

Wagner Ferreira Silva

**GESTÃO TERMOECOLÓGICA DE USINAS
TERMOELÉTRICAS COM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA: MODELO BASEADO EM ASPECTOS TÉCNICOS,
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Lucila Maria de Souza Campos

Florianópolis, SC
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ferreira Silva, Wagner
GESTÃO TERMOECOLÓGICA DE USINAS TERMOELÉTRICAS COM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA : MODELO BASEADO EM
ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS / Wagner
Ferreira Silva ; orientador, Lucila Maria de Souza
Campos, coorientador, Paulo Augusto Cauchick
Miguel, 2017.
223 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis,
2017.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Gestão
termoecológica. 3. Entrância. 4. Ecoeficiência . 5.
Ecologia Industrial.. I. Campos, Lucila Maria de
Souza . II. Miguel, Paulo Augusto Cauchick . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Produção. IV. Titulo.

Wagner Ferreira Silva

**GESTÃO TERMOECOLÓGICA DE USINAS
TERMOELÉTRICAS COM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA: MODELO BASEADO EM ASPECTOS TÉCNICOS,
ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

Esta tese foi julgada adequada e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Florianópolis, 07 de dezembro de 2017.

Prof.^ª. Dr.^ª. Lucila Maria de Souza Campos
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^ª. Dr.^ª. Lucila Maria de Souza Campos
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Paulo Augusto Cauchick Miguel
Co-Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Edson Pacheco Paladini
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Carlos Manuel Taboada Rodriguez
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Jorge Laureano Moya Rodriguez
Universidade Federal da Bahia

Prof.^ª. Dr.^ª. Simone Sartori
Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE

Dedico este trabalho a minha família que sempre acreditou em mim e esteve ao meu lado a aos meus colegas de estudo que muito me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

A ajuda dos meus pais pela herança de persistência, força de vontade, honestidade e dignidade..

Aos meus queridos orientadores, pelo apoio ao longo de todo o processo deste doutoramento, pelas sugestões, pelos ensinamentos, pela amizade, confiança, atenção e respeito.

A ajuda de meus amigos e colegas de estudo que me incentivaram a desenvolver estes estudos com dedicação e profundidade.

As empresas que permitiram total acesso aos dados e execução da pesquisa, assim como aos meus colegas de trabalho e estagiárias que auxiliaram na coleta dos dados.

A minha esposa Cassia e aos meus filhos Pedro Henrique e Caio Eduardo que sempre me apoiaram e não me permitiram desistir nos momentos mais difíceis e que juntos me incentivam a ser uma pessoa cada vez melhor.

As instituições de ensino e fomento que contribuíram ao desenvolvimento deste trabalho, especialmente a UFSC, FAPEAM e ao ITEGAM.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do Governo do Estado do Amazonas por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, com a concessão de bolsa de estudo.

RESUMO

Embora no mundo exista uma tendência ao uso das energias renováveis, nas usinas termoelétricas, a principal fonte geradora de energia ainda são os combustíveis fósseis. Essas usinas apesar de gerar a potência elétrica demandada para o consumo, são fontes de poluição ao meio ambiente. Este trabalho desenvolve uma proposta para a gestão termoecológica de usinas termoelétricas, avaliando conjuntamente a eficiência térmica e ambiental de motores à combustão interna acionados por combustíveis fósseis, mas especificamente neste caso, o óleo combustível e o gás natural. De forma a associar as diferentes percepções de eficiência e avaliar a gestão termoecológica, foram criados diferentes modelos matemáticos utilizados no desenvolvimento de procedimentos que integraram os aspectos técnicos (eficiências), econômicos (consumo e custo de combustível) e ambientais (índice de emissões, função ecológica e Ecoeficiência). Por meio do uso de novas teorias, conceitos e lacunas de conhecimentos verificados na literatura, se aplica pela primeira vez o conceito de entransia para avaliar a eficiência dos motores à combustão interna e para criar um aprimoramento para a função ecológica desenvolvida inicialmente por Angulo-Brown. Para possibilitar a gestão termoecológica das usinas foi utilizado também o conceito de Ecoeficiência na otimização multicritério do despacho de carga, permitindo aos gestores avaliar diferentes simulações em busca da maior eficiência termoecológica. A avaliação prática dos procedimentos desenvolvidos foi feita por meio da aplicação dos mesmos em um procedimento computacional criado com parâmetros específicos ao tipo de usinas termoelétricas abordadas. Os principais resultados obtidos foram o avanço da teoria acerca da gestão termoecológica de usinas termoelétricas e a criação de uma ferramenta prática de cruzamento de dados e simulação de cenários para que os gestores utilizem em suas tomadas de decisões. O procedimento e a ferramenta criados possibilitam aos gestores a percepção real da variação dos impactos técnicos, econômicos e ambientais em relação aos efeitos das diferentes formas de operação das usinas termoelétricas. A efetividade dos procedimentos propostos foi comprovada por sua aplicação em casos reais com diferentes cenários de geração e tipo de combustível.

Palavras-chave: Gestão termoecológica, Eficiência Térmica, Entransia, Ecoeficiência, Ecologia Industrial.

