DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE PARA O EQUIPAMENTO A
INT_A=[E1_A E7_A];
OUT_A=[E2_A];
%CRIAR OS VETORES DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE PARA O EQUIPAMENTO B
INT_B=[E2_B E5_B];
OUT_B=[E3_B];
%CRIAR OS VETORES DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE PARA O EQUIPAMENTO C
INT_C=[E3_C];
OUT_C=[E4_C E6_C];
```

3. No “*Command Window*” do MATLAB escreve-se o comando “*nntool*” como mostrado na Figura B.2. Assim aparece a janela mostrada na Figura B.3 .

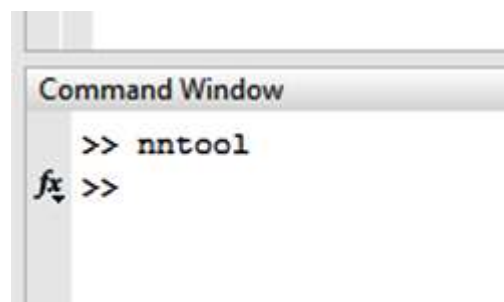


Figura B.2. *Command Window* do Matlab

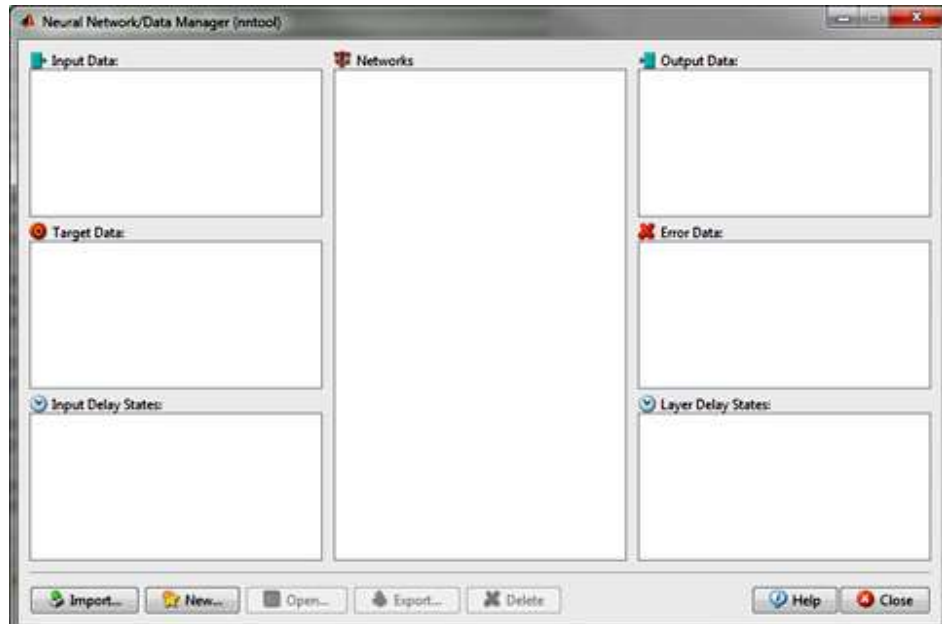


Figura B.3. Tela principal de *Neural Network/Data Manager (nntool)*

4. Clicar no botão “Import...” para carregar os vetores de entrada e saída das redes que vão ser criadas. Aparece a seguinte janela (Figura B.4) onde serão escolhidos os vetores de acordo com a categoria “Input Data” (INT\_A , INT\_B, INT\_C) ou “Target Data” (OUT\_A, OUT\_B, OUT\_C).

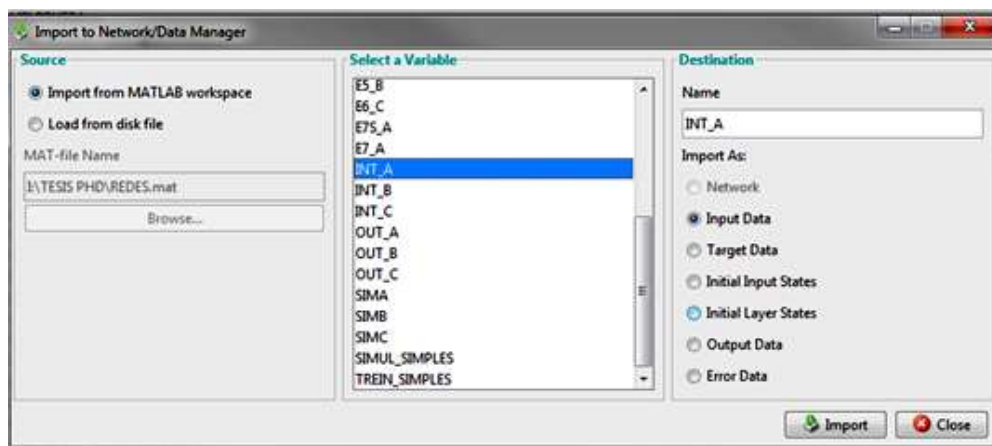


Figura B.4. Tela principal de *Import to Network/Data Manager*

Assim todas as entradas e saídas para treinar as redes apareceram na janela de *nntool* (Figura B.5).

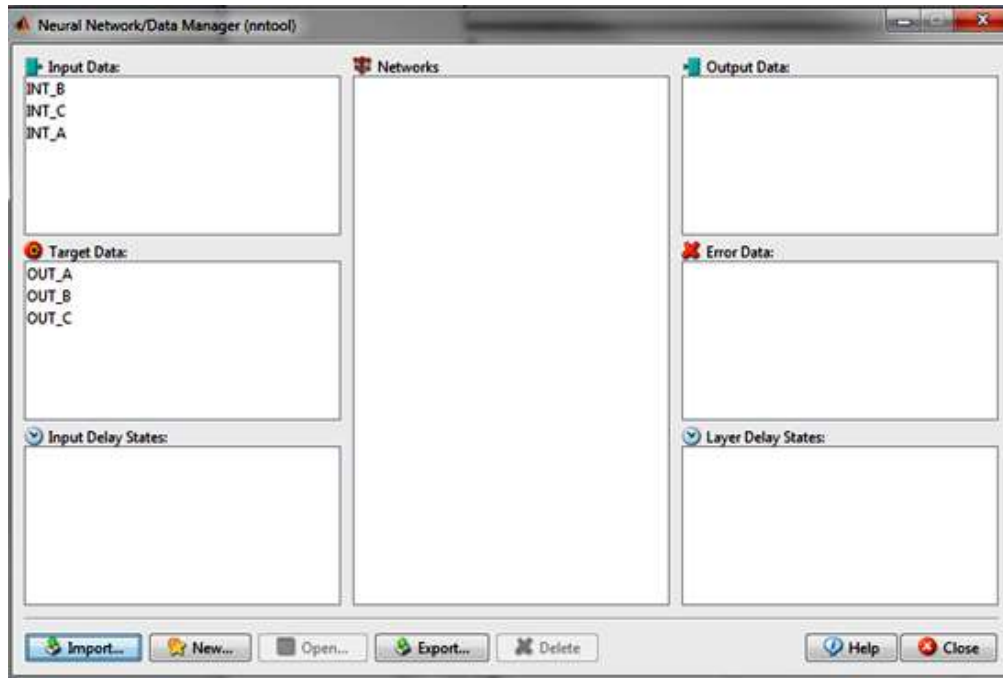


Figura B.5. Tela principal de *nntool* com estradas e saídas.

5. Criar as RNA. Ao clicar no botão “New...” aparece a seguinte janela (Figura B.6) onde se coloca o nome da rede e são assignadas as entradas e saídas para o treinamento, assim como também, os principais parâmetros da rede, por exemplo, o numero de neurônios na camada oculta, as funções de transferência das camadas, o algoritmo de treinamento, etc.

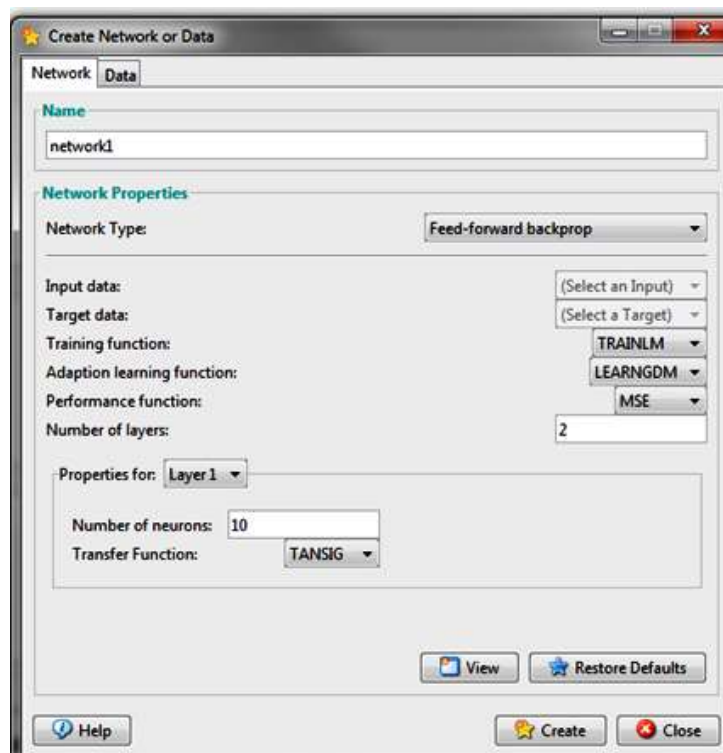


Figura B.6. Tela principal de *Create Network or Data*.

Uma vez que se tem assignado todos os parâmetros se clica no botão “Create” como mostrado na seguinte figura ( Figura B.7). Assim se faz para cada uma das redes.



Figura B.7. Tela principal de *Create Network or Data* com os dados assignados.

Uma vista da rede criada para o equipamento A é apresentada na Figura B.8

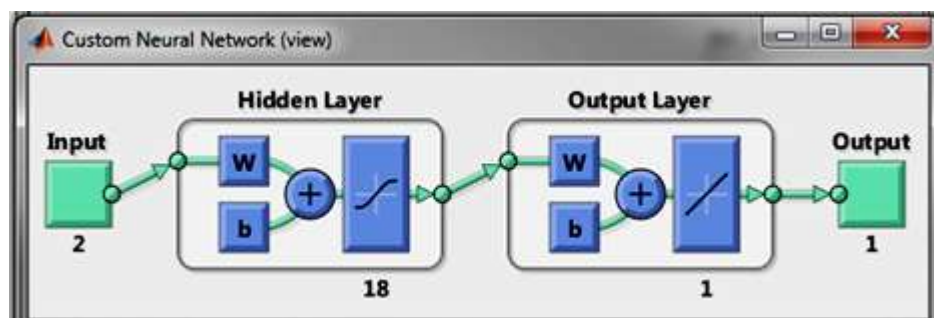


Figura B.8. Vista da rede criada para o equipamento A.

Assim na janela de *nnTool* já aparecem as redes criadas como mostrado na Figura B.9.

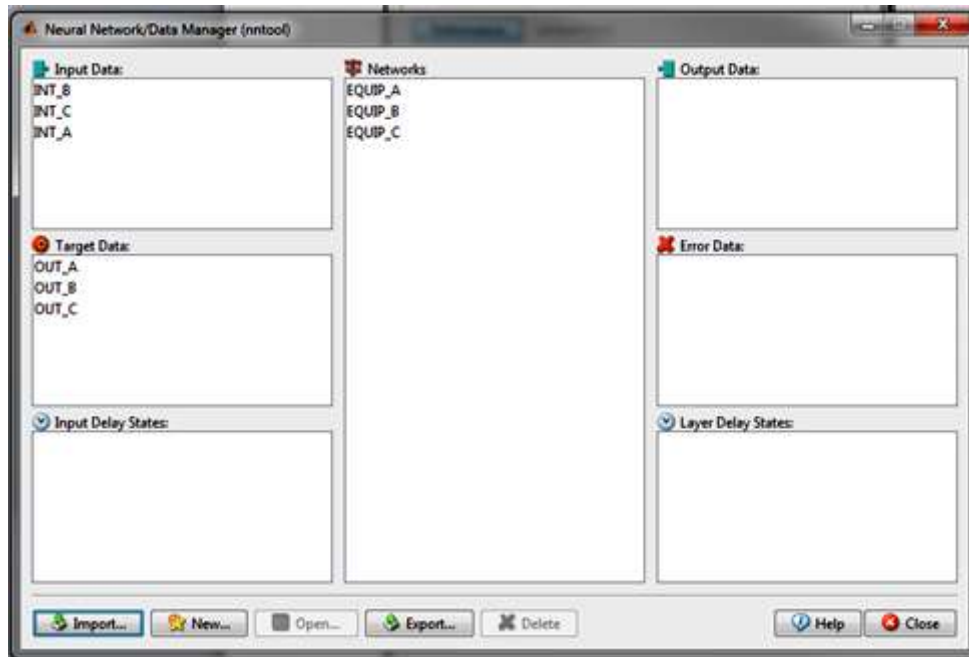


Figura B.9. Tela principal de *nntool* com estradas e saídas e redes.

6. Agora se procede a treinar cada rede. Se faz dobre clico sobre a rede que vai ser treinada, por exemplo “EQUIP\_A” que é a rede para o equipamento A. Assim aparece a seguinte janela (Figura B.10)

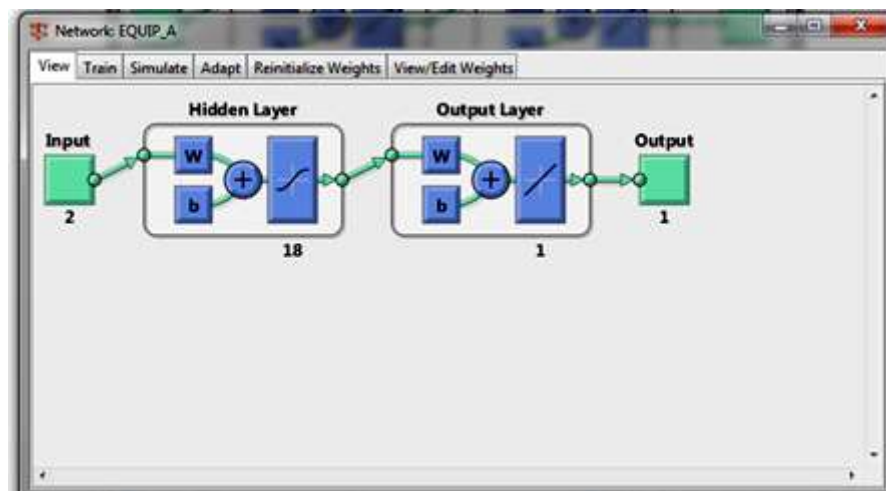


Figura B.10. Tela principal para a rede do equipamento A.

Clicar na aba “*Train*” e escolher os vetores de entrada e saída da rede para seu treinamento, isto é “*INT\_A*” e “*OUT\_A*”, como mostrado na Figura B.11. Logo clicar no botão “*Train Network*”.

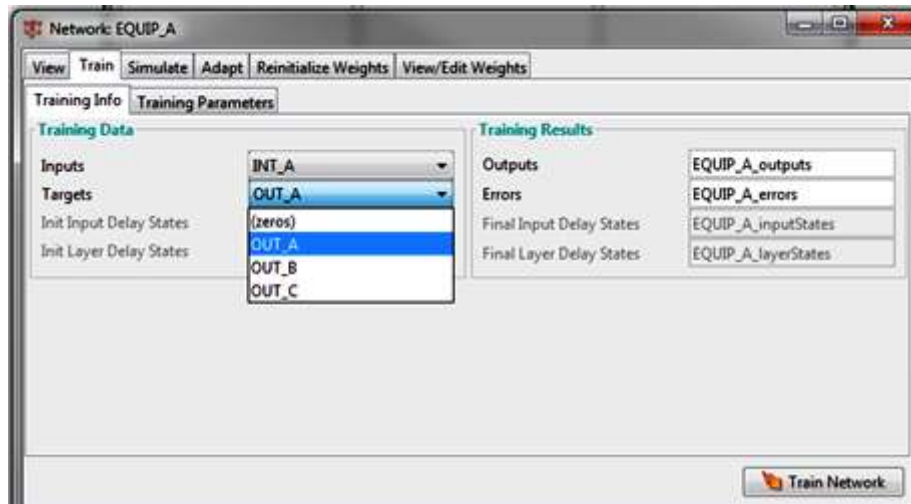


Figura B.11. Tela para treinar a rede do equipamento A.

Assim aparece uma janela que mostra o processo de treinamento da Rede (Figura B.12).

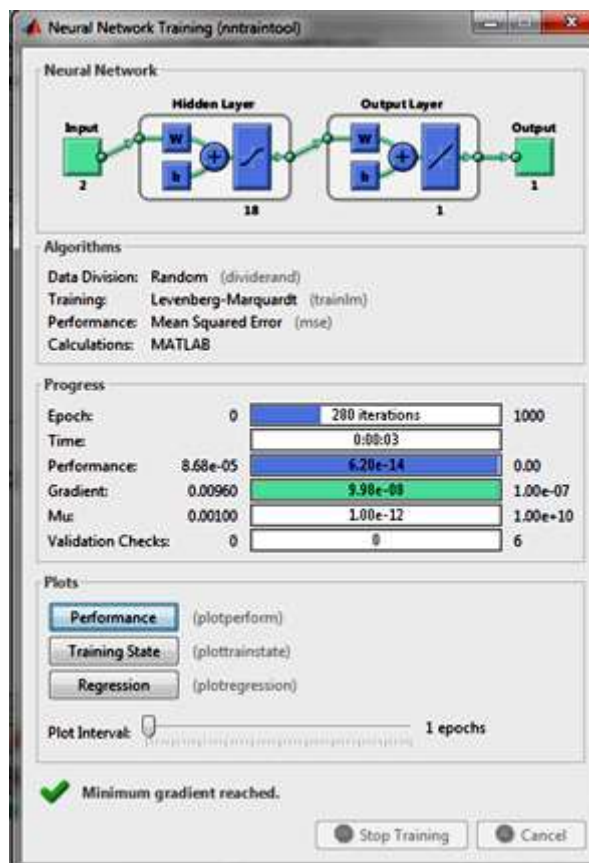


Figura B.12. Tela principal de *Neural Network Training*.

Assim é feito para cada uma das redes. Os resultados são apresentados a seguir

## B.2. RESULTADOS DO TREINAMENTO DAS RNA

**Resultados para o Equipamento A:** Os Pesos da primeira camada são apresentados na Figura B.13 e na Equação (B.1). Os Pesos da Segunda Camada são apresentados na Figura B.14 e na Equação (B.2). O Bias da primeira camada aparecem na Figura B.15 e na Equação (B.3) e O Bias da segunda camada do equipamento A aparece na Figura B.16 e na Equação (B.4).

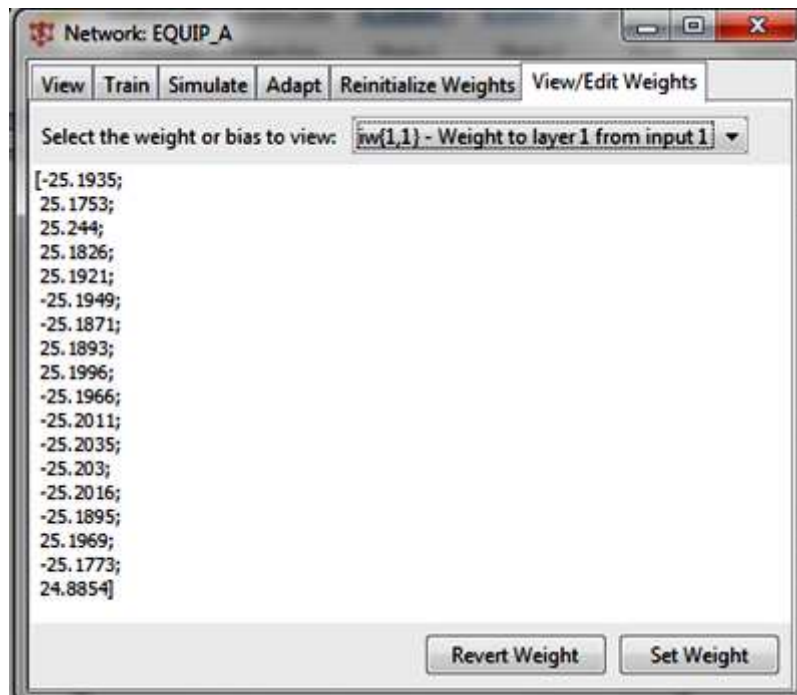


Figura B.13. Pesos da primeira camada do equipamento A.

$$iw\{1,1\}=[-25.1935; 25.1753; 25.244; 25.1826; 25.1921; -25.1949; -25.1871; 25.1893; 25.1996; -25.1966; -25.2011; -25.2035; -25.203; -25.2016; -25.1895; 25.1969; -25.1773; 24.8854] \quad (B.1)$$

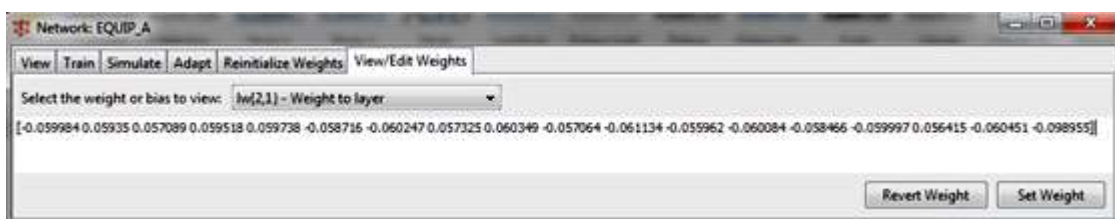


Figura B.14. Pesos da Segunda Camada do Equipamento A

$$iw_{\{2,1\}} = [-0.059984 \ 0.05935 \ 0.057089 \ 0.059518 \ 0.059738 \ -0.058716 \ -0.060247 \ 0.057325 \\ 0.060349 \ -0.057064 \ -0.061134 \ -0.055962 \ -0.060084 \ -0.058466 \ -0.059997 \ 0.056415 \ -0.060451 \\ -0.098955] \quad (B.2)$$

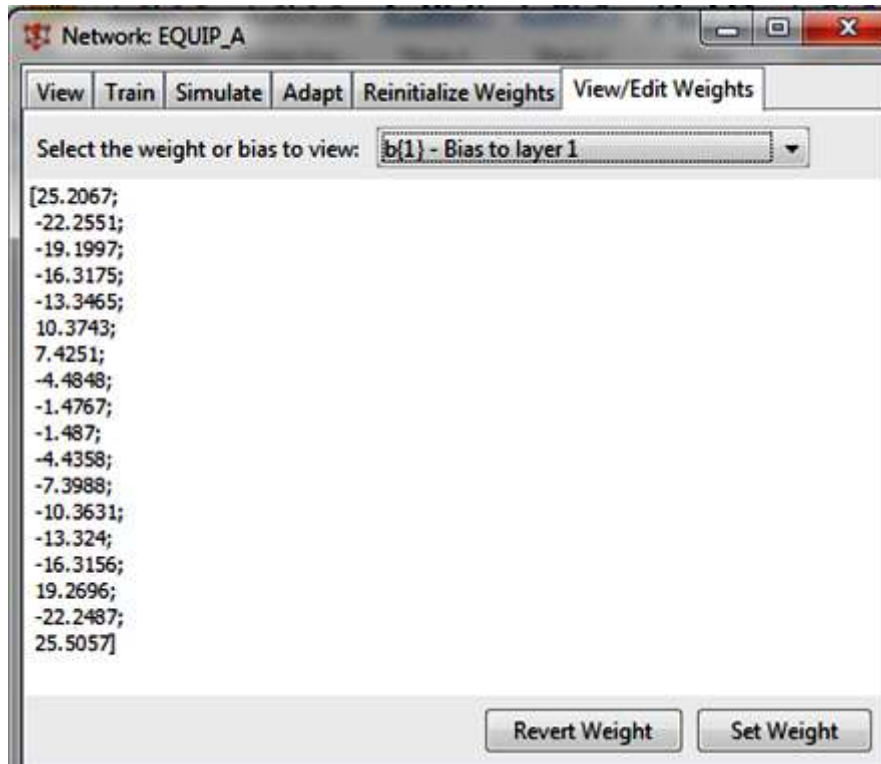


Figura B.15. Bias da primeira camada do equipamento A.

$$b_{\{1\}} = [25.2067; -22.2551; -19.1997; -16.3175; -13.3465; 10.3743; 7.4251; -4.4848; -1.4767; - \\ 1.487; -4.4358; -7.3988; -10.3631; -13.324; -16.3156; 19.2696; -22.2487; 25.5057] \quad (B.3)$$

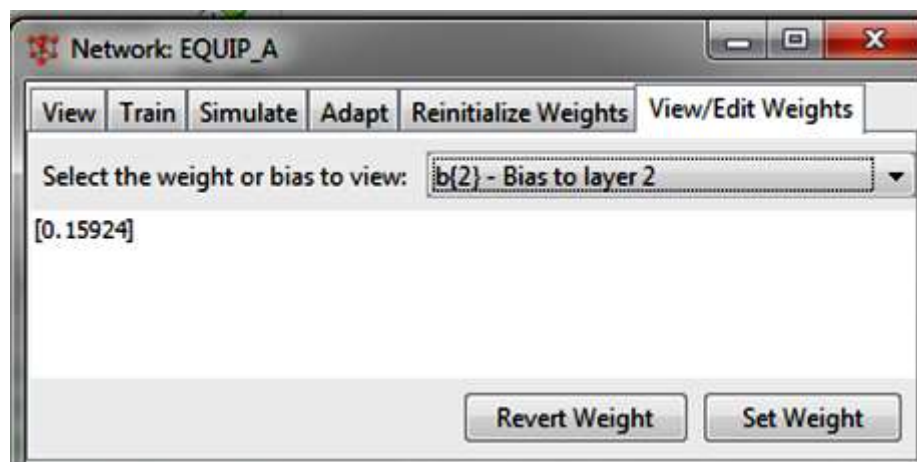


Figura B.16. Bias da segunda camada do equipamento A.

$$b\{2\}=[0.15924] \quad (B.4)$$

**Resultados para o Equipamento B:** Na Figura B.17 apresentasse um esquema da rede que foi criada para o equipamento B. Os pesos da primeira camada para B aparecem na Figura B.18 e na Equação (B.5). Os pesos da segunda camada são apresentados na Figura B.19 e na Equação (B.6). O Bias da primeira camada é mostrado na Figura B.20 e na Equação (B.7), e o Bias da segunda camada aparece na Figura B.21 e na Equação (B.8).

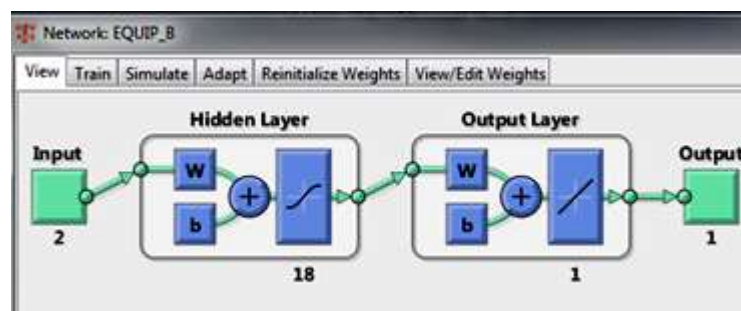


Figura B.17. Esquema da rede do Equipamento B.

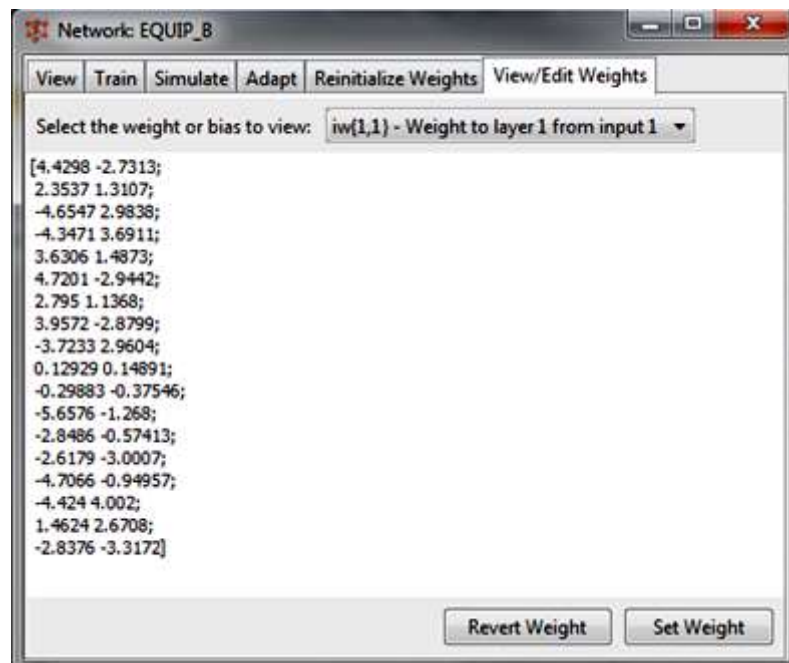


Figura B.18. Pesos da primeira camada do Equipamento B.

$$iw\{1,1\}=[4.4298 \ -2.7313; \ 2.3537 \ 1.3107; \ -4.6547 \ 2.9838; \ -4.3471 \ 3.6911; \ 3.6306 \ 1.4873; \ 4.7201 \ -2.9442; \ 2.795 \ 1.1368; \ 3.9572 \ -2.8799; \ -3.7233 \ 2.9604; \ 0.12929 \ 0.14891; \ -0.29883 \ -0.37546; \ -5.6576 \ -1.268; \ -2.8486 \ -0.57413; \ -2.6179 \ -3.0007; \ -4.7066 \ -0.94957; \ -4.424 \ 4.002; \ 1.4624 \ 2.6708; \ -2.8376 \ -3.3172]$$

0.37546; -5.6576 -1.268; -2.8486 -0.57413; -2.6179 -3.0007; -4.7066 -0.94957; -4.424 4.002;  
1.4624 2.6708; -2.8376 -3.3172] (B.5)



Figura B.19. Pesos da segunda camada do Equipamento B.

$iw_{\{2,1\}} = [-0.0014634 \quad 0.0027183 \quad 0.00092467 \quad 0.00019947 \quad 0.00029487 \quad -0.00054616$   
 $0.00015855 \quad -0.00065766 \quad 0.00049939 \quad 3.6927 \quad -0.53948 \quad 2.0583e-05 \quad -6.9006e-06 \quad -0.00040172$   
 $1.7059e-06 \quad 0.00023054 \quad 0.00042715 \quad -0.0022862]$  (B.6)

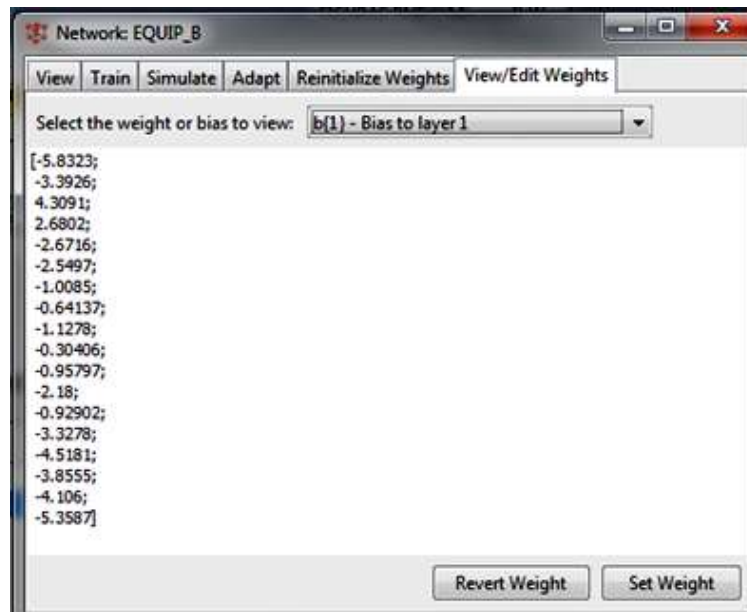


Figura B.20. Bias da primeira camada do equipamento B

$b_{\{1\}} = [-5.8323; -3.3926; 4.3091; 2.6802; -2.6716; -2.5497; -1.0085; -0.64137; -1.1278; -$   
 $0.30406; -0.95797; -2.18; -0.92902; -3.3278; -4.5181; -3.8555; -4.106; -5.3587]$   
(B.7)

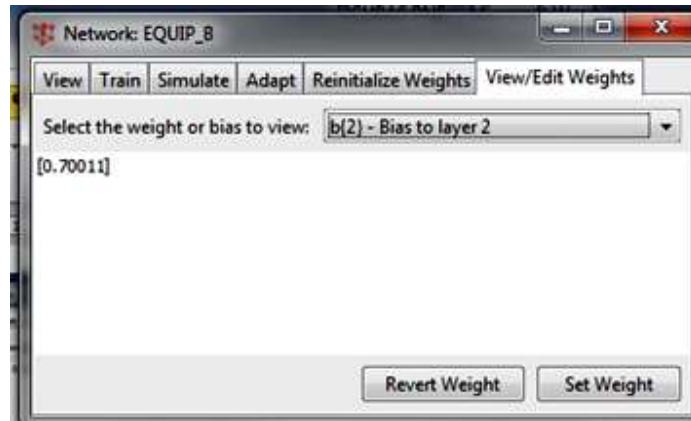


Figura B.21. Bias da Segunda camada do equipamento B.

$$b\{2\}=[0.70011] \quad (B.8)$$

**Resultados para o Equipamento C:** Na Figura B.22 apresentasse um esquema da rede que foi criada para o equipamento C. Os Pesos da primeira camada são mostrados na Figura B.23 e na Equação (B.9). Os Pesos da segunda camada são mostrados na Figura B.24 e na Equação (B.10). O Bias da primeira camada apresenta-se na Figura B.25 e na Equação (B.11). Figura B.26. Bias da segunda camada do Equipamento C. O bias da segunda camada se mostra na Figura B.26 assim como na Equação (B.12).

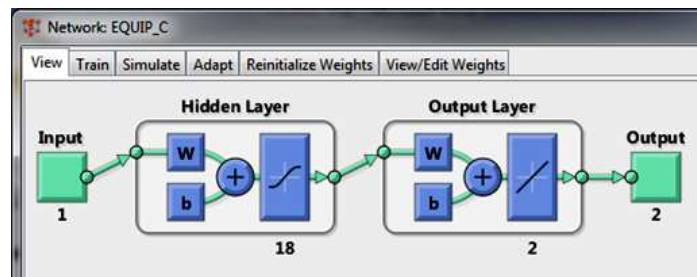


Figura B.22. Esquema da rede para o equipamento C.

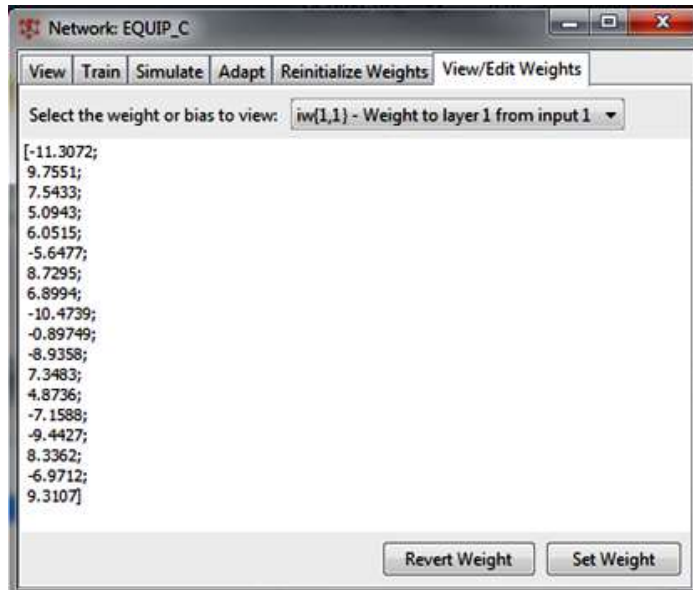


Figura B.23. Pesos da primeira camada do Equipamento C

$$iw\{1,1\} = [-11.3072; 9.7551; 7.5433; 5.0943; 6.0515; -5.6477; 8.7295; 6.8994; -10.4739; -0.89749; -8.9358; 7.3483; 4.8736; -7.1588; -9.4427; 8.3362; -6.9712; 9.3107]$$

(B.9)

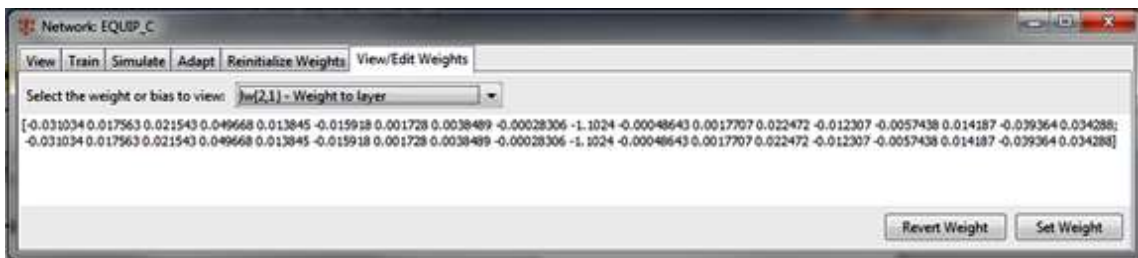


Figura B.24. Pesos da segunda camada do Equipamento C

$$iw\{2,1\} = [-0.031034 \ 0.017563 \ 0.021543 \ 0.049668 \ 0.013845 \ -0.015918 \ 0.001728 \ 0.0038489 \ -0.00028306 \ -1.1024 \ -0.00048643 \ 0.0017707 \ 0.022472 \ -0.012307 \ -0.0057438 \ 0.014187 \ -0.039364 \ 0.034288; -0.031034 \ 0.017563 \ 0.021543 \ 0.049668 \ 0.013845 \ -0.015918 \ 0.001728 \ 0.0038489 \ -0.00028306 \ -1.1024 \ -0.00048643 \ 0.0017707 \ 0.022472 \ -0.012307 \ -0.0057438 \ 0.014187 \ -0.039364 \ 0.034288]$$

(B.10)

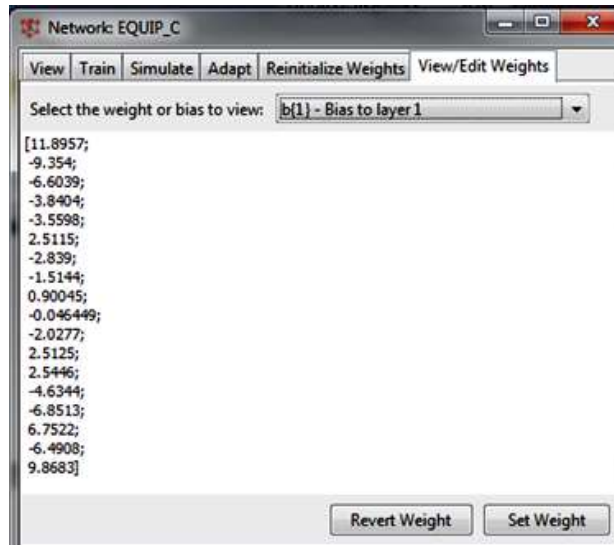


Figura B.25. Bias da primeira camada do Equipamento C.

$$b\{1\}=[11.8957; -9.354; -6.6039; -3.8404; -3.5598; 2.5115; -2.839; -1.5144; 0.90045; -0.046449; -2.0277; 2.5125; 2.5446; -4.6344; -6.8513; 6.7522; -6.4908; 9.8683]$$

(B.11)

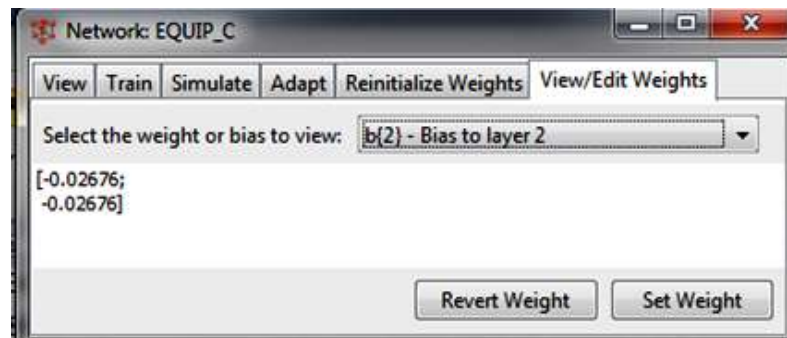


Figura B.26. Bias da segunda camada do Equipamento C.