ABSTRACT

Although there is a trend in the world of the use of renewable energy, in power plants, the main source of energy is still the fossil fuels. These plants, despite generating the electric power demanded for consumption, are sources of environmental pollution. This thesis develops a proposal for the thermoecological management of power plants, jointly evaluating the thermal and environmental efficiency of internal combustion engines driven by fossil fuels, but specifically in this case, fuel oil and natural gas. In order to associate the different perceptions of efficiency and to evaluate the thermo-ecological managing, different mathematical models were created, that were used in the development of procedures that integrated technical (efficiencies), economic (fuel consumption and cost) and environmental (emission index, ecological function and Eco-efficiency) variables. With new theories, concepts and knowledge gaps verified in the literature, the concept of entransy is applied for the first time to evaluate the efficiency of internal combustion engines and to create an improvement to the ecological function initially developed by Angulo-Brown. To make possible the thermoecological management of the plants, the concept of Eco-efficiency was included in the multi-objective optimization of load dispatch, allowing managers to evaluate different simulation scenarios for searching a higher thermoecological efficiency. The practical evaluation of the developed procedures was done through their application in a software created with specific parameters related to the type of thermoelectric power plants analyzed. The main results obtained were the advance of the theory about the thermoecological management of power plants and the creation of a practical tool for data analysis and simulations for the managers to use in their decision making process. The procedure and tool created allow the managers the real perception of the variation of the technical, economic and environmental impacts in relation to the effects of the different ways of operation of the thermoelectric power plants evaluated. The effectiveness of the proposed procedures was demonstrated by its application in real cases with different generation and fuel type scenarios.

Keywords: Thermoecological management, Thermal Efficiency, Entransy, Eco-efficiency, Industrial Ecology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Evolução da matriz energética brasileira (geração de eletricidade por tipo de combustível).	27
Figura 2.1 - O conceito de ecoeficiência.	47
Figura 2.2 - Formas de exergia.	59
Figura 3.1 - Etapas da pesquisa.	76
Figura 3.2 - O <i>triple bottom line</i> , a sustentabilidade e a Ecoeficiência dentro da gestão das usinas termoelétricas.	84
Figura 4.1 - Custo de combustível <i>versus</i> a potência de saída	105
Figura 4.2 - Procedimento geral simplificado.	110
Figura 5.1 - Comparação do consumo de combustível dos motores à gás da Usina X em potência máxima no momento da instalação.	114
Figura 5.2 - Comparação da eficiência energética dos motores à gás da Usina X em potência máxima no momento da instalação.	115
Figura 5.3 - Comparação do consumo de combustível dos motores à gás da Usina Y em potência máxima no momento da instalação	116
Figura 5.4 - Eficiência Energética dos motores da Usina Y em potência máxima no momento da instalação.	117
Figura 5.5 - Valores da eficiência exergética dos motores à gás da Usina X a máxima potência no momento da instalação.	118
Figura 5.6 - Valores da eficiência exergética dos motores à gás da Usina Y a máxima potência no momento da instalação.	119
Figura 5.7 - Valores da eficiência dos motores à gás da Usina X conforme os conceitos de Entransia momento da instalação.	120
Figura 5.8 - Valores da eficiência dos motores à gás da Usina Y conforme a os conceitos de entransia no momento da instalação.	121
Figura 5.9 - Comparação do consumo específico de combustível dos motores a HFO da Usina X a potência máxima no momento da instalação.	123
Figura 5.10 - Comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina X a potência máxima no momento da instalação.	124
Figura 5.11 - Comparação da eficiência exergética dos motores a HFO da Usina X a potência máxima no momento da instalação.	125
Figura 5.12 - Comparação do consumo específico de	

combustível dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.	126
Figura 5.13 - Comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.	127
Figura 5.14 - Comparação da eficiência exergetica dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.	128
Figura 5.15 - Comparação entre os resultados do cálculo da eficiência dos motores à gás da Usina Y conforme os três modelos matemáticos.	129
Figura 5.16 - Comparação entre os resultados do cálculo da eficiência dos motores à gás da Usina X conforme os três modelos matemáticos.	130
Figura 5.17 - Comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.	131
Figura 5.18 - Comparação da eficiência exergetica dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.	132
Figura 5.19 - Comparação da função de Ângulo Brown e a função proposta nesta tese.	134
Figura 5.20 - Diagrama de Pareto com os resultados da minimização do custo e das emissões.	138
Figura 5.21 - Potências fornecidas por cada gerador para o despacho programado.	139
Figura 5.22 - Custos que incorrem cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.	140
Figura 5.23 - Emissões provocadas por cada gerador para a demanda de potência programada.	141
Figura 5.24 - Diagrama de Pareto com os resultados da minimização do custo e da ecoeficiência.	144
Figura 5.25 - Potências fornecidas por cada gerador para atender o despacho programado.	145
Figura 5.26 - Custos que incorrem cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.	146
Figura 5.27 - Valores da ecoeficiência de cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.	146
Figura 5.28 - Diagrama de Pareto com os resultados da minimização do custo e da ecoeficiência para a usina	

termoelétrica virtual.	148
Figura 5.29 - Potencias fornecidas por cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.	149
Figura 5.30 - Custos que incorre de cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.	149
Figura 5.31 - Valores da ecoeficiência de cada gerador para a demanda de potência programada.	150
Figura 5.32 - Valores da potência fornecida por cada gerador para atender a demanda de potência programada.	153
Figura 5.33 - Valores do custo de cada gerador para atender a demanda de potência programada.	154
Figura 5.34 - Valores do índice de emissões de cada gerador para a demanda de potência programada.	155
Figura 5.35 - Valores da potência fornecida por cada gerador para atender a demanda de potência programada.	157
Figura 5.36 - Valores do custo de cada gerador para atender a demanda de potência programada.	158
Figura 5.37 - Índice de emissões atmosféricas totais.	159
Figura 5.38 - Contribuições na gestão termoecológica de usinas termoelétricas com motores de combustão interna.	165

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Objetivos específicos e resultados.	85
Quadro 4.1 - Dados de Entrada e eficiências de saída.	95
Quadro 4.2 - Dados de Entrada e energia calculada.	96
Quadro 4.3 - Dados motor a diferentes potências.	100
Quadro 4.4 - Resultados da energia dos gases de exaustão.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Variáveis de entrada.	80
Tabela 3.2 Variáveis de saída.	81
Tabela 5.1. Dados da usina X.	111
Tabela 5.2. Dados da usina Y.	112
Tabela 5.16. Dados característicos dos geradores da usina avaliada.	136
Tabela 5.17. Dados das perdas dos geradores da usina.	137
Tabela 5.18 Coeficientes f_i , e_i e d_i da equação de emissões a ser otimizada dos 10 geradores da usina.	137
Tabela 5.19 Resultados da gestão econômica – ambiental.	138
Tabela 5.20. Dados característicos dos geradores da usina virtual.	143
Tabela 5.21. Resultados de otimização multicriterial conforme os custos e a ecoeficiência.	147
Tabela 5.22. Resultados de otimização multicriterial da usina termoeletrica virtual conforme os custos e a ecoeficiência.	151
Tabela 5.23. Resultados da gestão econômica – ambiental de todos os motores da Usina Y sem desligar os motores menos eficientes.	152
Tabela 5.24. Resultados da gestão econômica – ambiental de todos os motores da Usina desligando os motores menos eficientes.	156
Tabela 5.3. Composição do gás natural da Usina X (Anexo 1).	201
Tabela 5. 4. Composição do gás natural da Usina Y (Anexo 1).	201
Tabela 5.5. Principais dados dos motores à gás da Usina X na hora da instalação para potência máxima (Anexo 2).	202
Tabela 5.6. Eficiência energética dos motores à gás da Usina X no momento da instalação (Anexo 3).	204
Tabela 5.7: Eficiência energética e exergetica dos motores à gás da Usina Y no momento da instalação (Anexo 4).	207
Tabela 5.8. Principais dados dos motores a HFO da Usina X e cálculos das eficiências na hora da instalação para diferentes valores de potência (Anexo 5).	210
Tabela 5.9. Principais dados do motor Bicomustível da Usina X e cálculo das eficiências na hora da instalação (Anexo 6).	213

Tabela 5.10. Principais dados dos motores a HFO da Usina Y no teste para diferentes valores de potência (Anexo 7).	214
Tabela 5.11. Valores da Eficiência dos motores à gás da Usina Y na atualidade (Anexo 8).	218
Tabela 5.12. Valores da Eficiência dos motores à gás da Usina X na atualidade (Anexo 9).	219
Tabela 5.13. Principais dados dos motores a HFO da Usina Y na atualidade para diferentes valores de potência (Anexo 10).	220
Tabela 5.14. Dados do motor a diferentes potências (Anexo 11).	223
Tabela 5.15. Resultados da aplicação da Função Ecológica (Anexo 12).	224

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL- Agencia Nacional de Energia Elétrica
AS- Recozido Simulado
AS- Recozido Simulado
C2C- Cradle to Cradle
CDM- Clean Development Mechanism
CMMS- Multi-Criteria Decision Making
CSR- Responsabilidade Social Corporativa
CSR- Responsabilidade Social Corporativa
DEA- Análise Envoltória de Dados
DEA- Despacho Econômico e Ambiental
DEAC- Despacho Economico e Ambiental de Carga
DEAC- Despacho Econômico e Ambiental de Carga
DEC- Despacho Economico de Carga
DEC- Despacho Econômico de Carga
DHNS- Aquecimento de Redes de Aquecimento Urbano
DMU- unidades de tomada de decisão
DS- Desenvolvimento Sustentável
EA- Eficiência Ambiental
EDTR- Resistência Térmica Baseada na Dissipação de Entropia
EE- Eficiência Energética
EEf- Ecoeficiência
EEI- Ecoeficiência
EELD- Environmental and Economic Load Dispatch
EEs- Eficiências Energéticas
EIP- Parque Eco Industrial
ELD- Economic Load Dispatch
EMA- Environmental Management Account ou Contabilidade de Gestão Ambiental
EP- Produtividade Econômica
ER- Energias Renováveis
FAPEAM – Fundo de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas
GA- Algoritmo Genético
GEE- Gases de Efeito Estufa
GRI- Global Reporting Initiative
GWEE- Ecoeficiência do Aquecimento Global
HFO-Heavy Fuel Oil
HS- Harmonic Search
HSS- Heurística Híbrida Estocástica