$$b\{2\}=[-0.02676; -0.02676]$$

(B.12)

### B.3. SIMULAÇÃO DAS RNA DOS EQUIPAMENTOS A, B E C.

Para simularas RNA devem-se seguir as seguintes etapas:

1. Cria-se um arquivo no Excel que vai conter os dados para a simulação das redes, isto é os dados de exergia da condição real que serão as entradas das redes que foram criadas para os equipamentos A, B, C. O arquivo foi chamado de “SIM-SIMPLES.xlsx” contendo as entradas E<sub>1</sub> e E<sub>7</sub> para o equipamento A, E<sub>2</sub> e E<sub>5</sub> para o equipamento B e E<sub>3</sub> para o equipamento C como mostrado na Figura B.27.

	A	B	C	D	E
1	E1A	E7A	E2B	E5B	E3C
2	0	6,666667	5,333333	103,5437	37,79289
3					
4					

Figura B.27. Tela principal do arquivo SIM-SIMPLES.xlsx

2. Escreve-se uma rotina em MATLAB para carregar os dados para simular as redes. A rotina é apresentada a seguir .

```

%CARREGAR OS DADOS PARA SIMULAR A REDE DE CADA COMPONENTE
SIMUL_SIMPLES=xlsread('SIM-SIMPLES.xlsx');
%CRIAR AS VARIÁVEIS PARA SIMULAR O COMPONENTE A
E1S_A=(SIMUL_SIMPLES(:,1));
E7S_A=(SIMUL_SIMPLES(:,2));
% SE DEFINE O VETOR DE SIMULAÇÃO PARA A
SIMA=[E1S_A E7S_A]';
%CRIAR AS VARIÁVEIS PARA SIMULAR O COMPONENTE B
E2S_B=(SIMUL_SIMPLES(:,3));
E3S_B=(SIMUL_SIMPLES(:,4));
% SE DEFINE O VETOR DE SIMULAÇÃO PARA B
SIMB=[E2S_B E3S_B]';
%CRIAR AS VARIÁVEIS PARA SIMULAR O COMPONENTE C
E3S_C=(SIMUL_SIMPLES(:,5));
% SE DEFINE O VETOR DE SIMULAÇÃO PARA C
SIMC=[E3S_C]';

```

3. Importam-se os dados (SIMA, SIMB, SIMC) para simular as redes que agora vão aparecer na janela *nttool* como mostrado na Figura B.28.

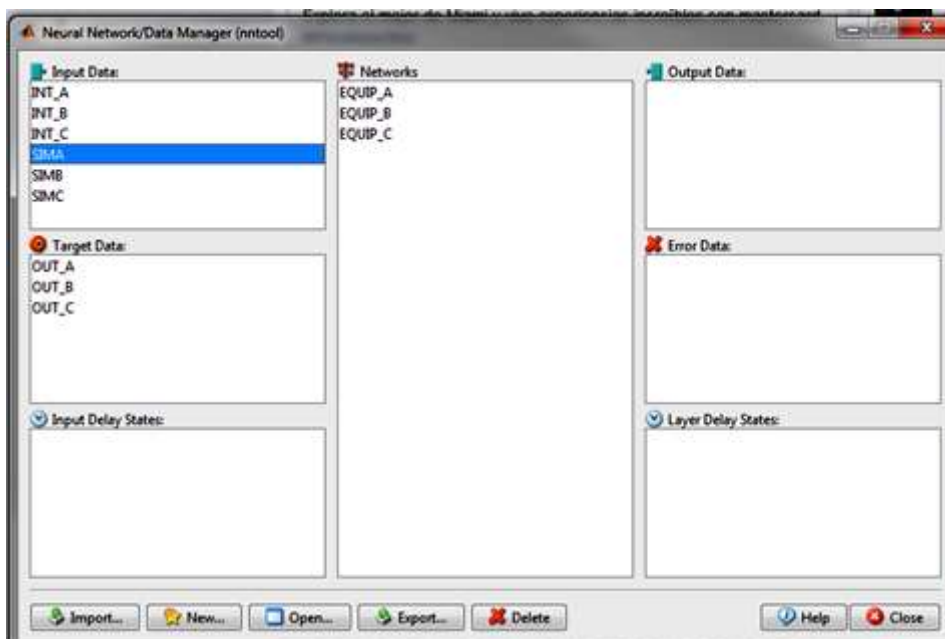


Figura B.28. Tela principal de *nntool* com dados para simular as RNA

Logo clicar sobre a rede que vai ser simulada, por exemplo, “*EQUIP\_A*”. Aparece novamente a janela “*Network:AQUIP\_A*” e na aba “*Simulate*” é escolhido o vetor para simular a rede do equipamento A, neste caso é o vetor “*SIMA*”. Logo clicar no botão “*Simulate Network*”. Aparecerá a seguinte mensagem (Figura B.29).

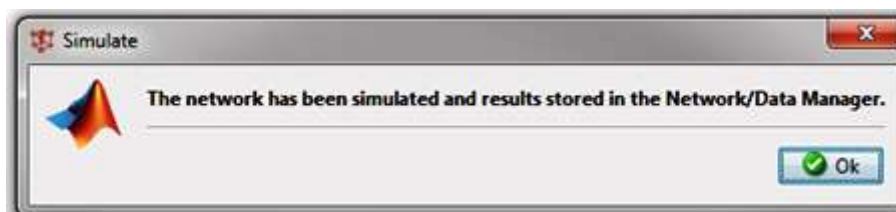


Figura B.29. Mensagem que indica sucesso na simulação de uma RNA.

É feito o mesmo procedimento para cada rede. No final na janela *nntool* apareceram os resultados das simulações como mostrado na Figura B.29.

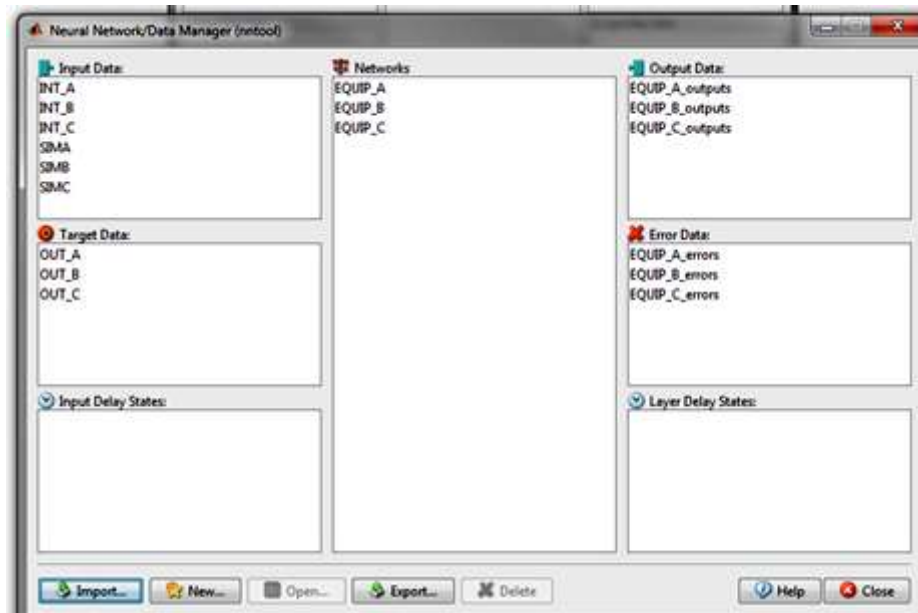


Figura B.30. Tela principal de *nntool* com todos os resultados das simulações

Logo os resultados (*EQUIP\_A\_outputs*, *EQUIP\_B\_outputs*, *EQUIP\_C\_outputs*) são exportados para o “*MATLAB workspace*”. Para tal fim se clica no botão “Export...” da janela *nntool* e se escolhem os três elementos: *EQUIP\_A\_outputs*, *EQUIP\_B\_outputs* e *EQUIP\_C\_outputs*, e se clica no botão “Export” como mostrado na Figura B.30.

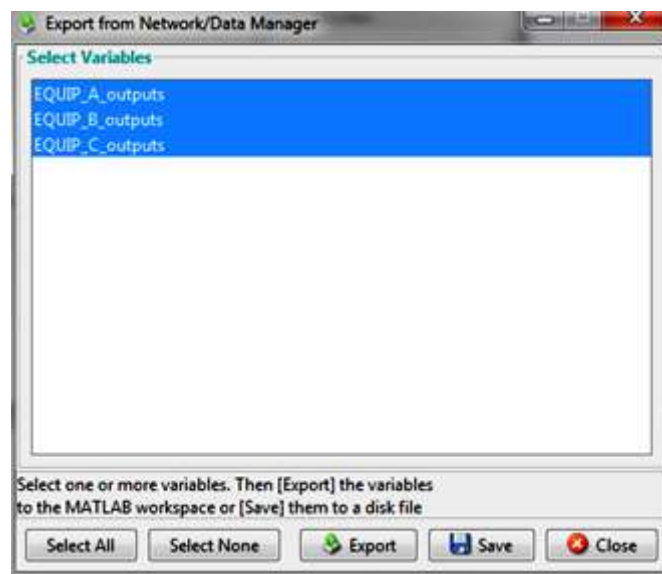


Figura B.31.. *Export from Network* de Matlab.

4. Escreve-se uma rotina em MATLAB para extrair os dados das simulações. Esta rotina é apresentada a seguir.

**%ENCONTRAR O VETOR DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO**

```
SAIDAS_A=(EQUIP_A_outputs)'
SAIDAS_B=(EQUIP_B_outputs)'
SAIDAS_C=(EQUIP_C_outputs)'
```

**Resultados das simulações:** as saídas das simulações mostram os seguintes resultados (Figura B.31)

```
SAIDAS_A [5.3291;5.3291]
SAIDAS_B [37.7929;37.0370]
SAIDAS_C [18.8964 17.0068;18.5185 16.6667]
```

Figura B.32.. Saídas das RNA para A, B e C no *MATLAB workspace*.

Os resultados são apresentados na Tabela B.1

Tabela B.1. Resultados das simulações das RNA do sistema simples

Saída Equipamento A	Saída Equipamento B	Saídas Equipamento C	
E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	E <sub>6</sub>
5,33	37,79	18,90	17,01

# APÊNDICE C. DESCRIÇÃO DAS REDES USADAS PARA SIMULAR UM CICLO EFGT NUM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO

## REDES

### Compressor (COMP1)

Variáveis de entrada (M1 e P2); variáveis de saída (T2 e Wc)

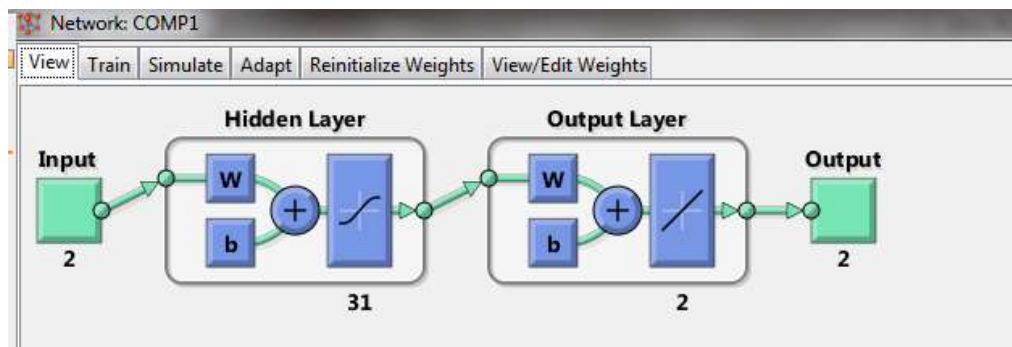


Figura C.1. Esquema da RNA para o compressor

### Pesos da primeira camada

$Iw_{\{1,1\}} = [3.4639 \ -2.3578; 2.4317 \ 7.7486; 5.0596 \ 1.8233; 2.3821 \ -5.8416; -0.32331 \ 6.0207; -6.5574 \ -1.4122; 2.5015 \ 7.6786; -1.2331 \ 1.0955; 4.3597 \ 6.2065; -7.3673 \ 3.7997; 6.4353 \ 2.7469; -0.56234 \ 0.9382; 7.3991 \ 3.0306; 0.31105 \ 0.097186; -1.9161 \ 1.8126; 0.91881 \ -7.3053; 5.8459 \ -4.8653; 2.2609 \ 5.7873; -9.2402 \ -3.748; 6.1676 \ -5.5087; -7.5152 \ -2.2842; 4.4759 \ -3.9132; 5.2684 \ -4.4485; 6.7069 \ 1.4901; -5.8659 \ -0.9347; 2.8108 \ -6.8136; 5.0377 \ -4.2596; -6.9921 \ -0.7353; -4.8146 \ 5.8045; -5.4334 \ 5.2623; 5.2838 \ -4.6265]$

### Pesos da segunda camada

$Iw_{\{2,1\}} = [-0.18398 \ 0.0016278 \ 0.021818 \ -0.0055332 \ 0.0070013 \ -0.010267 \ 0.0030316 \ 0.30946 \ 0.0010494 \ -0.0033554 \ 0.080227 \ 0.15672 \ -0.062668 \ 2.2572 \ 0.13988 \ 0.00064279 \ -0.0075673 \ -0.0013739 \ -0.010002 \ -0.02224 \ -0.013405 \ -0.06491 \ -0.048626 \ 0.016887 \ -0.023283 \ 0.00026953 \ -0.073656 \ -0.027361 \ -0.20155 \ 0.28558 \ -0.069414; -0.24633 \ 0.00039752 \ 0.021237 \ -0.0078811 \ 0.005691 \ -0.009812 \ 0.0029884 \ 0.44892 \ 0.001287 \ -0.0035205 \ 0.10762 \ 0.2612 \ -0.085836 \ 2.1835 \ 0.21535 \ 0.0010067 \ -0.012593 \ -0.0017058 \ -0.013296 \ -0.035175 \ -0.018348 \ -0.10151 \ -0.07608 \ 0.023136 \ -0.031364 \ -0.0049373 \ -0.11592 \ -0.036441 \ -0.33496 \ 0.46252 \ -0.11383]$

### Bias da primeira camada

$B_{\{1\}} = [-5.8189; -7.3047; -4.8384; -5.0017; -4.9414; 4.4365; -4.4281; 1.1635; -3.0751; 2.6809; -1.8568; 1.0601; -2.1691; -0.047196; 0.25841; 0.62682; -0.21652; 1.8941; -1.1956; 1.3612; -2.9083; 2.1671; 3.8755; 4.1602; -4.9484; 5.0137; 4.8691; -7.3201; -6.6385; -7.082; 8.2859]$

### Bias da segunda camada

$B\{2\} = [-0.1529; -0.23116]$

### TURBINA (TURB1)

Variáveis de entrada (M3, P3, T3); variáveis de saída (T4, WTG)

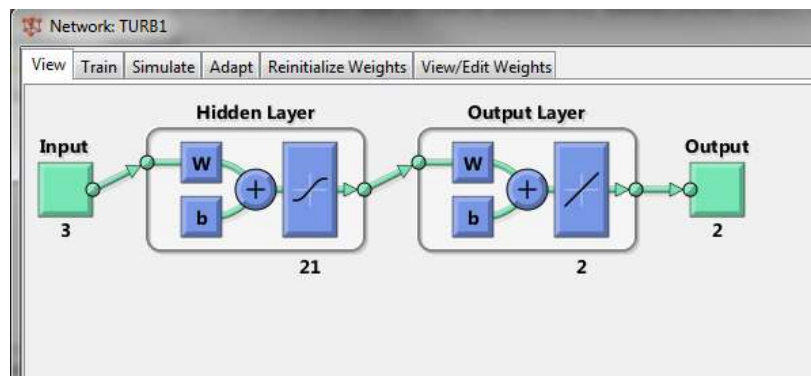


Figura C.2. Esquema da RNA para a turbina

### Pesos da primeira camada

$Iw\{1,1\} = [-0.084753 \ 0.35378 \ -1.8713; \ 2.8402 \ -0.13538 \ 1.8615; \ -0.86402 \ 3.0846 \ -1.2558; \ -2.7764 \ -2.0576 \ 0.47713; \ 1.8585 \ 0.16464 \ -1.7831; \ 0.064649 \ 0.10987 \ 0.35542; \ 2.3153 \ 2.4509 \ 2.8961; \ 1.8944 \ -2.8183 \ 0.83168; \ 2.7971 \ -2.0857 \ 0.58022; \ 0.35197 \ -2.4424 \ 2.3832; \ 0.35691 \ -1.7667 \ 1.9591; \ -0.71785 \ -2.7706 \ -1.3148; \ -0.33999 \ 1.0518 \ -1.8535; \ -2.6358 \ 0.19881 \ -1.1823; \ 1.9392 \ -0.29324 \ 0.90243; \ -0.61189 \ 1.5934 \ -1.3357; \ -1.7776 \ -2.9165 \ -1.6931; \ -0.8254 \ -2.5569 \ -1.266; \ 2.4575 \ 0.49756 \ 0.7897; \ 0.78356 \ 0.69011 \ -0.73635; \ -1.6249 \ -0.85651 \ 0.55473]$

### Pesos da segunda camada

$Iw\{2,1\} = [-0.10026 \ -0.0019647 \ 0.454 \ 0.0015637 \ 0.00037898 \ 1.267 \ -6.337e-05 \ 0.00075326 \ 1.8039e-05 \ -0.19912 \ 0.80852 \ -0.00016839 \ -0.34824 \ -0.0023828 \ 0.017834 \ 0.65715 \ 0.00015498 \ -0.00010425 \ -0.0017985 \ -0.13372 \ -0.054432; \ -0.11856 \ 0.0091336 \ 0.46564 \ -0.0024853 \ 0.0015249 \ 1.8421 \ 0.00049179 \ -0.001624 \ 0.0012023 \ -0.5522 \ 0.85341 \ -0.00035103 \ -0.43671 \ 0.0029543 \ -0.010396 \ 0.065001 \ -0.00048954 \ 0.001353 \ 0.0001402 \ 0.13631 \ 0.025937]$

### Bias da primeira camada

$B\{1\} = [-1.5547; \ -3.7012; \ 3.5657; \ 2.9256; \ -1.7219; \ -0.62287; \ -1.804; \ -1.0771; \ -0.47972; \ -0.1457; \ -0.37584; \ -0.065316; \ -0.51449; \ -0.23439; \ 1.313; \ -0.26294; \ -2.604; \ -2.3621; \ 1.9921; \ 1.784; \ -2.4154]$

### Bias da segunda camada

$B\{2\} = [0.47365; \ 0.40222]$

## QUEIMADOR (COMB1)

Variáveis de entrada (T4, M4, M7); variável de saída (T5)

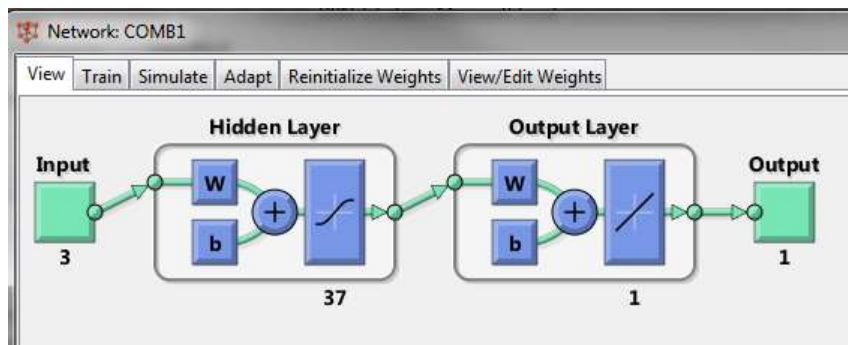


Figura C.3. Esquema da RNA para o queimador

### Pesos da primeira camada

$Iw\{1,1\} = [1.1143 \ -3.157 \ 2.2493; \ -3.0412 \ -3.4395 \ -0.70369; \ 2.7957 \ -1.6861 \ -3.3696; \ 2.904 \ 2.5177 \ -2.792; \ -2.1072 \ -2.7967 \ 3.0092; \ -2.5849 \ -1.639 \ -3.6007; \ -0.27053 \ -0.43822 \ 2.4667; \ 4.1362 \ -1.4293 \ -0.12116; \ 1.3713 \ -3.47 \ 2.1222; \ -4.0319 \ 2.1676 \ -1.531; \ -1.333 \ -2.2512 \ -3.5203; \ -1.909 \ 1.7858 \ 2.1339; \ -1.1454 \ 3.0696 \ -2.2133; \ 0.25642 \ -0.24891 \ -0.87358; \ -0.92282 \ 2.7619 \ -2.6426; \ 0.77668 \ -2.7587 \ 3.3509; \ -2.2623 \ -3.7745 \ -0.50046; \ 2.8925 \ -1.3662 \ 1.1335; \ -2.8133 \ -2.8116 \ 2.5331; \ -3.4574 \ -2.5846 \ -1.3093; \ 1.1879 \ 3.8295 \ 0.60386; \ 1.5518 \ 3.6362 \ 2.2414; \ -1.5729 \ 3.3533 \ -0.91754; \ 3.137 \ -1.3898 \ 1.6296; \ 0.17026 \ 4.7805 \ -0.19581; \ -1.5472 \ 1.6993 \ 4.2036; \ -0.086728 \ -4.2042 \ -2.4212; \ -2.6449 \ 1.6431 \ 2.0091; \ 1.6275 \ -1.2892 \ -1.5822; \ -2.6663 \ -3.3901 \ -1.9421; \ -4.6956 \ 0.55731 \ 0.018545; \ -0.31787 \ 3.6631 \ -2.3719; \ -2.8514 \ -1.9685 \ 1.8954; \ -2.024 \ 3.0142 \ 2.5378; \ -1.035 \ 0.28876 \ 4.1653; \ 2.032 \ 2.3976 \ 2.5905; \ 2.5935 \ -2.4183 \ 2.2538]$

### Pesos da segunda camada

$Iw\{2,1\} = [0.0045306 \ 8.6036e-05 \ 0.37748 \ 4.3633e-06 \ 1.4902e-05 \ -0.0015312 \ 0.0613 \ -0.001723 \ 0.0014451 \ -0.00025152 \ -0.00080417 \ -0.25136 \ -0.003815 \ -1.5908 \ -0.012218 \ -0.0070758 \ -3.1731e-05 \ 0.00083141 \ 6.1883e-05 \ -2.4826e-05 \ -0.0001582 \ 0.00010751 \ -0.0012127 \ 0.00033793 \ 8.4368e-05 \ 0.22089 \ -0.00027304 \ -0.1274 \ 0.30785 \ -6.7846e-05 \ -0.00010723 \ 8.0872e-05 \ -0.00023448 \ -0.12311 \ 0.041574 \ -0.00105 \ 0.00027017]$

### Bias da primeira camada

$B\{1\} = [-3.9462; \ 3.5435; \ -4.0589; \ -4.1826; \ 3.5309; \ 3.1887; \ -1.7893; \ -2.415; \ -2.4581; \ 1.8195; \ 1.75; \ 0.71135; \ 1.6139; \ -0.13249; \ 0.49534; \ -0.54942; \ 0.46594; \ -0.28596; \ 0.035897; \ 0.19566; \ 1.2122; \ 1.1653; \ -0.80028; \ 0.86795; \ 1.9794; \ -3.5594; \ 2.4912; \ -2.217; \ 0.53254; \ -2.4331; \ -1.9539; \ -3.4668; \ -3.9497; \ -4.3416; \ -3.6527; \ 4.8077; \ 5.1157]$

### Bias da segunda camada

$B\{2\} = [0.35783]$

## TROCADOR (TROCA1)

Variáveis de entrada (M2, T2, M5, T5); Variáveis de saída (T3, T6)

### **Pesos da primeira camada**

$Iw\{1,1\} = [-1.8744 \ 0.42064 \ -0.84097 \ -2.8058; \ -0.65345 \ 0.5392 \ -3.4014 \ -0.34878; \ -2.2014 \ 2.3186 \ 0.44094 \ -0.30376; \ -2.3785 \ -0.82091 \ 0.44707 \ 1.6024; \ 2.0555 \ 2.5779 \ 1.121 \ 1.1775; \ -0.39045 \ -1.9055 \ 1.7399 \ 1.7857; \ -0.75209 \ 2.3194 \ -1.7424 \ -1.7907; \ 1.5091 \ -1.4242 \ 1.5705 \ 0.68545; \ -0.52797 \ -2.138 \ -0.79781 \ -2.498; \ 0.39003 \ 0.97852 \ -2.0527 \ -0.98585; \ 2.7647 \ 0.80354 \ -1.7368 \ -0.20654; \ 1.3394 \ 0.75043 \ -2.9162 \ 0.58815; \ 0.33827 \ 1.5324 \ 0.0020165 \ -1.0863; \ 1.5414 \ -1.9969 \ 0.67562 \ -1.8714; \ 1.5971 \ 1.283 \ -2.544 \ -0.7278; \ -1.4324 \ 1.719 \ 0.52533 \ 2.0813; \ -2.1461 \ 1.7547 \ -0.3871 \ -0.076098; \ 2.8051 \ 0.20699 \ 1.2328 \ -1.6852; \ -2.3462 \ 1.0663 \ -0.4612 \ -0.68587; \ 1.7756 \ -1.3288 \ 0.176 \ 1.4226; \ 1.9426 \ -0.38806 \ -1.7011 \ 0.95966; \ 1.5225 \ 1.8772 \ -1.2786 \ -1.8077; \ 0.54686 \ -1.4862 \ 0.87939 \ 0.66311; \ 0.94253 \ -0.23834 \ -2.5274 \ 0.62729; \ 0.21288 \ -2.1174 \ -1.7865 \ -0.045958; \ -0.77743 \ 1.4433 \ -2.1123 \ -0.74668; \ -1.989 \ 1.4314 \ -1.6031 \ 0.046866; \ -0.98358 \ 2.3187 \ 1.1771 \ 1.4956; \ 1.6257 \ -0.43922 \ -0.058115 \ -1.4626; \ -2.5635 \ 1.4058 \ 1.4383 \ -0.66871; \ -2.4709 \ 2.0612 \ -0.81348 \ -0.11039; \ -1.0426 \ 2.4532 \ 0.47663 \ 2.0164; \ 2.4216 \ 0.84967 \ -2.0264 \ 0.77145; \ 0.81476 \ 2.3275 \ 1.5469 \ 1.9903; \ -0.66148 \ -1.4821 \ 1.9908 \ -1.0081; \ 1.9476 \ 2.6122 \ 0.41249 \ 0.0033137; \ 1.19 \ -1.1553 \ 1.4086 \ -1.4718]$

### **Pesos da segunda camada**

$Iw\{2,1\} = [-0.010065 \ 0.0024622 \ 0.88855 \ 0.0027673 \ 3.4739e-05 \ 0.56327 \ -0.51033 \ 0.1317 \ 0.00010218 \ -0.17742 \ 0.082201 \ 0.62599 \ 0.12932 \ -0.00081743 \ -0.87988 \ -0.00049154 \ 0.027302 \ 0.00025129 \ -0.039855 \ 0.16802 \ 0.70508 \ 0.0038148 \ -1.266 \ 0.1906 \ -8.12e-05 \ -0.13139 \ 0.019111 \ 0.00026942 \ -0.02526 \ 0.059534 \ -0.51193 \ -0.00015491 \ 0.057406 \ 0.00032604 \ 0.17339 \ -0.00040857 \ -0.13158; \ -0.060819 \ 0.0020556 \ -0.59992 \ -0.0026499 \ 5.2355e-05 \ -0.14275 \ 0.17099 \ -0.030119 \ 0.00067622 \ -0.75678 \ -0.019686 \ -0.36827 \ -0.00011573 \ -0.00077504 \ -0.78006 \ -0.00088032 \ 0.16538 \ 0.00041297 \ -0.007845 \ 0.69175 \ 0.073464 \ 0.0056167 \ -1.744 \ -0.014688 \ -4.0176e-05 \ -0.086518 \ 0.01773 \ 0.001629 \ -0.041159 \ -0.0072539 \ -0.51801 \ -0.0010415 \ 0.41874 \ 0.00080438 \ -0.582 \ -0.00031508 \ -0.24519]$

### **Bias da primeira camada**

$B\{1\} = [3.1095; \ 3.041; \ 3.1435; \ 2.7485; \ -1.9541; \ 2.2555; \ 2.2962; \ -0.9738; \ 1.5976; \ 0.60196; \ -2.1465; \ -2.2786; \ -0.8284; \ -1.0714; \ -0.045024; \ 0.69818; \ -0.81134; \ 0.076434; \ -0.22883; \ 0.53352; \ -0.00018353; \ 0.66595; \ 0.1844; \ 0.89998; \ -0.85591; \ -1.2329; \ -2.5036; \ -1.8726; \ 1.4471; \ -2.6067; \ -2.5072; \ -2.0764; \ 2.7188; \ 2.8747; \ -3.463; \ 3.3584; \ 2.8236]$

### **Bias da segunda camada**

$B\{2\} = [-0.25567; \ -0.81575]$

# APÊNDICE D. COMPARATIVA DOS FLUXOS DE EXERGIA PARA O CICLO EFGT TEMDO EM CONTA OU NÃO A EXERGIA QUÍMICA DO AR E GASES DE COMBUSTÃO

## D.1. Equações para calcular a exergia física e química

Exergia física:

$$ef_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0)$$

A exergia física da mistura seria:

$$ef = \sum_i x_i * ef_i$$

Exergia química de uma mistura de gases ideais:

$$eq = \sum_i x_i \bar{b}_{qi} + \bar{R}T_0 \sum_i x_i \ln x_i$$

Onde  $\bar{b}_{qi}$  é a exergia química padrão para o elemento  $i$ , obtida de Kotas (1995),  $x_i$  é a fração molar do elemento dentro da mistura  $\bar{R}$  é a constante universal dos gases ideais ( $\bar{R} = 8,314472 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}$ ) e  $T_0$  é a temperatura do ambiente de referência. Para determinar as propriedades termodinâmicas  $h$  e  $s$  dos fluidos se utilizou a ferramenta REFPROP desenvolvido por NIST (*National institute of Standards and Technology*) dos Estados unidos

A composição em fração molar dos fluidos é apresentada na Tabela D.1

Tabela D.1. Composição das substâncias usadas pela GateCycle para simular o ciclo EFGT

	Elemento	Composição da Substancia		
		Ar	Gases	Combustível
Ar[1]	argon	0,0093	0,0087	-
CO2[1]	carbon dioxide	0,0003	0,0675	-
H2O[1]	water	0,0101	0,0247	-
N2[1]	nitrogen	0,7730	0,7296	-
O2[1]	oxygen	0,2074	0,1694	-
H2	hydrogen	-	-	0,1002
CO	carbon monoxide	-	-	0,3891
CO2	carbon dioxide	-	-	0,4516
CH4	methane	-	-	0,0486
C2H6	ethane	-	-	0,0014
N2	nitrogen	-	-	0,0093

A exergia química padrão é apresentada na Tabela D.2

Tabela D.2. Exergia química padrão das substâncias usadas no GateCycle para simular o ciclo EFGT

	Elemento	Exergia química padrão[kJ/kmol]
Ar[1]	argon	11690
CO2[1]	carbon dioxide	20140
H2O[1]	water	11710
N2[1]	nitrogen	720
O2[1]	oxygen	3970
H2	hydrogen	238490
CO	carbon monoxide	275430
CO2	carbon dioxide	20140
CH4	methane	836510
C2H6	ethane	1504360
N2	nitrogen	720

**D.2. Comparativa dos fluxos de exergia e resultados do diagnóstico para os 15 casos do ciclo EFGT com e sem exergia química.**

Tabela D.3. Fluxos de exergia caso 1

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,71	3,71
2- Ar sai do compressor	138,97	146,23	142,50	142,65	149,95	146,21
3-Ar que sai do trocador	490,62	518,75	518,75	494,31	522,46	522,46
4- Ar que sai da Turbina	202,12	216,47	216,47	205,80	220,19	220,18
5- Gases que saem do queimador	470,12	502,58	502,65	497,26	531,37	531,43
6- Gases que saem do trocador	92,10	103,09	103,09	119,24	131,88	131,88
7- Combustível	388,77	411,17	411,17	399,22	422,22	422,22
8-Potência do compressor	162,32	175,18	166,27	162,32	175,18	166,27