HVAC-Heating, Ventilation and Air-Conditioning
IE- Ecologia Industrial
IHS- Algoritmo Harmônico de Pesquisa Melhorado
IS- Simbiose Industrial
JCR – Journal Citation Report
JI- Implementação Conjunta
LCA- Avaliação do Ciclo de Vida
MME- Ministério das Minas e Energia
MME- Ministério de Minas e Energia
NOS- Operador Nacional de Sistema
NPGA)- Algoritmo Genético de Pareto Aninhado
NSGAI- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PCI ou LHV- Poder Calorífico Inferior do Combustível
PE- Programação Evolutiva
RECP- Recursos e Produções Mais Limpas
SBSC- Sustentável Balance Scorecard
SIN- Sistema Interligado Nacional
TBL- Triple Bottom Line
WBSCD- Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1. OBJETIVOS	34
1.2. JUSTIFICATIVA.....	35
1.3. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	37
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	37
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	39
2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUSTENTABILIDADE - SOB A ÓTICA DO TRIPLE BOTTOM LINE 39	
2.2. A ECOEFICIÊNCIA.....	44
2.3. A ECOLOGIA INDUSTRIAL	52
2.3.1. Função Ecológica do Angulo – Brown.....	55
2.4. EFICIÊNCIA TÉRMICA CONFORME OS CONCEITOS DA ENERGIA E DA EXERGIA	56
2.4.1. Eficiência Energética - Energia	56
2.4.2. Eficiência Exergética - Exergia	58
2.5. O CONCEITO DE ENTRANSIA.....	60
2.5.1. Entransia Conforme as Leis da Termodinâmica.....	61
2.5.2. Entransia nos Ciclos de Carnot e Rankine.....	63
2.5.3. Entransia na Conversão de Calor em Trabalho	64
2.6. DESPACHOS DE CARGA - DEC/DEAC.....	66
2.6.1. Despacho Econômico de Carga (DEC)	67
2.6.2. Despacho Econômico e Ambiental (DEAC)	70
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	75
3.1. ETAPAS DA PESQUISA.....	75
3.1.1. Definição do Problema	77
3.1.2. Etapa 1: A Exploração	77
3.1.2.1. Redefinição e ajuste do problema	79
3.1.3. Etapa 2: Construção de um Modelo de Análise.....	79

3.1.4. Etapa 3: Seleção de variáveis e coleta de dados.....	80
3.1.4.1 Seleção das variáveis.....	80
3.1.4.2 Coleta de dados - Eficiência Térmica	82
3.1.4.3 Coleta de dados - Impactos Ambientais.....	83
3.1.5. Etapa 4: Desenvolvimento do algoritmo utilizando	
inteligência computacional	83
3.1.6. Etapa 5: Análise dos Resultados	85
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO	
PARA A GESTÃO TERMOECOLÓGICA DA USINA	87
4.1. MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DOS	
MOTORES DO PONTO DE VISTA ENERGÉTICO.....	87
4.2. MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DOS	
MOTORES DO PONTO DE VISTA EXERGÉTICO.....	88
4.3. MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DOS	
MOTORES DO PONTO DE VISTA DA ENTRANSIA E DA	
DISSIPACÃO DE ENTRANSIA	91
4.4. ENERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO	92
4.5. EXERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO	93
4.6. ENTRANSIA DOS GASES DE EXAUSTÃO	94
4.7. PRINCIPAIS DADOS E VARIÁVEIS A LEVAR EM	
CONTA PARA AVALIAR AS EFICIÊNCIAS CONFORME OS	
DIFERENTES CONCEITOS.....	95
4.8. PRINCIPAIS DADOS E VARIÁVEIS AVALIAÇÃO DA	
ENERGIA PERDIDA NOS GASES DE EXAUSTÃO.....	95
4.9. MODELO MATEMÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO	
DA ECOEFICIÊNCIA DA USINA	96
4.10. MODELO MATEMÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO	
DA FUNÇÃO ECOLÓGICA DA USINA.....	98
4.10.1. Dados de entrada para a Função Ecológica	99
4.10.2. Procedimento para aplicar a Função Ecológica	100
4.11. MODELO MATEMÁTICO – DESPACHO ECONÔMICO E	
AMBIENTAL	103

4.12. PROCEDIMENTO PARA A OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO ECONÔMICA E AMBIENTAL DA USINA USANDO NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM (NSGAI).....	107
4.13. PROCEDIMENTO GERAL PARA A OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA USINA DO PONTO DE VISTA ECONÔMICO E AMBIENTAL.....	109
5. RESULTADOS	111
5.1. DESCRIÇÃO DAS USINAS	111
5.2. COMPOSIÇÃO DO GÁS NATURAL DAS USINAS.....	112
5.3. EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS MOTORES DAS USINAS - MOMENTO DA INSTALAÇÃO	113
5.3.1. Eficiência Energética - Motores à Gás - Usina X	113
5.3.2. Eficiência Energética - Motores à Gás - Usina Y	115
5.3.3. Eficiência Exergética - Motores à Gás - Usina X.....	117
5.3.4. Eficiência Exergética - Motores à Gás - Usina Y.....	118
5.3.5. Eficiência conforme a Dissipação de Entropia - Motores à Gás - Usina X	119
5.3.6. Eficiência conforme a Dissipação de Entropia - Motores à Gás - Usina Y	121
5.3.7. Eficiência Energética e Exergética - Motores à HFO - Usina X	122
5.3.8. Eficiência Energética e Exergética - Motores à HFO - Usina Y	125
5.4. EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS MOTORES DAS USINAS AVALIAÇÃO NOS MOMENTOS ATUAIS	128
5.4.1. Eficiência Energética, Exergética conforme a Entropia - Motores à Gás - Usina Y	128
5.4.2. Eficiência Energética, Exergética conforme a Entropia - Motores à Gás - Usina X.....	129
5.4.3. Eficiência Energética e Exergética - Motores à HFO - Usina Y	130