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,05	100,05	99,78	100,05	100,05
11-Potência de eixo da turbina	267,98	281,34	281,36	267,98	281,34	281,36

Tabela D.4. Resultados do diagnóstico caso 1

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,71	3,71
2- Ar sai do compressor	138,97	146,23	142,50	142,65	149,95	146,21
3-Ar que sai do trocador	490,62	518,75	518,75	494,31	522,46	522,46
4- Ar que sai da Turbina	202,12	216,47	216,47	205,80	220,19	220,18
5- Gases que saem do queimador	470,12	502,58	502,65	497,26	531,37	531,43
6- Gases que saem do trocador	92,10	103,09	103,09	119,24	131,88	131,88
7- Combustível	388,77	411,17	411,17	399,22	422,22	422,22
8-Potência do compressor	162,32	175,18	166,27	162,32	175,18	166,27
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,05	100,05	99,78	100,05	100,05
11-Potência de eixo da turbina	267,98	281,34	281,36	267,98	281,34	281,36

Tabela D.5. Fluxos de exergia caso 2

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,71	3,71
2- Ar sai do compressor	138,97	143,64	143,63	142,65	147,35	147,34
3-Ar que sai do trocador	490,62	534,97	534,97	494,31	538,68	538,68
4- Ar que sai da Turbina	202,12	235,51	225,83	205,80	239,22	229,54
5- Gases que saem do queimador	470,12	521,95	521,95	497,26	550,48	550,48
6- Gases que saem do trocador	92,10	101,27	101,27	119,24	129,80	129,80
7- Combustível	388,77	407,78	407,78	399,22	418,75	418,75
8-Potência do compressor	162,32	167,53	167,51	162,32	167,53	167,51
10-Potência elétrica do sistema	99,78	99,94	99,94	99,78	99,94	99,94
11-Potência de eixo da turbina	267,98	273,55	287,99	267,98	273,55	287,99

Tabela D.6. Resultados do diagnóstico caso 2

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,25	-0,70	-0,25	-0,74
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03
1D8	Operador Exergético Compressor	0,02	0,06	0,02	0,06
2	Turbina	-0,84	-2,02	-0,84	-0,74
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,31	-19,97	-8,33	-21,04
2D11	Operador Exergético Turbina	14,14	37,54	14,14	39,39
3	Queimador	-7,24	0,00	-7,12	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Trocador de calor	-1,09	-1,36	-2,59	-3,19
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,18	0,52	0,18	0,54
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-10,70	0,10	0,35
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-10,55
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	18,41	0,00	20,97
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.7. Fluxos de exergia caso 3

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,72	3,72
2- Ar sai do compressor	138,97	141,02	140,98	142,65	144,73	144,70
3-Ar que sai do trocador	490,62	494,01	494,01	494,31	497,73	497,73
4- Ar que sai da Turbina	202,12	202,31	202,29	205,80	206,03	206,00
5- Gases que saem do queimador	470,12	474,27	489,88	497,26	503,45	519,06
6- Gases que saem do trocador	92,10	94,82	94,82	119,24	124,00	124,00
7- Combustível	388,77	416,49	416,49	399,22	427,69	427,69
8-Potência do compressor	162,32	164,73	164,65	162,32	164,73	164,65
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,05	100,05	99,78	100,05	100,05
11-Potência de eixo da turbina	267,98	270,95	271,00	267,98	270,95	271,00

Tabela D.8. Resultados do diagnóstico caso 3

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,02	-0,06	-0,02	-0,07
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,03	-0,13	-0,04	-0,13
1D8	Operador Exergético Compressor	0,09	0,25	0,09	0,26
2	Turbina	-0,03	-0,09	-0,03	-0,07
2D4	Operador Exergético Turbina	-0,02	-0,06	-0,02	-0,06
2D11	Operador Exergético Turbina	0,05	0,16	0,05	0,16
3	Queimador	-0,63	0,00	-1,02	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,48	20,96	15,42	20,37
4	Trocador de calor	2,36	3,37	4,28	5,96
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,26	0,77	0,26	0,81
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	1,42	0,02	0,08
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	1,34
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	-17,49	0,00	-20,29
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.9. Fluxos de exergia caso 4

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,69	3,69
2- Ar sai do compressor	138,97	139,32	139,36	142,65	143,01	143,05
3-Ar que sai do trocador	490,62	491,25	493,27	494,31	494,94	496,96
4- Ar que sai da Turbina	202,12	202,18	202,17	205,80	205,87	205,86
5- Gases que saem do queimador	470,12	473,24	473,24	497,26	500,70	500,70
6- Gases que saem do trocador	92,10	94,22	94,22	119,24	121,67	121,67
7- Combustível	388,77	393,10	393,10	399,22	403,67	403,67
8-Potência do compressor	162,32	162,68	162,77	162,32	162,68	162,77
10-Potência elétrica do sistema	99,78	99,86	99,86	99,78	99,86	99,86
11-Potência de eixo da turbina	267,98	268,47	268,46	267,98	268,47	268,46

Tabela D.10. Resultados do diagnóstico caso 4

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02
1D2	Operador Exergético Compressor	0,04	0,13	0,04	0,13
1D8	Operador Exergético Compressor	-0,10	-0,26	-0,10	-0,28
2	Turbina	0,07	0,16	0,07	-0,02
2D4	Operador Exergético Turbina	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03
2D11	Operador Exergético Turbina	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03
3	Queimador	-0,11	0,00	-0,17	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	-0,01	0,00	0,00
4	Trocador de calor	0,07	0,09	0,20	0,26
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,02	4,92	2,02	5,17
5	Gerador Elétrico	0,04	0,11	0,04	0,11
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-0,49	0,01	0,02
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-0,48
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	-2,55	0,00	-2,98
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.11. Fluxos de exergia caso 5

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,73	3,73
2- Ar sai do compressor	138,97	150,94	147,09	142,65	154,67	150,83
3-Ar que sai do trocador	490,62	564,77	564,77	494,31	568,50	568,50
4- Ar que sai da Turbina	202,12	251,49	241,11	205,80	255,23	244,84
5- Gases que saem do queimador	470,12	556,85	556,85	497,26	587,09	587,09
6- Gases que saem do trocador	92,10	112,91	112,91	119,24	143,16	143,16
7- Combustível	388,77	431,00	431,00	399,22	442,59	442,59
8-Potência do compressor	162,32	180,42	171,39	162,32	180,42	171,39
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,17	100,17	99,78	100,17	100,17
11-Potência de eixo da turbina	267,98	286,90	302,14	267,98	286,90	302,14

Tabela D.12. Resultados do diagnóstico caso 5

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,40	-1,31	-0,40	-1,37
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,54	-14,02	-3,54	-14,31
1D8	Operador Exergético Compressor	8,55	26,07	8,55	27,30
2	Turbina	-1,44	-3,72	-1,44	-1,37
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,35	-21,61	-8,38	-22,75
2D11	Operador Exergético Turbina	14,24	40,48	14,24	42,42
3	Queimador	-10,49	0,00	-10,53	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Trocador de calor	3,07	4,08	1,63	2,12
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,40	1,22	0,40	1,28
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-13,38	0,16	0,64
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-13,44
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	20,70	0,00	23,13
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.13. Fluxos de exergia caso 6

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,74	3,74
2- Ar sai do compressor	138,97	148,36	144,57	142,65	152,10	148,31
3-Ar que sai do trocador	490,62	521,31	521,31	494,31	525,06	525,06
4- Ar que sai da Turbina	202,12	216,06	216,09	205,80	219,80	219,83
5- Gases que saem do queimador	470,12	505,89	522,46	497,26	536,78	553,36
6- Gases que saem do trocador	92,10	105,82	105,82	119,24	136,71	136,71
7- Combustível	388,77	439,76	439,76	399,22	451,58	451,58
8-Potência do compressor	162,32	177,65	168,66	162,32	177,65	168,66
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,02	100,02	99,78	100,02	100,02
11-Potência de eixo da turbina	267,98	284,07	284,02	267,98	284,07	284,02

Tabela D.14. Resultados do diagnóstico caso 6

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,20	-0,68	-0,20	-0,71
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,55	-14,47	-3,55	-14,74
1D8	Operador Exergético Compressor	8,66	27,12	8,66	28,38
2	Turbina	-0,51	-1,46	-0,51	-0,71
2D4	Operador Exergético Turbina	0,03	0,08	0,03	0,08
2D11	Operador Exergético Turbina	-0,05	-0,15	-0,05	-0,15
3	Queimador	-4,13	0,00	-4,64	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,41	22,07	15,36	21,47
4	Trocador de calor	6,88	10,41	8,87	13,06
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,49	1,55	0,49	1,62
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	1,02	0,09	0,37
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	0,80
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	-18,58	0,00	-21,78
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.15. Fluxos de exergia caso 7

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,72	3,72
2- Ar sai do compressor	138,97	146,58	142,84	142,65	150,30	146,56
3-Ar que sai do trocador	490,62	519,36	521,59	494,31	523,08	525,31
4- Ar que sai da Turbina	202,12	216,53	216,53	205,80	220,25	220,25
5- Gases que saem do queimador	470,12	505,92	505,93	497,26	535,03	535,04
6- Gases que saem do trocador	92,10	105,36	105,36	119,24	134,47	134,47
7- Combustível	388,77	415,68	415,68	399,22	426,86	426,86
8-Potência do compressor	162,32	175,58	166,67	162,32	175,58	166,67
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,12	100,12	99,78	100,12	100,12
11-Potência de eixo da turbina	267,98	281,86	281,86	267,98	281,86	281,86

Tabela D.16. Resultados do diagnóstico caso 7

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,17	-0,53	-0,17	-0,55
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,54	-13,49	-3,55	-13,76
1D8	Operador Exergético Compressor	8,67	25,24	8,67	26,45
2	Turbina	-0,59	-1,55	-0,59	-0,55
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	0,01	0,02	0,01	0,03
3	Queimador	-3,82	0,00	-4,01	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,01	0,01	0,01	0,01
4	Trocador de calor	4,30	5,93	4,46	6,02
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,11	5,53	2,11	5,80
5	Gerador Elétrico	0,25	0,74	0,25	0,77
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-1,60	0,07	0,28
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-1,72
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	-2,01	0,00	-2,68
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.17. Fluxos de exergia caso 8

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,74	3,74
2- Ar sai do compressor	138,97	145,72	145,72	142,65	149,46	149,46
3-Ar que sai do trocador	490,62	538,27	538,27	494,31	542,01	542,01
4- Ar que sai da Turbina	202,12	235,61	225,80	205,80	239,35	229,54
5- Gases que saem do queimador	470,12	526,21	543,09	497,26	556,89	573,77
6- Gases que saem do trocador	92,10	104,19	104,19	119,24	134,87	134,87
7- Combustível	388,77	436,86	436,86	399,22	448,61	448,61
8-Potência do compressor	162,32	169,91	169,90	162,32	169,91	169,90
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,15	100,15	99,78	100,15	100,15
11-Potência de eixo da turbina	267,98	276,43	291,07	267,98	276,43	291,07

Tabela D.18. Resultados do diagnóstico caso 8

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,29	-0,90	-0,29	-0,94
1D2	Operador Exergético Compressor	0,00	-0,01	0,00	-0,01
1D8	Operador Exergético Compressor	0,01	0,02	0,01	0,02
2	Turbina	-0,83	-2,17	-0,83	-0,94
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,41	-22,11	-8,43	-23,24
2D11	Operador Exergético Turbina	14,19	41,08	14,19	43,04
3	Queimador	-8,00	0,00	-8,26	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,08	19,80	15,07	19,37
4	Trocador de calor	1,28	1,78	1,62	2,20
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,46	1,43	0,46	1,49
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-9,72	0,12	0,46
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-9,60
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	3,77	0,00	3,68
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.19. Fluxos de exergia caso 9

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,71	3,71
2- Ar sai do compressor	138,97	143,87	143,83	142,65	147,59	147,55
3-Ar que sai do trocador	490,62	535,20	537,37	494,31	538,92	541,09
4- Ar que sai da Turbina	202,12	235,40	225,66	205,80	239,11	229,38
5- Gases que saem do queimador	470,12	525,04	525,07	497,26	553,90	553,93
6- Gases que saem do trocador	92,10	103,55	103,55	119,24	132,41	132,41
7- Combustível	388,77	412,27	412,27	399,22	423,35	423,35
8-Potência do compressor	162,32	167,85	167,75	162,32	167,85	167,75
10-Potência elétrica do sistema	99,78	99,93	99,93	99,78	99,93	99,93
11-Potência de eixo da turbina	267,98	273,90	288,42	267,98	273,90	288,42

Tabela D.20. Resultados do diagnóstico caso 9

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,25	-0,71	-0,25	-0,74
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,04	-0,14	-0,04	-0,14
1D8	Operador Exergético Compressor	0,10	0,28	0,10	0,29
2	Turbina	-0,90	-2,19	-0,90	-0,74
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,36	-20,39	-8,38	-21,48
2D11	Operador Exergético Turbina	14,20	38,23	14,20	40,11
3	Queimador	-7,35	0,00	-7,30	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,03	0,03	0,03	0,03
4	Trocador de calor	-0,90	-1,14	-2,25	-2,79
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	1,99	4,82	1,99	5,07
5	Gerador Elétrico	0,23	0,65	0,23	0,69
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-11,52	0,10	0,36
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-11,36
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	16,20	0,00	18,33
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.21. Fluxos de exergia caso 10

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,72	3,72
2- Ar sai do compressor	138,97	141,45	141,41	142,65	145,17	145,13
3-Ar que sai do trocador	490,62	494,60	496,58	494,31	498,32	500,30
4- Ar que sai da Turbina	202,12	202,33	202,32	205,80	206,05	206,05
5- Gases que saem do queimador	470,12	477,34	493,11	497,26	506,85	522,62
6- Gases que saem do trocador	92,10	97,00	97,00	119,24	126,51	126,51
7- Combustível	388,77	421,03	421,03	399,22	432,36	432,36
8-Potência do compressor	162,32	165,24	165,14	162,32	165,24	165,14
10-Potência elétrica do sistema	99,78	99,98	99,98	99,78	99,98	99,98
11-Potência de eixo da turbina	267,98	271,43	271,42	267,98	271,43	271,42

Tabela D.22. Resultados do diagnóstico caso 10

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,03	-0,10	-0,03	-0,11
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,04	-0,14	-0,04	-0,14
1D8	Operador Exergético Compressor	0,09	0,28	0,09	0,29
2	Turbina	0,07	0,18	0,07	-0,11
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Queimador	-0,73	0,00	-1,18	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,53	21,20	15,47	20,59
4	Trocador de calor	2,56	3,69	4,64	6,51
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	1,96	5,24	1,96	5,50
5	Gerador Elétrico	0,31	0,92	0,31	0,97
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	1,06	0,03	0,11
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	0,99
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	-20,62	0,00	-23,88
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.23. Fluxos de exergia caso 11

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,77	3,77
2- Ar sai do compressor	138,97	153,52	149,57	142,65	157,28	153,34
3-Ar que sai do trocador	490,62	569,17	569,17	494,31	572,94	572,94