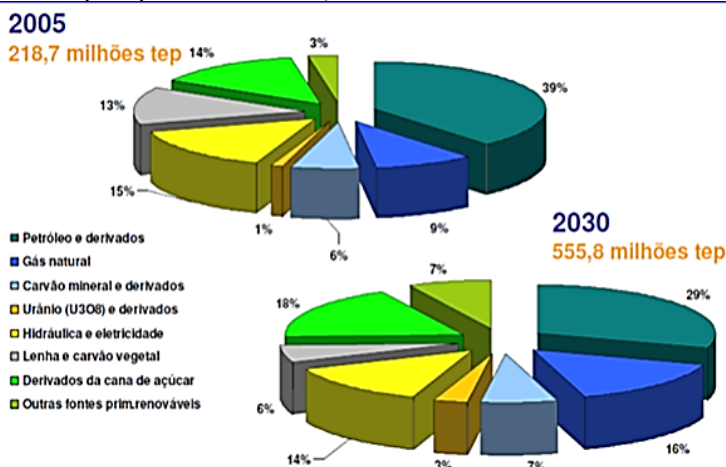
5.5. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO ECOLÓGICA PELA FÓRMULA DE ANGULO-BROWN E A FÓRMULA DESENVOLVIDA NESTA TESE.....	133
5.6. GESTÃO MULTIOBJETIVO DE UMA USINA GERADORA DE ELETRICIDADE CONSIDERANDO A DIMINUIÇÃO DO CUSTO E DOS IMPACTOS AMBIENTAIS.....	135
5.6.1. Gestão Termoecológica – custo e emissões atmosféricas.....	135
5.7. MEDIÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA	142
5.7.1. Gestão Termoecológica – custos e ecoeficiência	143
5.7.2. Gestão Termoecológica da usina virtual levando em conta a ecoeficiência e os custos	147
5.7.3. Gestão da usina Y com todos os motores, e considerando a possibilidade de desligar os motores menos eficientes	151
5.8. RESUMO DOS RESULTADOS	160
5.9. DISCUSSÕES	162
6. CONCLUSÕES.....	167
6.1. LIMITAÇÕES DA PESQUISA	169
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
REFERÊNCIAS.....	171

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário mundial de esgotamento progressivo das fontes tradicionais de energia e da procura de outras fontes não tradicionais, como as renováveis, é muito importante utilizar de forma mais eficiente todos os recursos disponíveis (fósseis, ou renováveis). Trata-se de obter as maiores quantidades de geração (trabalho) com o menor consumo de recursos energéticos primários, aumentando a eficiência energética (EE) de todos os processos relevantes de produção e serviços (ALLCOTT; GREENSTONE, 2012; KAUSHIKA *et al.*, 2016). Atualmente, a gestão das usinas termelétricas privilegia a busca pela melhor eficiência energética possível, objetivando a diminuição dos custos em detrimento dos aspectos ambientais. Isso se dá normalmente pelo despacho econômico de carga (DEC)¹ conforme a potência solicitada (SAKA *et al.*, 2017; SHAHINZADEH *et al.*, 2017).

Embora exista a tendência mundial do uso de fontes de energia renováveis, nas usinas termoelétricas, os combustíveis fósseis ainda representam um elevado percentual dentre as alternativas para geração de energia. A Figura 1.1 apresenta a capacidade de geração de energia por tipo de combustível, onde percebe-se que prevalece o consumo de carvão e gás natural para a geração de eletricidade.

Figura 1.1 – Evolução da matriz energética brasileira (geração de eletricidade por tipo de combustível).



Fonte: Cyrne e Stülp (2016)

¹ O termo “Despacho Econômico de Carga” se refere a programação de geração de energia

Entre os combustíveis fósseis, o uso do petróleo no setor de geração de eletricidade é marginal, responsável por aproximadamente 6% de toda a eletricidade gerada no mundo, 25% a menos que 1990 (OPEC, 2014). Por outro lado, a combustão dos combustíveis fósseis lança uma quantidade significativa de dióxido de carbono para a atmosfera (BREEZE, 2014). Além disso, os gases de exaustão emitidos podem provocar a chuva ácida, a mortalidade humana e o aquecimento global por contribuir para o Efeito Estufa (GEE) (SANTOS; LEGEY, 2013).

De modo geral, os principais impactos das usinas termoeletricas convencionais resultam da sua operação (SANTOS; HADDAD; HEWINGS, 2013). No local escolhido para a realização deste trabalho e avaliação das termoeletricas com motores à combustão, cidade de Manaus, Amazonas, 90% da energia produzida é oriunda de combustíveis fósseis, tendo sido até 2010, preferencialmente óleo combustível pesado e nos dias atuais o gás natural (FROTA *et al.*, 2012). A eficiência dos motores movidos à estes dois combustíveis foram avaliadas no presente trabalho.

Com relação à capacidade de geração de energia, o Brasil apresenta potencialidades em alguns segmentos que o faz se destacar no ramo de energia renovável. Mais especificamente, o país apresenta diversificada pauta de geração de eletricidade concentrando 40% do total no uso do carvão (RODRIGUES; BACCHI, 2016).

Segundo Feidt e Costea (2012), a grandeza dos ganhos com a diminuição dos consumos de fontes primárias, mediante maiores eficiências energéticas (EEs), pode ultrapassar os ganhos potenciais a ser obtido com o uso de fontes alternativas de geração de energia. Este argumento é um dos motivadores da abordagem neste trabalho de avaliação da eficiência dos motores à combustão interna em usinas termoeletricas.