4- Ar que sai da Turbina	202,12	251,98	241,47	205,80	255,75	245,24
5- Gases que saem do queimador	470,12	562,50	580,50	497,26	595,11	613,11
6- Gases que saem do trocador	92,10	116,58	116,58	119,24	149,19	149,19
7- Combustível	388,77	462,72	462,72	399,22	475,16	475,16
8-Potência do compressor	162,32	183,43	174,20	162,32	183,43	174,20
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,32	100,32	99,78	100,32	100,32
11-Potência de eixo da turbina	267,98	290,38	305,82	267,98	290,38	305,82

Tabela D.24. Resultados do diagnóstico caso 11

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,47	-1,67	-0,47	-1,75
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,57	-15,37	-3,58	-15,67
1D8	Operador Exergético Compressor	8,60	28,62	8,60	29,92
2	Turbina	-1,35	-3,83	-1,35	-1,75
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,43	-23,88	-8,45	-25,10
2D11	Operador Exergético Turbina	14,24	44,27	14,24	46,31
3	Queimador	-11,30	0,00	-11,70	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,04	20,94	15,04	20,49
4	Trocador de calor	5,78	8,49	6,23	8,93
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Gerador Elétrico	0,71	2,35	0,71	2,46
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-12,14	0,18	0,81
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-12,25
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	4,41	0,00	4,01
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.25. Fluxos de exergia caso 12

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,74	3,74
2- Ar sai do compressor	138,97	151,50	147,62	142,65	155,24	151,36
3-Ar que sai do trocador	490,62	565,78	568,20	494,31	569,51	571,94
4- Ar que sai da Turbina	202,12	251,70	241,36	205,80	255,44	245,10
5- Gases que saem do queimador	470,12	560,94	560,94	497,26	591,58	591,57
6- Gases que saem do trocador	92,10	115,66	115,66	119,24	146,29	146,29
7- Combustível	388,77	436,27	436,27	399,22	448,00	448,00
8-Potência do compressor	162,32	181,07	171,97	162,32	181,07	171,97
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,13	100,13	99,78	100,13	100,13
11-Potência de eixo da turbina	267,98	287,57	302,80	267,98	287,57	302,80

Tabela D.26. Resultados do diagnóstico caso 12

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,43	-1,43	-0,43	-1,50
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,55	-14,30	-3,56	-14,59
1D8	Operador Exergético Compressor	8,58	26,58	8,58	27,83
2	Turbina	-1,39	-3,66	-1,39	-1,50
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,31	-21,85	-8,33	-23,00
2D11	Operador Exergético Turbina	14,19	41,03	14,19	42,98
3	Queimador	-10,68	0,00	-10,77	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	0,00	0,00	0,00	0,00
4	Trocador de calor	3,26	4,37	1,98	2,60
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,10	5,50	2,10	5,78
5	Gerador Elétrico	0,46	1,41	0,46	1,48
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-14,23	0,16	0,68
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-14,30
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	18,29	0,00	20,27
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.27. Fluxos de exergia caso 13

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,75	3,75
2- Ar sai do compressor	138,97	148,79	145,02	142,65	152,54	148,77
3-Ar que sai do trocador	490,62	522,67	524,95	494,31	526,42	528,70
4- Ar que sai da Turbina	202,12	216,49	216,50	205,80	220,24	220,24
5- Gases que saem do queimador	470,12	510,10	526,90	497,26	541,41	558,21
6- Gases que saem do trocador	92,10	108,31	108,31	119,24	139,62	139,62
7- Combustível	388,77	445,29	445,29	399,22	457,26	457,26
8-Potência do compressor	162,32	178,10	169,16	162,32	178,10	169,16
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,36	100,36	99,78	100,36	100,36
11-Potência de eixo da turbina	267,98	284,92	284,91	267,98	284,92	284,91

Tabela D.28. Resultados do diagnóstico caso 13

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,22	-0,76	-0,22	-0,79
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,52	-14,48	-3,52	-14,76
1D8	Operador Exergético Compressor	8,57	27,17	8,57	28,43
2	Turbina	-0,52	-1,50	-0,52	-0,79
2D4	Operador Exergético Turbina	0,00	0,00	0,00	0,00
2D11	Operador Exergético Turbina	-0,01	-0,03	-0,01	-0,03
3	Queimador	-4,32	0,00	-4,89	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,48	22,28	15,43	21,66
4	Trocador de calor	6,76	10,27	8,89	13,14
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,14	6,12	2,14	6,41
5	Gerador Elétrico	0,53	1,69	0,53	1,77
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	0,15	0,09	0,39
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-0,05
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	-21,89	0,00	-25,59
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.29. Fluxos de exergia caso 14

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,75	3,75
2- Ar sai do compressor	138,97	146,08	146,07	142,65	149,82	149,82
3-Ar que sai do trocador	490,62	538,77	540,95	494,31	542,52	544,70
4- Ar que sai da Turbina	202,12	235,59	225,77	205,80	239,34	229,51
5- Gases que saem do queimador	470,12	529,57	546,60	497,26	560,62	577,65
6- Gases que saem do trocador	92,10	106,55	106,55	119,24	137,60	137,60
7- Combustível	388,77	441,78	441,78	399,22	453,66	453,66
8-Potência do compressor	162,32	170,32	170,30	162,32	170,32	170,30
10-Potência elétrica do sistema	99,78	100,16	100,16	99,78	100,16	100,16
11-Potência de eixo da turbina	267,98	276,90	291,56	267,98	276,90	291,56

Tabela D.30. Resultados do diagnóstico caso 14

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,30	-0,95	-0,30	-0,99
1D2	Operador Exergético Compressor	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02
1D8	Operador Exergético Compressor	0,02	0,05	0,02	0,05
2	Turbina	-0,82	-2,18	-0,82	-0,99
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,43	-22,48	-8,45	-23,62
2D11	Operador Exergético Turbina	14,20	41,69	14,20	43,66
3	Queimador	-8,09	0,00	-8,40	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,12	20,00	15,11	19,55
4	Trocador de calor	1,49	2,09	2,00	2,73
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	1,99	5,27	1,99	5,53
5	Gerador Elétrico	0,51	1,60	0,51	1,67
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-10,48	0,12	0,48
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-10,36
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	1,06	0,00	0,51
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela D.31. Fluxos de exergia caso 15

Fluxo	Sem Exergia Química [kW]			Com Exergia Química [kW]		
	E (Ref)	E(real)	E(RNA)	E (Ref)	E(real)	E(RNA)
1-Ar que entra ao compressor	0	0	0	3,69	3,77	3,77
2- Ar sai do compressor	138,97	153,78	149,82	142,65	157,55	153,59
3-Ar que sai do trocador	490,62	568,48	570,96	494,31	572,25	574,73
4- Ar que sai da Turbina	202,12	251,30	240,82	205,80	255,07	244,59
5- Gases que saem do queimador	470,12	564,56	582,72	497,26	597,48	615,63
6- Gases que saem do trocador	92,10	118,86	118,86	119,24	151,78	151,78
7- Combustível	388,77	466,86	466,86	399,22	479,42	479,42
8-Potência do compressor	162,32	183,75	174,48	162,32	183,75	174,48
10-Potência elétrica do sistema	99,78	99,91	99,91	99,78	99,91	99,91
11-Potência de eixo da turbina	267,98	290,32	305,74	267,98	290,32	305,74

Tabela D.32. Resultados do diagnóstico caso 15

Equip.	Descrição	Sem Exergia Química [kW]		Com Exergia Química [kW]	
		Anomalia (kW)	Disfunção (kW)	Anomalia (kW)	Disfunção (kW)
1	Compressor	-0,48	-1,74	-0,48	-1,82
1D2	Operador Exergético Compressor	-3,58	-15,65	-3,59	-15,95
1D8	Operador Exergético Compressor	8,62	29,14	8,62	30,47
2	Turbina	-1,31	-3,78	-1,31	-1,82
2D4	Operador Exergético Turbina	-8,43	-24,29	-8,46	-25,51
2D11	Operador Exergético Turbina	14,23	44,97	14,23	47,04
3	Queimador	-11,25	0,00	-11,70	0,00
3D5	Operador Exergético Queimador	15,12	21,24	15,11	20,77
4	Trocador de calor	5,78	8,57	6,39	9,24
4D3	Operador Exergético Trocador de calor	2,14	6,14	2,15	6,43
5	Gerador Elétrico	0,77	2,59	0,77	2,71
A	Junção (Trocador de Calor)	0,00	-12,79	0,18	0,83
B	Bifurcação (Turbina)	0,00	0,00	0,00	-12,91
C	Bifurcação (gerador elétrico)	0,00	0,00	0,00	0,00
F	Junção (Queimador)	0,00	1,43	0,00	0,55
G	Junção (Compressor)	0,00	0,00	0,00	0,00

# APÊNDICE E. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CICLO RANKINE DE POTÊNCIA MODELO E

## E1. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CASO 1 BASEADO NA EXERGIA TOTAL

Tabela E1.1. Matriz F-P na condição de referência para o Caso 1

	F0	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7	EP
P0						70002,04												70002,04
P1									126,10									126,10
P2								27907,48										27907,48
P3/4															20643,84			20643,84
P5											20230,97							20230,97
PA			70002,04															70002,04
PB														28108,95				28108,95
PC												201,47						201,47
PF				75,06										3372,84		75,38		3523,28
PG									31556,86									31556,86
PH	20000,92	154,99															75,06	20230,97
P1D2								201,47										201,47
P2D3										28108,95								28108,95
P3D4										3372,84								3372,84
P3D5				20643,84														20643,84
P4D1								75,38										75,38
P4D7											75,06							75,06
ΣF	20000,92	154,99	70002,04	75,06	20643,84	70002,04	28108,95	201,47	31556,86	31556,86	20230,97	201,47	28108,95	3372,84	20643,84	75,38	75,06	

Tabela E1.2. Matriz F-P na condição de real para o Caso 1

	F0	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7	EP
P0						73653,48												73653,48
P1									148,35									148,35
P2								29968,27										29968,27
P3/4															20666,31			20666,31
P5											20252,98							20252,98
PA			73653,48															73653,48
PB														30326,07				30326,07
PC												357,80						357,80
PF				30163,32										5704,43		209,45		36077,20
PG									36077,20									36077,20
PH	19992,15	180,31															80,53	20252,98
P1D2								357,80										357,80
P2D3										30326,07								30326,07
P3D4										5704,43								5704,43
P3D5					20666,31													20666,31
P4D1								209,45										209,45
P4D7											46,69							46,69
ΣF	19992,15	180,31	73653,48	30163,32	20666,31	73653,48	30326,07	357,80	36077,20	36077,20	20252,98	357,80	30326,07	5704,43	20666,31	209,45	80,53	

Tabela E1.3. Matriz <KP> na condição de referência

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	2,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	1,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KD	1,229	2,508	0,004	1,020	1,000	1,000	1,000	8,957	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela E1.4. Matriz <KP> na condição de real

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	2,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KD	1,215	2,458	1,460	1,020	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,725

Tabela E1.5. Operador |P&gt; condição real

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	1,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,01	0,42	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
P2	1,82	1,00	1,47	1,50	0,00	1,00	1,34	1,01	1,01	1,50	1,34	1,00	1,01	1,47	1,01	2,59
P3/4	1,26	0,00	1,01	1,03	0,00	0,01	0,53	0,01	0,01	1,03	0,53	0,01	0,01	1,01	0,01	1,78
P5	1,23	0,00	0,01	1,01	0,00	0,01	0,52	0,01	0,01	1,01	0,52	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
PA	4,48	2,46	3,61	3,68	1,00	2,47	3,30	2,47	2,47	3,68	3,30	2,47	2,47	3,61	2,47	6,35
PB	1,84	0,00	1,49	1,52	0,00	1,02	1,36	1,02	1,02	1,52	1,36	1,02	1,02	1,49	1,02	2,62
PC	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	1,02	0,01	0,01	0,02	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
PF	2,19	0,00	1,77	1,80	0,00	0,02	1,62	1,21	0,21	1,80	1,62	0,02	1,21	1,77	1,21	3,11
PG	2,19	0,00	1,77	1,80	0,00	0,02	1,62	1,21	1,21	1,80	1,62	0,02	1,21	1,77	1,21	3,11
PH	1,23	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,52	0,01	0,01	1,01	0,52	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
P1D2	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
P2D3	1,84	0,00	1,49	1,52	0,00	0,02	1,36	1,02	1,02	1,52	1,36	1,02	1,02	1,49	1,02	2,62
P3D4	0,35	0,00	0,28	0,29	0,00	0,00	0,26	0,19	0,19	0,29	0,26	0,00	1,19	0,28	0,19	0,49
P3D5	1,26	0,00	0,01	1,03	0,00	0,01	0,53	0,01	0,01	1,03	0,53	0,01	0,01	1,01	0,01	1,78
P4D1	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,59	0,01	0,01	0,01	0,59	0,01	0,01	0,01	1,01	0,02
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabela E1.6. Matriz Operador |I&gt; na condição real

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	2,66	1,46	2,14	2,19	0,00	1,46	1,96	1,47	1,47	2,19	1,96	1,46	1,47	2,14	1,47	3,77
P3/4	0,58	0,00	0,47	0,48	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,48	0,24	0,00	0,00	0,47	0,00	0,82
P5	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73
$\phi_{i,h}$	3,48	1,46	2,61	2,68	0,00	1,47	2,30	1,47	1,47	2,68	2,30	1,47	1,47	2,61	1,47	5,35

Tabela E1.7. Matriz  $\Delta < KP >$ 

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela E1.8. Matriz de anomalias

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-42,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-130,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	-1413,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	2021,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	-1,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,39
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1582,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1616,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-34,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma MF_i$	-1,73	-1413,39	2021,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,39

Tabela E1.9. Matriz de Disfunções

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,00	0,00	2,17	0,00	0,00	11,81	-9,21	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
P2	-3,77	0,00	2966,48	0,00	0,00	65,39	-50,59	0,00	-73,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	118,84
P3/4	-0,82	0,00	8,31	0,00	0,00	31,47	-24,40	0,00	-25,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,84
P5	-0,04	0,00	0,36	0,00	0,00	1,37	-1,06	0,00	-1,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,12
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	2,30	0,00	0,00	0,20	-0,04	0,00	-23,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
ΣDFi	-4,63	0,00	2979,62	0,00	0,00	110,24	-85,30	0,00	-123,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	145,98

## E2. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOCONÔMICO PARA O CASO 2 BASEADO NA EXERGIA TOTAL

Tabela E2.1 Matriz F-P na condição de real para o Caso 2

	F0	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7	ΣP
P0						74320,90												70002,04
P1								151,45										126,10
P2							30276,82											27907,48
P3/4															20882,65			20643,84
P5											20254,19							20230,97
PA			74320,90															70002,04
PB													30645,19					28108,95
PC												368,37						201,47
PF				30500,26									5822,64			216,92		3523,28
PG									36539,82									31556,86
PH	19989,64	184,01															80,54	20230,97
P1D2								368,37										201,47
P2D3										30645,19								28108,95
P3D4										5847,92								3372,84
P3D5					20667,54													20643,84
P4D1									216,92									75,38
P4D7										46,71								75,06
ΣF	20000,92	154,99	70002,04	75,06	20643,84	70002,04	28108,95	201,47	31556,86	31556,86	20230,97	201,47	28108,95	3372,84	20643,84	75,38	75,06	

Tabela E2.2 Matriz <KP> na condição de real

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	2,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KD	1,215	2,455	1,461	1,020	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,996	1,010	1,000	1,724

Tabela E2.3 Operador |P> condição real

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	1,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,42	0,01	0,01	0,01	0,42	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P2	1,84	1,00	1,47	1,51	0,00	1,00	1,35	1,01	1,01	1,51	1,35	1,00	1,00	1,48	1,01	2,61
P3/4	1,27	0,00	1,01	1,04	0,00	0,01	0,53	0,01	0,01	1,04	0,53	0,01	0,01	1,02	0,01	1,80
P5	1,23	0,00	0,01	1,01	0,00	0,01	0,51	0,01	0,01	1,01	0,51	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
PA	4,52	2,45	3,61	3,72	1,00	2,47	3,31	2,47	2,47	3,72	3,31	2,47	2,46	3,64	2,47	6,41
PB	1,86	0,00	1,49	1,53	0,00	1,02	1,37	1,02	1,02	1,53	1,37	1,02	1,01	1,50	1,02	2,64
PC	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	1,02	0,01	0,01	0,02	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
PF	2,22	0,00	1,77	1,83	0,00	0,02	1,63	1,21	0,21	1,83	1,63	0,02	1,21	1,79	1,21	3,15
PG	2,22	0,00	1,77	1,83	0,00	0,02	1,63	1,21	1,21	1,83	1,63	0,02	1,21	1,79	1,21	3,15
PH	1,23	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,51	0,01	0,01	1,01	0,51	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
P1D2	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
P2D3	1,86	0,00	1,49	1,53	0,00	0,02	1,37	1,02	1,02	1,53	1,37	1,02	1,01	1,50	1,02	2,64
P3D4	0,36	0,00	0,28	0,29	0,00	0,00	0,26	0,19	0,19	0,29	0,26	0,00	1,19	0,29	0,19	0,50
P3D5	1,26	0,00	0,01	1,03	0,00	0,01	0,52	0,01	0,01	1,03	0,52	0,01	0,01	1,01	0,01	1,78
P4D1	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,60	0,01	0,01	0,01	0,60	0,01	0,01	0,01	1,01	0,02
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabela E2.4 Matriz Operador  $|I\rangle$  na condição real

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	2,68	1,45	2,14	2,20	0,00	1,46	1,96	1,46	1,46	2,20	1,96	1,46	1,46	2,16	1,46	3,80
P3/4	0,58	0,00	0,47	0,48	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,48	0,24	0,00	0,00	0,47	0,00	0,83
P5	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73
$\phi, h$	3,52	1,45	2,61	2,72	0,00	1,47	2,31	1,47	1,47	2,72	2,31	1,47	1,46	2,64	1,47	5,41

Tabela E2.5 Matriz  $\Delta < KP >$

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela E2.6 Matriz de anomalias

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-43,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-136,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3/4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	214,86	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	-1497,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	2042,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-14,58	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	-1,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,36
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	136,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1642,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1677,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-34,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ΣMFi	-1,78	-1497,18	2042,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-14,58	214,86	0,00	54,36

Tabela E2.7 Matriz de Disfunções

	F1	F2	F3/4	F5	FA	FB	FC	FF	FG	FH	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,00	0,00	2,21	0,00	0,00	12,26	-9,34	0,00	-0,06	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,34	0,00	0,09
P2	-3,92	0,00	2989,01	0,00	0,00	69,24	-52,52	0,00	-87,85	0,00	0,00	0,00	-21,34	459,17	0,00	119,78
P3/4	-0,86	0,00	8,53	0,00	0,00	33,12	-25,11	0,00	-26,63	0,00	0,00	0,00	-0,06	100,27	0,00	26,15
P5	-0,04	0,00	0,37	0,00	0,00	1,42	-1,08	0,00	-1,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	1,12
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	-1,72	0,00	0,00	-0,15	0,03	0,00	-8,56	0,00	0,00	0,00	0,01	-0,26	0,00	-0,07
P3D5	-0,02	0,00	0,19	0,00	0,00	0,74	-0,56	0,00	-0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,58
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	2,30	0,00	0,00	0,21	-0,04	0,00	-23,40	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,35	0,00	0,09
ΣDFi	-4,83	0,00	3000,88	0,00	0,00	116,83	-88,62	0,00	-148,24	0,00	0,00	0,00	-21,42	559,95	0,00	147,75

# APÊNDICE F. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CICLO RANKINE DE POTÊNCIA MODELO E&S

## F1. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CASO 1 MODELO E&S

Tabela F1.1. Matriz F-P na condição de referência para o Caso 1

	F0	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7	
P0																				70002,04						70002,04	
P1									126,10																		126,10
P2												27907,48															27907,48
P3																									20643,84		20643,84
P4																		29590,95									29590,95
P5															20230,97												20230,97
PA																		1879,98									1879,98
PB		186,04																									186,04
PC																											
PD							1911,03					35500,75											201,47				201,47
PE																											
PF				105502,79																							105502,79
PG																											
PH					28795,26									24736,11													28795,26
PI		20000,92																									20000,92
PJ																											
PK																											
PL																											
PM																											
PN																											
PO																											
P1D2																											
P2D3																											
P3D4																											
P4D5																											
P5D1																											
P5D7																											
PF	20000,92	186,04	105502,79	28795,26	3272,53	20643,84	1911,03	186,04	201,47	37411,77	105502,79	28108,95	28108,95	28795,26	20230,97	41470,93	3272,84	41470,93	3272,53	70002,04	201,47	28108,95	2372,84	20643,84	75,38	75,06	

Tabela F1.2. Matriz F-P na condição de real para o Caso 1

	F0	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7	
P0																					73653,48						73653,48
P1										148,35																	148,35
P2													29968,27														29968,27
P3																									20666,31		20666,31
P4																			40700,89								40700,89
P5																											
PA															20252,98												20252,98
PB																											
PC		214,92																									214,92
PD																											
PE																											
PF																											
PG																											
PH																											
PI																											
PJ																											
PK																											
PL																											
PM																											
PN																											
PO																											
P1D2																											
P2D3																											
P3D4																											
P4D5																											
P5D1																											
P5D7																											
PF	19992,15	214,92	110400,26	28541,13	5541,68	20666,31	3232,32	214,92	357,80	39979,10	110400,26	30326,07	30326,07	28541,13	20252,98	43898,59	5704,43	43898,59	5541,68	73653,48	357,80	30326,07	5704,43	20666,31	209,45	80,53	



Tabela F1.5. Operador  $|P\rangle$  condição real

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	1,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,42	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,42	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P2	1,86	1,20	1,47	0,17	1,50	0,17	1,28	1,48	0,17	0,06	1,21	1,21	1,06	1,50	0,17	1,21	0,17	1,22	0,00	1,48	1,21	1,21	1,47	1,21	2,59
P3	1,26	0,00	1,01	0,00	1,03	0,00	0,87	0,53	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,03	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,53	0,01	0,01	1,01	0,01	1,78
P4	2,76	1,48	2,00	1,20	2,04	1,20	1,90	2,01	1,20	0,40	1,48	1,48	1,44	2,04	1,20	1,48	1,20	1,50	0,00	2,01	1,48	1,48	2,00	1,48	3,51
P5	1,23	0,00	0,01	0,00	1,01	0,00	0,85	0,52	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,52	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
PA	0,45	0,12	0,16	0,02	0,16	1,09	0,31	0,26	0,09	0,03	0,12	0,12	0,11	0,16	0,09	0,12	0,09	0,12	0,00	0,26	0,12	0,12	0,16	0,12	0,28
PB	1,46	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,01	0,61	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,61	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
PC	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	1,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
PD	2,73	1,59	1,96	0,22	2,00	1,30	1,89	2,07	1,30	0,43	1,60	1,60	1,42	2,00	0,30	1,60	0,30	1,61	0,00	2,07	1,60	1,60	1,96	1,60	3,45
PE	6,85	4,43	5,41	0,61	5,52	0,61	4,73	5,44	0,61	1,20	4,45	4,45	3,92	5,52	0,61	4,45	0,61	4,49	0,00	5,44	4,45	4,45	5,41	4,45	9,52
PF	1,88	0,21	1,49	0,17	1,52	0,17	1,30	1,50	0,17	0,06	1,22	1,22	1,08	1,52	0,17	1,22	0,17	1,23	0,00	1,50	1,22	1,22	1,49	1,22	2,62
PG	1,88	0,21	1,49	0,17	1,52	0,17	1,30	1,50	0,17	0,06	0,22	1,22	1,08	1,52	0,17	1,22	0,17	1,23	0,00	1,50	0,22	1,22	1,49	1,22	2,62
PH	1,74	0,01	1,40	0,00	1,43	0,00	1,20	0,73	0,00	0,00	0,01	0,01	1,01	1,43	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,73	0,01	0,01	1,40	0,01	2,46
PI	1,23	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,85	0,52	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,52	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
PJ	2,97	1,59	2,15	0,22	2,20	1,30	2,05	2,17	1,30	0,43	1,60	1,60	1,56	2,20	1,30	1,60	0,30	1,62	0,00	2,17	1,60	1,60	2,15	1,60	3,79
PK	0,38	0,20	0,28	0,16	0,29	0,16	0,27	0,87	0,16	0,05	0,21	0,21	0,20	0,29	0,16	1,21	0,16	1,20	0,00	0,87	0,21	0,21	0,28	1,21	0,49
PM	2,97	1,59	2,15	0,22	2,20	1,30	2,05	2,17	1,30	0,43	1,60	1,60	1,56	2,20	1,30	1,60	1,30	1,62	0,00	2,17	1,60	1,60	2,15	1,60	3,79
PL	0,38	0,20	0,27	0,16	0,28	0,16	0,26	0,27	0,16	0,05	0,20	0,20	0,20	0,28	0,16	0,20	0,16	1,20	0,00	0,27	0,20	0,20	0,27	0,20	0,48
PX	4,57	2,96	3,61	0,41	3,68	0,41	3,16	3,63	0,41	0,80	2,97	2,97	2,61	3,68	0,41	2,97	0,41	2,99	1,00	3,63	2,97	2,97	3,61	2,97	6,35
P1D2	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,63	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
P2D3	1,88	0,21	1,49	0,17	1,52	0,17	1,30	1,50	0,17	0,06	0,22	1,22	1,08	1,52	0,17	1,22	0,17	1,23	0,00	1,50	1,22	1,22	1,49	1,22	2,62
P3D4	0,38	0,20	0,28	0,16	0,29	0,16	0,27	0,87	0,16	0,05	0,21	0,21	0,20	0,29	0,16	1,21	0,16	1,20	0,00	0,87	0,21	1,21	0,28	1,21	0,49
P3D5	1,26	0,00	1,01	0,00	1,03	0,00	0,87	0,53	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,03	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,53	0,01	0,01	1,01	0,01	1,78
P4D1	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,60	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,60	0,01	0,01	0,01	1,01	0,02
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

Tabela F1.6. Matriz Operador  $|I\rangle$  na condição real

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
P2	4,99	3,23	3,94	0,45	4,02	0,45	3,45	3,97	0,45	0,15	3,24	3,24	2,85	4,02	0,45	3,24	0,45	3,27	0,00	3,97	3,24	3,24	3,94	3,24	6,94
P3	0,48	0,00	0,39	0,00	0,39	0,00	0,33	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,20	0,00	0,00	0,39	0,00	0,68
P4	-2,38	-1,28	-1,72	-1,04	-1,76	-1,04	-1,64	-1,74	-1,04	-0,35	-1,28	-1,28	-1,25	-1,76	-1,04	-1,28	-1,04	-1,30	0,00	-1,74	-1,28	-1,28	-1,72	-1,28	-3,03
P5	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,7



Tabela F1.9. Matriz de Disfunções

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	-0,01	-0,33	-0,67	5,46	0,00	0,00	0,00	-19,16	0,00	-0,14	24,59	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
P2	-11,59	-399,24	-814,08	6598,22	0,00	0,00	3,92	-74,71	0,00	-170,99	95,87	0,00	292,63	0,00	0,00	0,00	0,00	-172,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	218,80
P3	-1,11	-1,18	-1,03	19,48	0,00	0,00	0,43	-20,22	0,00	-0,50	25,95	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	-31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,42
P4	5,53	932,90	355,86	-2614,90	0,00	0,00	-0,79	46,78	0,00	399,56	-60,03	0,00	-25,22	0,00	0,00	0,00	0,00	81,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-95,65
P5	-0,06	-0,06	-0,05	1,02	0,00	0,00	0,02	-1,06	0,00	-0,03	1,36	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,12
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	-0,01	-0,90	-0,34	14,84	0,00	0,00	0,00	-0,05	0,00	-0,38	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	-33,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
ΣDFi	-7,25	531,20	-460,32	4024,12	0,00	0,00	3,59	-68,41	0,00	227,51	87,79	0,00	267,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-158,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	145,98

## F2. MATRIZES DO DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO PARA O CASO 2 MODELO E&S

Tabela F2.1. Matriz F-P na condição de real para o Caso 2

	FD	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P0																				73653,48						73653,48
P1									148,35																	148,35
P2												29968,27														29968,27
P3																								20666,31		20666,31
P4																			40700,89							40700,89
P5															20252,98											20252,98
PA									34,61										3197,71							3232,32
PB		214,92																								214,92
PC																										357,80
PD									3232,32				36746,78													39979,10
PE																										110400,26
PF			110400,26																							30326,07
PG																										30326,07
PH														24621,64												30326,07
PI	19992,15			28541,13					180,31																	80,53
PJ										39979,10					3919,50											43898,59
PK																										5704,43
PM																										43898,59
PL																										5541,68
PX																										73653,48
P1D2																										357,80
P2D3																										30326,07
P3D4																										5704,43
P3D5																										20666,31
P4D1																										209,45
P4D7																										46,69
ΣF	19992,15	214,92	110400,26	28541,13	5541,68	20666,31	3232,32	214,92	357,80	39979,10	110400,26	30326,07	30326,07	28541,13	20252,98	43898,59	5704,43	43898,59	5541,68	73653,48	357,80	30326,07	5704,43	20666,31	209,45	80,53

Tabela F2.2. Matriz <KP> na condição de real

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00	0,00
P4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PB	1,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PE	0,00	3,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
PH	0,00	0,00	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,72
PJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PK	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
PM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PL	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PX	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P1D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2D3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3D5	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P4D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KD	1,45	3,68	1,38	0,14	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	1,72

Tabela F2.3. Operador |P> condição real

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FH	FI	FJ	FK	FM	FL	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	1,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,42	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,42	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P2	1,88	1,20	1,47	0,17	1,51	0,17	1,30	1,48	0,17	0,06	1,21	1,21	1,06	1,51	0,17	1,20	0,17	1,21	0,00	1,48	1,21	1,20	1,48	1,20	2,61