Um dos aspectos das termoeletricas que mais prejudica o meio ambiente são as emissões atmosféricas das usinas geradoras de eletricidade, que, não só poluem o meio ambiente com substâncias nocivas, tais como monóxido de carbono e dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio, e outros (BHATTACHARJEE *et al.*, 2014). As usinas termoeletricas também contribuem para o aquecimento global devido à alta temperatura dos gases de exaustão.

Segundo Viana e Silva (2014), a produção de energia elétrica adequada à demanda constitui um fator relevante para a manutenção de taxas de crescimento do produto de uma economia. A afirmativa decorre do fato deste segmento produtivo se constituir num dos componentes de

infraestrutura de uma região. Em seu Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica, o Ministério das Minas e Energia – MME coloca que, considerando o âmbito nacional, a tendência apresentada pela demanda por energia supera a capacidade de geração do país (VIANA; SILVA, 2014).

Diante deste cenário, o conceito de Ecoeficiência tem recebido mais atenção na literatura no contexto do desenvolvimento sustentável (CARVALHO *et al.*, 2017; DÁAZ-AGUADO; BELLO, 2017; GHIMIRE; JOHNSTON, 2017). O estudo da Ecoeficiência visa preencher uma lacuna ao expressar a eficiência de uma atividade econômica em relação aos impactos negativos causados à natureza e é um assunto que precisa ser aprofundado na gestão de termoeletricas a base de combustíveis fósseis. De acordo com a definição, Ecoeficiência é medida como a taxa entre o valor adicionado ao produto e/ou serviço e o impacto ambiental² adicionado devido à atividade (CAIADO *et al.*, 2017; CARVALHO *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2017). A literatura sugere alguns indicadores, ou meios de medição, da Ecoeficiência (JANUS; BŁAŻEJOWSKA, 2017; WANG; XIAO, 2017), sendo a maior parte deles indicadores financeiros calculados de forma direta como exemplo o “resultado econômico por unidade de rejeito”, que dá à Ecoeficiência uma perspectiva limitada (KUOSMANEN; KORTELAJINEN, 2005). Nessa perspectiva, nos últimos anos, tem-se trabalhado muito na busca de indicadores e abordagens para avaliação da Ecoeficiência e.g. KOSKELA, 2015; MUNISAMY; ARABI, 2015; RASHIDI; SAEN, 2015; ARABI, DORAISAMY, *et al.*, 2016; PASSETTI; TENUCCI, 2016. No caso das usinas termoeletricas existem poucos trabalhos específicos que avaliam a ecoeficiência, como destacado a seguir. Arabi *et al.* (2017), por exemplo, avalia a ecoeficiência em usinas térmicas, mas usando o conceito de balanço de materiais. Han (2013) avalia a ecoeficiência usando envoltória de dados e Santos (2015) avalia a ecoeficiência fazendo uma valorização dos resíduos. Na pesquisa bibliográfica, realizada neste trabalho não foram encontrados trabalhos que avaliem a ecoeficiência usando métodos quantitativos e inteligência computacional, nem buscando otimizar e correlacionar este conceito ao de eficiência térmica em motores a combustão. O capítulo 2 desta tese

² Impactos ambientais por definição, são alterações no meio, que podem ser tanto negativas quanto positivas. A partir desse momento quando o termo impacto ambiental for utilizado estará se referindo a impactos ambientais negativos considerando a geração de emissões atmosféricas de gases poluentes ao meio ambiente (CHAN *et al.*, 2017).

apresenta a fundamentação teórica onde os avanços deste assunto na literatura revisada são destacados.

Outro conceito encontrado na literatura é o da Ecologia Industrial que, segundo Lowe e Evans (1995), é uma concepção dos sistemas industriais que busca criar sistemas menos prejudiciais ao meio ambiente. A abordagem da Ecologia Industrial busca um equilíbrio razoável entre o lucro industrial e a gestão ambiental e, assim, poder contribuir para o desenvolvimento sustentável (CUCURACHI *et al.*, 2017; PAULIUK *et al.*, 2017; YAP *et al.*, 2017). Os métodos da ecologia industrial, por sua vez, podem benéficamente incorporar os conceitos de eficiência térmica, baseados na segunda lei da termodinâmica, para fornecer ferramentas ainda mais poderosas. A eficiência térmica tem sido a constante busca dos gestores de usinas termoeletricas. É geralmente aceito que o aumento da eficiência de utilização de combustíveis fósseis de uma forma geral, torna tecnologias industriais ecologicamente mais benignas e seguras (BRONZATTI; IAROSZINSKI, 2008).

No Brasil, ainda existe uma grande quantidade de usinas termoeletricas suprindo energia ao sistema elétrico por meio da queima de combustíveis fósseis (RAMOS *et al.*, 2016). Cerca de 18,7% da eletricidade produzida no mundo provêm de usinas hidrelétricas, enquanto 81,3% de usinas termoeletricas (40% carvão, 6% óleo, 19% gás natural, acima de 15% nuclear, outros 1,3%) (RODRIGUES; BACCHI, 2016).

No caso da aplicação dos conceitos da Ecologia Industrial, existem alguns trabalhos aplicados à usinas termoeletricas e.g. ALLENBY, 2017; HAUCK *et al.*, 2017; SISKOS; WASSENHOVE, 2017. Contudo os trabalhos existentes focam em discussões teóricas sem avaliações quantitativas sobre como medir a ecologia industrial. Ao se avaliar a Ecologia Industrial quantitativamente neste trabalho, foi possível associar matematicamente seus resultados aos da eficiência energética e assim poder melhor avaliar os resultados de uma operação de geração de energia, conforme detalhado no capítulo 4.

O aumento da eficiência energética acarreta a diminuição do uso de recursos naturais, reduzindo os impactos produzidos na utilização dos recursos energéticos primários na geração de energia (GILLINGHAM *et al.*, 2016). Os processos da combustão são conhecidos na engenharia como ações irreversíveis que são responsáveis pela destruição da disponibilidade - igualmente conhecida como exergia, ou energia disponível (HERNANDEZ; CULLEN, 2016; SANTO; GALLO, 2017). O aumento rápido no consumo de energia global tem impulsionado o

desenvolvimento de tecnologias de conservação de energia (IRSYAD; NEPAL, 2016; GOMES *et al.*, 2016). Esse aumento torna necessário investigar meios concretos de se elevar a eficiência em processos produtivos, visando diminuir o consumo de recursos energéticos primários, de forma a se obter mais produtos com o mínimo consumo de combustível. Em geral, os aumentos da eficiência energética conduzem a uma diminuição dos custos da eletricidade sempre que obtidos com razoáveis custos adicionais como, por exemplo, novos investimentos (GILLINGHAM *et al.*, 2016). A avaliação da eficiência energética pode ser feita mediante os índices de consumo, expressados em relação ao produto ou serviço e/ou consumo. Estes índices são determinados por um conjunto de interações de origens diversas, cujo estudo e aprimoramento faz parte desta tese.

Uma eficiência adequada dos motores contribui para satisfazer a demanda de eletricidade com um menor consumo de combustível. Segundo Schutze (2015), a demanda mundial por energia elétrica vem a cada ano crescendo de forma exponencial e o Brasil não fica fora deste cenário. Desenvolver sistemas de geração de energia mais eficientes, que atendam essas crescentes necessidades de consumo, tem sido uma busca incessante por diversas nações, não somente preocupadas com a geração da energia para atender sua crescente demanda, mas também por uma geração de energia limpa e renovável. Busca-se minimizar, principalmente, o uso de combustíveis fósseis e consequentemente o custo e o nível de emissão de gases poluentes geradores do efeito estufa, já que esses são os maiores poluidores e agressores da camada de ozônio.

Ao se avaliar fatores que impactam na eficiência de usinas termoeletricas, depara-se com a programação do despacho³ das diversas unidades geradoras de uma usina. Esse fator possui impacto direto nos custos de geração de energia (SUMAN *et al.*, 2016). Normalmente, a programação adotada internamente nas usinas termoeletricas não segue nenhum critério de otimização, o que leva a gastos desnecessários de combustível, perdas de eficiência e, muitas vezes, maiores impactos ambientais principalmente por conta da queima de forma ineficiente do combustível (BASU, 2014).

Para minimizar os impactos ambientais, a legislação ambiental para as usinas termoeletricas determina a importância de monitorar a

³ A programação do despacho é a seleção dos equipamentos de geração de energia elétrica para o atendimento da demanda (SAKA *et al.*, 2017).

qualidade do ar para determinar as taxas de emissão de poluentes, tais como dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e material particulado. Esses dados têm que ficar em conformidade com os padrões de emissão estabelecidos pela legislação ambiental brasileira. Estes dados de monitoramento de emissões atmosféricas estão correlacionados ao tipo de combustível utilizado, potência das máquinas e outros fatores. Ao estudá-los, pode-se fazer uma modelagem e consequente previsão dos poluentes e impactos ambientais causados na área sob a influência das usinas termelétricas.

No caso das usinas geradoras de energia elétrica, incluem-se também as medidas do lado da produção (geração) (LIRA-BARRAGÁN *et al.*, 2015). As avaliações da Eficiência Energética (EE) do lado da produção de recursos energéticos secundários - potência elétrica, mecânica, combustíveis processados, aquecimento, refrigeração, climatização e outros - essencialmente passam pela diminuição dos recursos primários consumidos, ou o aumento da geração líquida à partir do mesmo consumo partindo da diminuição (ou reaproveitamento) de perdas de diversos tipos (BEJAN, 2016).

Graves (2004) mostra que quase 1/3 da energia do combustível fóssil é destruída durante o processo de combustão na geração de energia, o que se calcula como exergia. Isso tem causado um interesse renovado em análises de exergia, considerando a gestão eficaz e a otimização de sistemas térmicos como um problema moderno (WHITING *et al.*, 2017). Uma análise baseada na exergia é a do comportamento de um sistema com base na segunda lei da termodinâmica e que supera o limite de uma análise baseada em energia, ou seja na primeira lei da termodinâmica (XU *et al.*, 2017).

As equações para a segunda lei de análise de um sistema termodinâmico são apresentadas e discutidas exaustivamente ao longo dos anos (BEJAN, 2016; KJELSTRUP *et al.*, 2017) e são utilizadas para analisar o funcionamento de usinas de energia (ERDURANLI, 1997; ROSEN, 2003; SAHIN, 2006; UST *et al.*, 2007). Segundo Rosen (2003) e Dincer (2007), tornou-se notório que o uso apenas da primeira lei termodinâmica é inadequado para avaliação de algumas características de utilização de recursos energéticos. Por esta razão, o uso da segunda lei da termodinâmica tem sido intensificado em avaliações e desenvolvimento dos motores de combustão interna (KANOĞLU, 2005; AZOUMAH, 2009; ZHANG *et al.*, 2013).