P3	1,27	0,00	1,01	0,00	1,04	0,00	0,88	0,53	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,04	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,53	0,01	0,01	1,02	0,01	1,80
P4	2,78	1,48	2,00	1,21	2,06	1,21	1,92	2,01	1,21	0,40	1,48	1,48	1,44	2,06	1,21	1,48	1,21	1,49	0,00	2,01	1,48	1,48	2,02	1,48	3,55
P5	1,23	0,00	0,01	0,00	1,01	0,00	0,85	0,51	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,51	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
PA	0,46	0,12	0,16	0,02	0,17	1,10	0,31	0,26	0,10	0,03	0,12	0,12	0,12	0,17	0,10	0,12	0,10	0,12	0,00	0,26	0,12	0,12	0,16	0,12	0,29
PB	1,46	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,01	0,61	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,61	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
PC	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	1,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
PD	2,76	1,59	1,96	0,22	2,02	1,30	1,90	2,07	1,30	0,43	1,60	1,60	1,41	2,02	0,30	1,59	0,30	1,61	0,00	2,07	1,60	1,59	1,98	1,59	3,48
PE	6,91	4,43	5,40	0,62	5,57	0,62	4,77	5,45	0,62	1,20	4,44	4,44	3,90	5,57	0,62	4,42	0,62	4,47	0,00	5,45	4,44	4,42	5,46	4,42	9,61
PF	1,90	0,21	1,49	0,17	1,53	0,17	1,31	1,50	0,17	0,06	1,22	1,22	1,07	1,53	0,17	1,22	0,17	1,23	0,00	1,50	1,22	1,22	1,50	1,22	2,64
PG	1,90	0,21	1,49	0,17	1,53	0,17	1,31	1,50	0,17	0,06	0,22	1,22	1,07	1,53	0,17	1,22	0,17	1,23	0,00	1,50	0,22	1,22	1,50	1,22	2,64
PH	1,76	0,01	1,40	0,00	1,45	0,00	1,21	0,73	0,00	0,00	0,01	0,01	1,01	1,45	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,73	0,01	0,01	1,42	0,01	2,49
PI	1,23	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,85	0,51	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,51	0,01	0,01	0,01	0,01	1,75
PJ	3,00	1,59	2,16	0,22	2,22	1,30	2,08	2,17	1,30	0,43	1,60	1,60	1,56	2,22	1,30	1,59	0,30	1,61	0,00	2,17	1,60	1,59	2,18	1,59	3,83
PK	0,39	0,20	0,28	0,17	0,29	0,17	0,27	0,87	0,17	0,06	0,21	0,21	0,20	0,29	0,17	1,21	0,17	1,20	0,00	0,87	0,21	0,21	0,29	1,21	0,50
PM	3,00	1,59	2,16	0,22	2,22	1,30	2,08	2,17	1,30	0,43	1,60	1,60	1,56	2,22	1,30	1,59	1,30	1,61	0,00	2,17	1,60	1,59	2,18	1,59	3,83
PL	0,38	0,20	0,28	0,17	0,28	0,17	0,27	0,28	0,17	0,06	0,20	0,20	0,20	0,28	0,17	0,20	0,17	1,21	0,00	0,28	0,20	0,20	0,28	0,20	0,49
PX	4,61	2,96	3,61	0,41	3,72	0,41	3,19	3,64	0,41	0,80	2,97	2,97	2,60	3,72	0,41	2,95	0,41	2,98	1,00	3,64	2,97	2,95	3,64	2,95	6,41
P1D2	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	1,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
P2D3	1,90	0,21	1,49	0,17	1,53	0,17	1,31	1,50	0,17	0,06	0,22	1,22	1,07	1,53	0,17	1,22	0,17	1,23	0,00	1,50	1,22	1,22	1,50	1,22	2,64
P3D4	0,39	0,20	0,28	0,17	0,29	0,17	0,27	0,87	0,17	0,06	0,21	0,21	0,20	0,29	0,17	1,21	0,17	1,20	0,00	0,87	0,21	1,21	0,29	1,21	0,50
P3D5	1,26	0,00	0,01	0,00	1,03	0,00	0,87	0,52	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	1,03	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,52	0,01	0,01	1,01	0,01	1,78
P																									









Tabela G1.5. Operador  $|P\rangle$  condição real

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	1,13	0,00	0,01	0,24	0,01	0,01	0,00	0,01	0,07	0,01	0,01	0,64	0,64	0,11	0,64	0,21	0,21	0,61	0,21	0,23	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,21	0,00	0,64	0,01	0,01	0,01	0,21	0,02
P2	12,03	2,51	3,27	86,32	3,34	2,74	0,91	2,74	7,08	2,74	2,74	46,20	46,20	10,24	46,20	76,04	76,04	48,03	75,97	85,57	2,74	2,74	3,34	2,74	2,74	76,04	0,00	46,20	2,74	2,74	3,27	76,04	5,75
P3	1,19	0,04	1,01	0,79	1,03	0,01	0,00	0,01	0,10	0,01	0,01	0,93	0,93	1,02	0,93	0,70	0,70	1,91	0,70	0,78	0,01	0,01	1,03	0,01	0,01	0,70	0,00	0,93	0,01	0,01	1,01	0,70	1,78
P4	28,85	0,92	2,00	274,22	2,04	1,67	0,56	1,67	15,65	1,67	1,67	141,94	141,94	24,56	141,94	240,72	240,72	148,01	240,48	271,78	1,67	1,67	2,04	1,67	1,67	240,72	0,00	141,94	1,67	1,67	2,00	240,72	3,51
P5	1,17	0,01	0,01	0,78	1,01	0,01	0,00	0,01	0,10	0,01	0,01	0,91	0,91	1,00	0,91	0,68	0,68	0,90	0,68	0,77	0,01	0,01	1,01	0,01	0,01	0,68	0,00	0,91	0,01	0,01	0,68	1,75	
PA	7,21	1,46	1,96	51,73	2,00	2,64	0,88	1,64	5,14	1,64	1,64	27,68	27,68	6,14	27,68	45,57	45,57	28,78	45,53	51,28	1,64	1,64	2,00	1,64	1,64	45,57	0,00	27,68	1,64	1,64	1,96	45,57	3,45
PB	19,90	4,16	5,41	142,84	5,52	4,54	2,51	4,54	11,71	4,54	4,54	76,44	76,44	16,94	76,44	125,84	125,84	79,48	125,72	141,60	4,54	4,54	5,52	4,54	4,54	125,84	0,00	76,44	4,54	4,54	5,41	125,84	9,52
PC	12,67	1,59	3,45	90,96	3,52	2,89	0,96	2,89	7,46	2,89	2,89	48,68	48,68	10,79	48,68	80,14	80,14	50,62	80,06	90,17	2,89	2,89	3,52	2,89	2,89	80,14	0,00	48,68	2,89	2,89	3,45	80,14	6,06
PD	0,65	0,08	0,18	4,64	0,18	0,15	0,05	0,15	1,38	0,15	0,15	2,49	2,49	0,55	2,49	4,09	4,09	2,58	4,09	4,60	0,15	0,15	0,18	0,15	0,15	4,09	0,00	2,49	0,15	0,15	0,18	4,09	0,31
PE	12,67	1,59	3,45	90,96	3,52	2,89	0,96	2,89	7,46	2,89	2,89	48,68	48,68	10,79	48,68	80,14	80,14	50,62	80,06	90,17	2,89	2,89	3,52	2,89	2,89	80,14	0,00	48,68	2,89	2,89	3,45	80,14	6,06
PF	12,67	0,32	3,45	90,96	3,52	0,57	0,19	0,57	5,37	0,57	2,89	48,68	48,68	10,79	48,68	80,14	80,14	50,62	80,06	90,17	2,89	2,89	3,52	2,89	2,89	80,14	0,00	48,68	0,57	2,89	3,45	80,14	6,06
PG	2,48	0,07	0,16	4,18	0,16	0,13	0,04	0,13	1,24	0,13	0,13	12,27	12,27	2,11	11,27	3,68	3,68	11,74	3,68	4,15	0,13	0,13	0,16	0,13	0,13	3,68	0,00	11,27	0,13	0,13	0,16	3,68	0,28
PJ	2,55	0,08	0,18	4,64	0,18	0,15	0,05	0,15	1,38	0,15	0,15	12,52	12,52	2,17	12,52	4,09	4,09	12,00	4,09	4,60	0,15	0,15	0,18	0,15	0,15	4,09	0,00	12,52	0,15	0,15	0,18	4,09	0,31
PJ	1,33	0,00	0,01	0,28	0,01	0,01	0,00	0,01	0,08	0,01	0,01	0,75	0,75	1,13	0,75	0,24	0,24	0,72	0,24	0,28	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,24	0,00	0,75	0,01	0,01	0,24	0,02	
PK	2,55	0,08	0,18	4,64	0,18	0,15	0,05	0,15	1,38	0,15	0,15	12,52	12,52	2,17	12,52	4,09	4,09	12,00	4,09	4,60	0,15	0,15	0,18	0,15	0,15	4,09	0,00	12,52	0,15	0,15	0,18	4,09	0,31
PL	35,16	1,12	2,43	332,98	2,48	2,04	0,68	2,04	19,08	2,04	2,04	172,98	172,98	29,94	172,98	293,37	293,37	180,38	293,07	330,09	2,04	2,04	2,48	2,04	2,04	293,37	0,00	172,98	2,04	2,04	2,43	293,37	4,28
PM	2,42	0,08	0,17	21,74	0,17	0,14	0,05	0,14	1,31	0,14	0,14	11,88	11,88	2,06	11,88	19,15	20,15	12,39	19,13	21,62	0,14	0,14	0,17	0,14	0,14	19,13	0,00	11,88	0,14	0,14	0,17	20,15	0,29
PN	2,42	0,08	0,17	4,41	0,17	0,14	0,05	0,14	1,31	0,14	0,14	11,88	11,88	2,06	11,88	3,88	3,88	12,39	3,88	4,37	0,14	0,14	0,17	0,14	0,14	3,88	0,00	11,88	0,14	0,14	0,17	3,88	0,29
PP	32,78	1,05	2,27	311,55	2,31	1,90	0,63	1,90	17,78	1,90	1,90	161,26	161,26	27,91	161,26	273,49	273,49	168,16	274,22	308,78	1,90	1,90	2,31	1,90	1,90	273,49	0,00	161,26	1,90	1,90	2,27	273,49	3,99
PQ	31,12	0,99	2,15	294,68	2,20	1,81	0,60	1,81	16,88	1,81	1,81	153,09	153,09	26,49	153,09	259,63	259,63	159,64	259,37	293,13	1,81	1,81	2,20	1,81	1,81	259,63	0,00	153,09	1,81	1,81	2,15	259,63	3,79
PR	12,67	0,32	3,45	90,96	3,52	0,57	0,19	0,57	5,37	0,57	1,89	48,68	48,68	10,79	48,68	80,14	80,14	50,62	80,06	90,17	2,89	2,89	3,52	2,89	2,89	80,14	0,00	48,68	0,57	2,89	3,45	80,14	6,06
PS	1,42	0,01	1,21	0,94	1,23	0,01	0,00	0,01	0,12	0,01	0,01	1,11	1,11	1,21	1,11	0,83	0,83	1,09	0,83	0,93	0,01	1,01	1,23	0,01	0,01	0,83	0,00	1,11	0,01	0,01	1,21	0,83	2,12
PT	1,17	0,01	0,01	0,78	1,01	0,01	0,00	0,01	0,10	0,01	0,01	0,91	0,91	1,00	0,91	0,68	0,68	0,90	0,68	0,77	0,01	0,01	1,01	0,01	0,01	0,68	0,00	0,91	0,01	0,01	0,68	1,75	
PV	11,48	0,31	2,43	90,17	2,48	0,56	0,19	0,56	5,27	0,56	1,88	47,75	47,75	9,77	47,75	79,44	79,44	49,70	79,36	89,39	1,88	2,04	2,48	1,88	1,88	79,44	0,00	47,75	0,56	2,88	2,43	79,44	4,28
PW	7,43	0,18	2,15	51,88	2,20	0,33	0,11	0,33	3,07	0,33	1,65	27,86	27,86	6,33	27,86	45,70	45,70	28,96	45,66	51,43	1,65	1,81	2,20	1,65	1,65	45,66	0,00	27,86	0,33	1,65	2,15	45,66	3,79
PX	35,16	1,12	2,43	332,98	2,48	2,04	0,68	2,04	19,08	2,04	2,04	172,98	172,98	29,94	172,98	293,37	293,37	180,38	293,07	330,09	2,04	2,04	2,48	2,04	2,04	293,37	0,00	172,98	2,04	2,04	2,43	293,37	4,28
PY	13,28	1,77	3,61	95,29	3,68	3,03	1,68	3,03	7,81	3,03	3,03	51,00	51,00	11,00	51,00	83,95	83,95	53,03	83,87	94,47	3,03	3,03	3,68	3,03	3,03	83,95	1,00	51,00	3,03	3,03	3,61	83,95	6,35
P1D2	0,06	0,01	0,02	0,46	0,02	0,01	0,00	0,01	0,14	0,01	0,01	0,25	0,25	0,05	0,25	0,41	0,41	0,26	0,41	0,46	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,41	0,00	0,25	0,01	0,01	0,41	0,03	
P2D3	5,47	0,14	1,49	39,24	1,52	0,25	0,08	0,25	2,32	0,25	1,25	21,00	21,00	4,65	21,00	34,57	34,57	21,83	34,53	38,90	1,25	1,25	1,52	1,25	1,25	34,57	0,00	21,00	1,25	1,25	1,49	34,57	2,63
P3D4	4,04	0,13	0,28	38,29	0,29	0,23	0,08	0,23	2,19	0,23	0,23	19,89	19,89	3,44	19,89	33,74	33,74	20,74	33,70	37,96	0,23	0,23	0,29	0,23	0,23	33,74	0,00	19,89	0,23	0,23	0,28	33,74	0,49
P3D5	1,19	0,01	0,01	0,79	1,03	0,01	0,00	0,01	0,10	0,01	0,01	0,93	0,93	1,02	0,93	0,70	0,70	1,91	0,70	0,78	0,01	0,01	1,03	0,01	0,01	0,70	0,00	0,93	0,01	0,01	1,01	0,70	1,78
P4D1	0,15	0,00	0,01	0,27	0,01	0,01	0,00	0,01	0,08	0,01	0,01	0,73	0,73	1,13	0,73	0,24	0,24	0,76	0,24	0,27	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,24	0,00	0,73	0,01	0,01	0,24	0,02	
P4D7	0,03	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,16	0,16	0,03	0,16	0,28	0,28	0,17	0,28	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,16	0,00	0,00	0,28	1,00	

Tabela G1.6. Matriz Operador  $|I\rangle$  na condição real

	F1	F2	F3	F4	F5	FA	FB	FC	FD	FE	FF	FG	FI	FJ	FK	FL	FM	FN	FP	FQ	FR	FS	FT	FU	FV	FW	FX	F1D2	F2D3	F3D4	F3D5	F4D1	F4D7
P1	0,20	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,11	0,11	0,02	0,11	0,04	0,04	0,11	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
P2	7,88	1,64	2,14	56,52	2,19	1,80	0,60	1,80	4,63	1,80	1,80	30,25	30,25	6,70	30,25	49,79	49,79	31,45	49,75	56,03	1,80	1,80	2,19	1,80	1,80	49,79	0,00	30,25	1,80	1,80	2,14	49,79	3,77
P3	0,23	0,00	0,19	0,15	0,20	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,18	0,18	0,19	0,18	0,13	0,13	0,17	0,13	0,15	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,13	0,00	0,18	0,00	0,00	0,19	0,13	0,34
P4	3,93	0,13	0,27	37,34	0,28	0,23	0,08	0,23	2,13	0,23	0,23	19,33	19,33	3,34	19,33	32,77	32,77	20,15	32,74	37,00	0,23	0,23	0,28	0,23	0,23	32,77	0,00	19,33	0,23	0,23	0,27	32,77	0,48
P5																																	











# APÊNDICE H. NOMENCLATURA E FLUXOS DE EXERGIA PARA O DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO DO CICLO COMBINADO TADEUS

Tabela H.1. Nomenclatura usada no diagnóstico termoeconômico do Ciclo Combinado TADEUS

Equipamento	Descrição	Numeração nos esquemas	Operadores Exergéticos
CMB1	Câmara de Combustão da turbina a gás 1	3	3D12
CMB2	Câmara de Combustão da turbina a gás 2	24	24D22
CND1	Condensador	7	7D70, 7Dresf
COMP1	Compressor da turbina 1	2	2D4, 2D5, 2D6, 2D7, 2D15
COMP2	Compressor da turbina 2	23	23D19, 23D24, 23D26, 23D28, 23D30
DUCT1	Filtro de ar da turbina a gás 1	1	1D2
DUCT2	Filtro de ar da turbina a gás 2	22	22D16
ECON1	Economizador de alta pressão da Caldeira de recuperação 1	19	19D40, 19D49
ECON2	Economizador de alta pressão da Caldeira de recuperação 2	31	31D43, 31D52
ECON3	Economizador de baixa pressão da Caldeira de recuperação 1	21	21D55, 21D59
ECON4	Economizador de baixa pressão da Caldeira de recuperação 2	33	33D60, 33D62
EVAP1	Evaporador de alta pressão da caldeira de recuperação 1	17	17D39, 17D34
EVAP2	Evaporador de alta pressão da caldeira de recuperação 2	29	29D36, 29D42
EVAP3	Evaporador de baixa pressão da caldeira de recuperação 1	20	20D44, 20D51
EVAP4	Evaporador de baixa pressão da caldeira de recuperação 2	32	32D47, 32D56
GE1	Gerador elétrico da turbina a gás 1	34	-
GE2	Gerador elétrico da turbina a gás 2	35	-
GE3	Gerador elétrico da turbina a Vapor	36	-
GT1	Turbina a gás 1	4	4D11, 4Dwtg1
GT2	Turbina a gás 2	25	25D29, 25Dwtg2
M1	Junção de fluxos	8	-
M2	Junção de fluxos	11	-
M3	Junção de fluxos	10	-
PUMP1	Bomba de alta pressão da caldeira de recuperação 1	12	12D50
PUMP2	Bomba de alta pressão da caldeira de recuperação 2	26	26D53
PUMP3	Bomba de condensado	15	15D72

Tabela H.1. Nomenclatura usada no diagnóstico termoeconômico do Ciclo Combinado TADEUS (Continuação)

Equipamento	Descrição	Numeração nos esquemas	Operadores Exergéticos
SP3	Bifurcação de fluxos	13	-
SP4	Bifurcação de fluxos	27	-
SP5	Bifurcação de fluxos	14	-
SPHT1	Superaquecedor de alta pressão da caldeira de recuperação 1	16	16D33, 16D35
SPHT2	Superaquecedor de alta pressão da caldeira de recuperação 2	28	28D37, 28D38
SPHT3	Superaquecedor de baixa pressão da caldeira de recuperação 1	18	18D41, 18D45
SPHT4	Superaquecedor de baixa pressão da caldeira de recuperação 1	30	30D46, 30D48
ST1	Etapa de alta pressão da turbina a vapor	5	5D67, 5Dwtv1
ST2	Etapa de baixa pressão da turbina a vapor	6	6D69, 6Dwtv2
V1	Válvula	9	-

Tabela H.2. Fluxos de exergia para o diagnóstico termoeconômico do Ciclo Combinado TADEUS

Fluxos	E - Referência	E' - Real	B'' - Simulação
Comp1eixo	159136	163036	163036
Comp2eixo	159141	163565	163565
S1	0	0	0
S11	97407	99886	98502
S12	390195	395010	395010
S13	365486	368618	368618
S14	0	0	0
S15	131213	134019	134019
S16	-320	-324	-324
S19	131217	134716	134716
S2	-320	-408	-326
S21	365469	368754	368754
S22	390187	396295	396295
S24	6129	6291	6291
S26	3638	3730	3730
S28	1082	1108	1108
S29	97401	97988	97988
S30	135	138	138
S33	78757	80771	80594
S34	53571	55050	55050
S35	69767	71630	71814
S36	53571	53795	53795
S37	69767	69794	69794
S38	78752	79564	79564
S39	34733	35535	35535
S4	135	138	138
S40	16022	16450	16450
S41	33734	34523	34523
S42	34728	35424	35424
S43	16022	16075	16075
S44	7582	7714	7714
S45	8356	8498	8498
S46	33729	34395	34395
S47	7582	7839	7839
S48	8356	8636	8636
S49	22900	23395	23395
S5	1082	1102	1102
S50	6235	6405	6405
S51	15232	15599	15599
S52	22896	23502	23502

Tabela H.2. Fluxos de exergia para o diagnóstico termoeconômico do ciclo combinado TADEUS (Continuação)

Fluxos	E - Referência	E' - Real	B'' - Simulação
S53	6235	6259	6259
S54	1099	1116	1116
S55	6613	6782	6782
S56	15229	15566	15566
S57	1099	1134	1134
S58	616	644	644
S59	7004	7178	7178
S6	3638	3711	3711
S60	6610	6867	6867
S61	616	633	633
S62	7004	7058	7058
S63	5905	6063	6063
S64	5905	5925	5925
S65	139535	141424	141424
S66	16711	17134	17134
S67	78831	80081	80081
S68	94441	96093	96093
S69	31540	32313	32313
S7	6128	6258	6258
S70	1137	1179	1179
S71	15690	17134	17134
S72	1232	1276	1276
Sresf	5405	5485	5485
TG1eixo	288358	289921	292082
TG1eixo-Comp1eixo	129222	126885	126885
TG2eixo	288355	293887	293887
TG2eixo-Comp2eixo	129214	130322	130322
TV1eixo	53490	54043	54043
TV2eixo	50292	51004	51004
WB1	361	376	376
WB2	361	367	367
WB3	109	112	112
WliqTG1	126637	124348	124348
WliqTG2	126630	127715	127715
WliqTV	100733	101938	101938

## REFERÊNCIAS

- AL-ATTAB, K. A.; ZAINAL, Z. A. Externally fired gas turbine technology: A review. **Applied Energy**, v. 138, p. 474–487, 2015.
- ARENA, P. A.; BORCHIPELLINI, R. Application of different productive structures for thermoeconomic diagnosis of a combined cycle power plant. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 38, n. 7, p. 601–612, jul. 1999.
- ARRIETA, F. R. P. **Simulação do Esquema Térmico de Centrais Termelétricas para Estudos Paramétricos , Monitoração e Diagnóstico Preliminar do Desempenho**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- BAINA, F. et al. Analysis of a high-temperature heat exchanger for an externally-fired micro gas turbine. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 410–420, 2015.
- CERRI, G.; BORGHETTI, S.; SALVINI, C. Neural management for heat and power cogeneration plants. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 19, n. 7, p. 721–730, 2006.
- COCCO, D.; DEIANA, P.; CAU, G. Performance evaluation of small size externally fired gas turbine (EFGT) power plants integrated with direct biomass dryers. **Energy**, v. 31, n. 10–11, p. 1459–1471, 2006.
- CORREAS, L. **Diagnóstico Termoeconómico de la Operación de un Ciclo Combinado**. [s.l.] Universidad de Zaragoza, 2001.
- CORREAS, L. On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Suitability to Real-Time Monitoring. **Int. J. Thermodynamics**, v. 7, n. 2, p. 85–94, 2004.
- CORREAS, L.; MARTÍNEZ, Á.; VALERO, A. **Operation diagnosis of a combined cycle based on the structural theory of thermoeconomics**. ASME-IMECE. **Anais...Nashville (TE)**: 1999
- COTTON, K. C.; WESTCOTT, J. C. **Methods for measuring steam turbine-generator performance**. [s.l.] ASME 60-WA-139, 1960.
- DE ARMAS TEYRA, M. et al. **Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis de Sistemas Energéticos con MATLAB**. [s.l.] Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, 2008.
- FAST, M.; PALMÉ, T. Application of artificial neural networks to the condition monitoring and diagnosis of a combined heat and power plant. **Energy**, v. 35, n. 2, p. 1114–1120, fev. 2010.
- FRANGOPOULOS, C. Thermo-economic functional analysis and optimization. **Energy**, v. 12, n. 7, p. 563–571, jul. 1987.
- FRANGOPOULOS, C. A. Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 323–342, mar. 1994.
- GARCÍA-PEÑA, F. et al. **Advanced Operation Diagnosis for Power Plants. Performance Monitoring and Cost Assessment in Puertollano IGCC**. PowerGen Europe. **Anais...Helsinki**: 2000
- GATE CYCLE. **Gate Cycle for Windows Version 5.51**. Copyright© 1989-2003The General Electric Company. All rights reserved. 1 CD-ROM, , 2003.

- GAY, R.; MACFARLAND, M.; DIVINNEY, D. **MODEL-BASED PERFORMANCE MONITORING & OPTIMIZATION**. PI System Users' Conference 1999. *Anais...*1999
- GLUCH, J.; KRZYZANOWSKI, J. **APPLICATION OF INCOMPLETE MEASUREMENT DATA TO**. ASME TURBOEXPO 2000. *Anais...*Munich, Germany: 2000
- HAGAN, M. T. et al. **Neural Network Design**. 2nd Editio ed. [s.l: s.n.].
- HEO, G.; CHANG, S. H. Algebraic approach for the diagnosis of turbine cycles in nuclear power plants. **Nuclear Engineering and Design**, v. 235, n. 14, p. 1457–1467, jun. 2005.
- KALOGIROU, S. A. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 5, n. 4, p. 373–401, 2001.
- KAUTZ, M.; HANSEN, U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass. **Applied Energy**, v. 84, n. 7–8, p. 795–805, jul. 2007.
- KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis**. [s.l: s.n.].
- LAZZARETTO, A. et al. Four approaches compared on the TADEUS (thermoeconomic approach to the diagnosis of energy utility systems) test case. **Energy**, v. 31, n. 10–11, p. 1586–1613, ago. 2006.
- LAZZARETTO, A.; TOFFOLO, A. A critical review of the thermoeconomic diagnosis methodologies for the location of the causes of malfunctions in energy systems. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 128, n. 4, p. 335–342, 2006.
- LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Energy**, v. 31, n. 8–9, p. 1257–1289, jul. 2006.
- LERCH, F.; ROYO, J.; SERRA, L. **Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis-part II: Application to an Actual Power Plant**. ECOS. *Anais...*Tokyo: 1999
- LOZANO, M. A. et al. **Thermoeconomic diagnosis of energy systems**. FLOWERS' 94: Florence World Energy Research Symposium. *Anais...*Florence: 1994
- LOZANO, M. A.; VALERO, A. Application of the exergetic costs theory to a steam boiler in a thermal generating station. In: **ANALYSIS AND DESIGN OF AVANCED ENERGY SYSTEMS: APPLICATIONS, CAES, Vol. 3-2, ASME Book G0377B, 1987**. [s.l: s.n.].
- LOZANO, M. A.; VALERO, A.; SERRA, L. **Theory of exergetic cost and thermoeconomic optimization***Proceedings of the international symposium ENSEC, 1993*.
- MATHWORKS. **MATLAB**, 2013. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>
- OROZCO, D. J. R. et al. A new methodology of thermodynamic diagnosis, using the thermoeconomic method together with an artificial neural network (ANN): A case study of an externally fired gas turbine (EFGT). **Energy**, v. 123, 2017.
- OROZCO, D. J. R.; VENTURINI, O. J.; PALACIO, J. C. E. **Parametric analysis of an externally fired-gas turbine (EFGT): effect of main parameters over the power generated, cycle efficiency and exergy destruction**. 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. *Anais...*2015. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=COB-2015-0847>>
- PACHECO-IBARRA, J. J. et al. **Monitoreo y Diagnostico Termoeconômico en línea para sistemas energéticos parte I. En servicio local**. X congreso y exposición latinoamericana de Turbomaquinaria. *Anais...*México: 2007

PACHECO-IBARRA, J. J. **Metodologías de diagnóstico termoeconómico de sistemas energéticos (Diagnóstico de plantas de potencia)**. 1st Ed ed. Saarbrücken, Germany: Editorial académica española, 2011. v. 7

PETRAKOPOULOU, F. et al. Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 146–152, maio 2012.

PIACENTINO, A.; TALAMO, M. Critical analysis of conventional thermoeconomic approaches to the diagnosis of multiple faults in air conditioning units: Capabilities, drawbacks and improvement directions. A case study for an air-cooled system with 120 kW capacity. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 1, p. 24–44, 2013.

REINI, M.; TACCANI, R. On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. The Role of the Fuel Impact Formula. **Int. J. Thermodynamics**, v. 7, n. 2, p. 61–72, 2004.

REMIRO, J. A.; LOZANO, M. A. Control del Rendimiento y Diagnóstico Termoeconómico de Centrales Termoeléctricas. **Información Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 87–96, 2007.

ROSENBLATT, F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**, v. 65, n. 6, p. 386–408, 1958.

ROYO, J. **Las Ecuaciones características de los sistemas térmicos. La energía libre relativa**. [s.l.] Universidad de Zaragoza, 1994.

ROYO, J.; VALERO, A. Towards a Unified Description of the Energy Behavior of Thermomechanical Systems. In: **THERMODYNAMICS AND THE DESIGN, ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF ENERGY SYSTEMS**. San Francisco, California: R.J. Krane. AES Vol. 35, ASME Book no. H01045, 1995. p. 127–134.

ROYO, J.; VALERO, A.; ZALETAGUILAR, A. The dissipation temperature: A tool for the analysis of malfunctions in thermomechanical systems. **Energy Conversion and Management**, v. 38, n. 15–17, p. 1557–1566, out. 1997.

RÚA, O. D. J.; ESCOBAR, P. J. C.; VENTURINI, O. J. **Análisis de Malfunciones Intrínsecas en una Central de Ciclo Combinado**. The 10th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2013. **Anais...Viña del Mar**: 2013. Disponível em: <[http://www.clagtee2013.cl/conf\\_venue.html](http://www.clagtee2013.cl/conf_venue.html)>

RÚA OROZCO, D. J. **Desenvolvimento de um Modelo Computacional para Monitoração e Diagnóstico de Centrais Termelétricas de Ciclo Combinado Utilizando o Método Termoeconômico**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2013.

RÚA OROZCO, D. J.; VENTURINI, O. J.; ESCOBAR PALACIO, J. C. Diagnóstico termodinâmico de um ciclo com turbina de queima externa (EFGT) usando o método termoeconômico em conjunto com redes neurais artificiais (RNA). **THE XI LATIN-AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2015 “BIOENERGY FOR ELECTRICITY GENERATION AND ECOLOGICAL ISSUES IN POWER PLANTS”**, 2015.

RÚA OROZCO, D. J.; VENTURINI, O. J.; ESCOBAR PALACIO, J. C. THERMODYNAMIC DIAGNOSTIC METHODOLOGY USING THERMOECONOMIC AND THERMODYNAMIC INDICATORS IN CONJUNCTION WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ANN). **16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**, 2016.

SANTOS, J. J. C. S. et al. **ON THE CONSISTENCY OF THE THERMOECONOMIC APPROACHES REGARDING A REVERSIBLE STEAM POWER CYCLE**. ECOS 2009.

Anais...Foz do Iguaçu: 2009

SANTOS, J. J. C. S. **Aplicação da Neguentropia na Modelagem Termoeconômica de Sistemas**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2009.

SECCHIN, T. R. **Diagnóstico Termoeconômico de uma Central de Cogeração do Setor Siderúrgico utilizando o Modelo H&S**. Vitória: UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, 2015.

SERRA, L. **PhD Thesis. Optimización exergoeconmica de sistemas termicos**. [s.l.] Universidad de Zaragoza, 1994.

SILVA, J. A. M. **Sistema de Informação para a Monitoração e Diagnóstico de Desempenho de Unidades Termelétricas de Ciclo Combinado**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2009.

SJÖBERG, J. **Mathematica Neural Networks: Train and Analyze Neural Networks To Fit Your Data**. [s.l.: s.n.].

SPENCER, R. C.; COTTON, K. C.; CANNON, C. N. **A method for Predicting the Performance of Steam turbine-Generators**. [s.l.: s.n.].

SUZUKI, K. **Artificial neural networks: Methodological advances and biomedical applications**. 1st Ed ed. Rijeka: InTech, 2011.

SUZUKI, K. **Artificial Neural Networks: Architectures and Applications**. 1st Ed ed. Rijeka: InTech, 2013.

SZARGUT, J. Chemical Exergies of the Elements. **Applied Energy**, v. 32, n. 4, p. 269–286, 1989.

TOFFOLO, A.; LAZZARETTO, A. On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Indicators to Diagnose Malfunctions: Application of a New Indicator for the Location of Causes. **Int. J. Thermodynamics**, v. 7, n. 2, p. 41–49, 2004.

TORRES, C. et al. **Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part I: on malfunction and dysfunction analysis**. ECOS. Anais...Tokyo: 1999

TORRES, C. et al. Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part I. On malfunction and dysfunction analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 9–12, p. 1503–1518, jun. 2002.

TORRES, C.; VALERO, A. **Curso de Doctorado: Termoeconomía**. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 2000.

TOSH, C. R.; RUXTON, G. D. **Modelling perception with artificial neural networks**. First publ ed. New York: Cambridge University Press, 2010.

TRIBUS, M.; EVANS, R. B. **The Thermoeconomic Conversion of Sea water**. Los Angeles: [s.n.].

TSALAVOUTAS, A. et al. **COMBINING ADVANCED DATA ANALYSIS METHODS FOR THE CONSTITUTION OF AN INTEGRATED GAS TURBINE CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC SYSTEM**. ASME TURBOEXPO 2000. Anais...Munich, Germany: 2000

TSATSARONIS, G.; PISA, J. Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems — application to the CGAM problem. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 287–321, mar. 1994.

UCHE, F. J. **Thermoeconomic Analysis and Simulation of a Combined Power and**

**Desalination Plant.** [s.l.] Universidad de Zaragoza, 2000.

USÓN, S. **Comparative analysis of causal diagnosis methods of malfunctions in power cycles.** [s.l.] University of Zaragoza, 2008.

USÓN, S.; VALERO, A. **Thermoeconomic Diagnosis of Energy Systems.** 1st Ed ed. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.

USÓN, S.; VALERO, A. Thermoeconomic diagnosis for improving the operation of energy intensive systems: Comparison of methods. **Applied Energy**, v. 88, n. 3, p. 699–711, mar. 2011.

USÓN, S.; VALERO, A.; CORREAS, L. Quantitative Causality Analysis for the Diagnosis of Energy Systems. **Int. J. Thermodynamics**, v. 12, n. 1, p. 9–16, 2009.

USÓN, S.; VALERO, A.; CORREAS, L. Energy efficiency assessment and improvement in energy intensive systems through thermoeconomic diagnosis of the operation. **Applied Energy**, v. 87, n. 6, p. 1989–1995, jun. 2010.

VALERO, A. et al. GAUDEAMO: A system for energetic/exergetic optimization of coal power plants. **Computer-aided Engineering of Energy Systems**, v. 1, n. Optimization-AES-Vol. 2-1, p. 43–49, 1986.

VALERO, A. et al. Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 365–381, mar. 1994.

VALERO, A. et al. **On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part-1 the TADEUS problem.** ECOS 2002. **Anais...**Berlin, Germany: 2002a

VALERO, A. et al. **On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part-2 Malfunction Definitions and Assessment.** ECOS 2002. **Anais...**Berlin, Germany: 2002b

VALERO, A. et al. Structural theory and thermoeconomic diagnosis: Part II: Application to an actual power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 9–12, p. 1519–1535, jun. 2002c.

VALERO, A. et al. Thermoeconomic philosophy applied to the operating analysis and diagnosis of energy utility systems. **International Journal of Thermodynamics**, v. 7, n. 2, p. 33–39, 2004a.

VALERO, A. et al. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part 1: the TADEUS problem. **Energy**, v. 29, n. 12–15, p. 1875–1887, dez. 2004b.

VALERO, A. et al. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part 1: the TADEUS problem. **Energy**, v. 29, n. 12–15, p. 1875–1887, dez. 2004c.

VALERO, A. et al. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions Part 2. Malfunction definitions and assessment. **Energy**, v. 29, n. 12–15, p. 1889–1907, dez. 2004d.

VALERO, A.; CORREAS, L.; SERRA, L. On-line thermoeconomic diagnosis of thermal power plants. In: BEJAN, A.; MAMUT, E. (Eds.). **Thermodynamics and optimization of complex energy systems.** [s.l.] Kluwer Academic Publishers, 1999. p. 117–136.

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; BARTOLOMÉ, J. L. **On-line monitoring of power-plant performance, using exergetic cost techniques.** EURO THERM SEMINAR no 41: Exergoeconomical Analysis and Optimization in Chemical Engineering. **Anais...**Aachen, Germany: dez. 1995. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/1359431195000925>>

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; BARTOLOMÉ, J. L. On-line monitoring of power-plant performance, using exergetic cost techniques. **Applied Thermal Engineering**, v. 16, n. 12, p. 933–948, 1996.

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; MUÑOZ, M. A general theory of exergy savings – part I: On the exergetic cost. **Computer-aided Engineering of Energy Systems**, v. 3, n. Second Law Analysis and Modelling, p. 1–8, 1986.

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; TORRES, C. **On causality in organized energy systems, part III: theory of perturbations**. FLOWERS' 90: Florence World Energy Research Symposium. **Anais...**Florence: 1990

VALERO, A.; MUÑOZ, M.; LOZANO, M. A. A general theory of exergy savings-part II: on the thermoeconomic cost. **Computer-aided Engineering of Energy Systems**, v. 3, n. Second Law Analysis and Modelling, p. 9–16, 1986a.

VALERO, A.; MUÑOZ, M.; LOZANO, M. A. A general theory of exergy savings-part III: energy savings and thermoeconomics. **Computer-aided Engineering of Energy Systems**, v. 3, n. Second Law Analysis and Modelling, p. 17–22, 1986b.

VALERO, A.; TORRES, C. Application of thermoeconomics to operation diagnosis of energy plants. In: FRANGOPOULOS, C. A. (Ed.). **Exergy, Energy System Analysis and Optimization**. [s.l.] EOLSS Publications, 2006. v. IIP. 146–161.

VALERO, A.; TORRES, C.; LERCH, F. **Structural theory and thermoeconomic diagnosis, part III: intrinsic and induced malfunctions**. ECOS. **Anais...**Tokyo: 1999

VANKAYALA, V. S. S.; RAO, N. D. **Artificial neural networks and their applications to power systems—a bibliographical survey****Electric Power Systems Research**, 1993.

VERDA, V. et al. **On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions Part-3 Approaches to the Diagnosis Problem**. ECOS. **Anais...**Copenhagen: 2003

VERDA, V. Thermoeconomic Analysis and Diagnosis of Energy Utility Systems from Diagnosis to Prognosis. **Int. J. Thermodynamics**, v. 7, n. 2, p. 73–83, 2004.

VERDA, V. et al. The effects of the control system on the thermoeconomic diagnosis of a power plant. **Energy**, v. 29, n. 3, p. 331–359, mar. 2004.

VERDA, V. Accuracy level in thermoeconomic diagnosis of energy systems. **Energy**, v. 31, n. 15, p. 3248–3260, dez. 2006.

VERDA, V. Prediction of the fuel impact associated with performance degradation in power plants. **Energy**, v. 33, n. 2, p. 213–223, fev. 2008.

VERDA, V.; BACCINO, G. Thermoeconomic approach for the analysis of control system of energy plants. **Energy**, v. 41, n. 1, p. 38–47, maio 2012.

VERDA, V.; BORCHIELLINI, R. Exergy method for the diagnosis of energy systems using measured data. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 490–498, abr. 2007.

VERDA, V.; SERRA, L.; VALERO, A. **Effects of the Regulation System on the Thermoeconomic Diagnosis of a Power Plant. Part I: The Diagnosis Procedure**. ECOS 2001. **Anais...**Istanbul: 2001

VERDA, V.; SERRA, L.; VALERO, A. Zooming Procedure for the Thermoeconomic Diagnosis of Highly Complex Energy Systems. **International Journal of Applied**

**Thermodynamics**, v. 5, n. 2, p. 75–83, 2002a.

VERDA, V.; SERRA, L.; VALERO, A. Effects of the Productive Structure on the Results of the Thermo-economic Diagnosis of Energy Systems. **Int. J. Thermodynamics**, v. 5, n. 3, p. 127–137, 2002b.

VERDA, V.; SERRA, L.; VALERO, A. The effects of the control system on the thermo-economic diagnosis of a power plant. **Energy**, v. 29, n. 3, p. 331–359, mar. 2004.

VERDA, V.; SERRA, L.; VALERO, A. Thermo-economic Diagnosis: Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems. Part 1: Detection and Localization of Anomalies. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 127, n. 1, p. 42–49, 2005.

VIÑUELA, P. I.; LEÓN, I. M. G. **Redes neuronales artificiales un enfoque práctico**. Madrid: PEARSON EDUCACION, 2004.

VON SPAKOVSKY, M. R. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. **Energy**, v. 19, n. 3, p. 343–364, mar. 1994.

WIDROW, B.; HOFF, M. E. **Adaptive switching circuits**. 1960 IRE WESCON Convention record. **Anais...Los Angeles: 1960.** Disponível em: <[https://books.google.com.br/books/about/1960\\_IRE\\_WESCON\\_Convention\\_record.html?id=HkZGAQAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/1960_IRE_WESCON_Convention_record.html?id=HkZGAQAIAAJ&redir_esc=y)>

ZALETA-AGUILAR, A. **Conceptos sobre el diagnóstico y la evaluación termoeconómica de turbinas de vapor**. [s.l.] Universidad de Zaragoza, 1997.

ZALETA-AGUILAR, A. et al. **Análisis y Evaluación de Malfunciones en una Planta Termoenergética**. IV Congreso SOMIM. **Anais...Juárez, Chihuahua: 1998a**

ZALETA-AGUILAR, A. et al. **Herramientas termodinámicas para el diagnóstico de desviaciones en equipos termomecánicos**. Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana de Ingenieros Mecánicos, 5a. ed. **Anais...Ciudad Juarez, México: 1998b**

ZALETA-AGUILAR, A. et al. A Reconciliation Method Based on a Module Simulator. An Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. **Int. J. Thermodynamics**, v. 7, n. 2, p. 51–60, 2004a.

ZALETA-AGUILAR, A. et al. Thermo-characterization of power systems components: a tool to diagnose their malfunctions. **Energy**, v. 29, n. 3, p. 361–377, mar. 2004b.

ZALETA-AGUILAR, A. et al. Concept on thermo-economic evaluation of steam turbines. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 2–3, p. 457–466, fev. 2007.

ZALETA-AGUILAR, A.; ROYO, J.; VALERO, A. **Basis for an Integral Malfunctions Analysis in Thermomechanical Systems**. THERMODYNAMIC ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF ENERGY SYSTEMS-TAIES'97. ASME Book no. I00331, Beijing World Pub. Corp. **Anais...Beijing, China: 1997**