Caton (2000), Santamaria (2006), Bourhis e Leduc (2010) desenvolveram trabalhos com base na segunda lei da termodinâmica e/ou nas análises exérgicas aplicadas a motores de combustão interna

(ciclos Otto e Diesel). Um estudo de revisão da literatura publicado por Caton (2000) e continuado por Rakoupolos (2006) mostrou a crescente importância dessa análise. Kanoglu (2005), Sayin (2007), Abusoglu (2009) e Leduc (2010) realizaram estudos sobre a aplicação da análise de exergia para motores à combustão com ignição por velas (ciclo Otto) e motores à combustão com ignição por compressão (ciclo Diesel), utilizando como combustíveis hidrocarbonetos e/ou combustíveis alternativos. Parte destes estudos foram conduzidos utilizando motores de mesmas características com combustíveis diferentes. Ertesvag (2007) investigou as variações de exergia química para gases atmosféricos e combustíveis gasosos em condições ambientes. O cálculo da variação de exergia química durante determinados processos mostrou que a separação de gases do ar é potencialmente mais eficiente em climas frios, enquanto a eletrólise da água em hidrogênio é favorável em climas mais quentes (ERTESVAG, 2007). O processo de combustão é a fase mais importante durante o funcionamento do motor e a modelagem da combustão de uma forma realista é muito importante para os cálculos de eficiência para os motores de ignição por velas (ciclo Otto) (SEZER; BILGIN, 2008 e 2009; RAKOPOULOS, 2009) e por compressão (ciclo Diesel) (AKASH, 2001; UST *et al.*, 2007). Até 2007 o conceito da exergia era o mais atual e amplamente utilizado para o cálculo da eficiência térmica com base na segunda lei da termodinâmica.

Em 2007, foi enunciado por Guo (2007) um novo conceito para avaliar a segunda lei da termodinâmica e, a partir desta data, a teoria tem sido aplicada e verificada em alguns campos da ciência. Guo (2007) criou uma nova quantidade física denominada “*entransy*”, doravante traduzida para o português como “*entransia*”. Segundo Guo (2007), a *entransia* foi identificada como uma base para a otimização dos processos de transferência de calor, em termos da analogia entre o calor e a condução elétrica. Esta quantidade, que será referida nesta tese, como *entransia*, corresponde à energia elétrica armazenada num condensador. Análises de transferência de calor mostram que a *entransia* de um objeto descreve a sua capacidade de transferência de calor, como a energia elétrica em um capacitor descreve a sua capacidade de transferência de carga (GUO, 2007).

O conceito de *entransia* se aplicou a plantas termoeletricas pela primeira vez em 2015 (KIM, 2015), onde se analisa a conversão do calor em trabalho nas usinas, contudo não se encontraram trabalhos que abordem a análise da eficiência de motores de usinas termoeletricas do ponto de vista da *entransia*. Sendo o conceito de *entransia* bem recente para a avaliação de eficiências, optou-se neste trabalho por utilizá-lo,

desenvolvê-lo e compará-lo com outros conceitos clássicos e consagrados na literatura quando se refere a gestão termoecológica.

Desta forma, por meio da avaliação da literatura conforme procedimentos descritos no Capítulo 3, verificou-se que não há trabalhos com otimização da Ecoeficiência das usinas termoelétricas juntamente com a redução do custo gerado pelo consumo de combustível e impacto ambiental das emissões atmosféricas. Não foi identificado na literatura um método de avaliar a quantitativamente a Ecologia Industrial e também não foram identificadas respostas e/ou procedimentos que permitam ao gestor de usinas termoelétricas efetuar de uma forma rápida e eficaz uma análise integrada dos impactos técnicos, econômicos e ambientais ocasionados ao se modular a carga dos motores à combustão interna no processo de geração de energia.

A partir das lacunas encontradas, os objetivos foram traçados e apresentados a seguir.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um procedimento para a gestão termoecológica de usinas termoelétricas com motores de combustão interna, considerando os aspectos técnicos (eficiência térmica), econômicos (consumo de combustível) e ambientais (função ecológica, ecoeficiência e índice de emissões).

Para atingir esse objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar em uma termoelétrica pontos de aprimoramento de gestão de usinas com foco em eficiência, incluindo a entropia, e variáveis ambientais;
- b) Fornecer um conjunto de expressões matemáticas para calcular e comparar as eficiências, o impacto ambiental e o custo;
- c) Otimizar a eficiência por meio de um modelo matemático e um procedimento computacional, correlacionando os aspectos relativos à potência, o custo (consumo de combustível) e os impactos ambientais;
- d) Realizar uma avaliação termoecológica de gestão para as diferentes possibilidades da usina atender a demanda de energia, visando a eficiência térmica, a ecoeficiência e o índice de emissões.

1.2. JUSTIFICATIVA

Na última década houve um aumento da pressão dos *stakeholders* exigindo informações e declarações também sobre as questões sociais e ambientais, além do desempenho financeiro (PATTBERG, 2016; FISCHER, 2017). Um exemplo da importância da incorporação da sustentabilidade nas práticas de negócios é o crescente número de livros e relatórios de sustentabilidade que vem sendo divulgados (LEE; SAEN, 2012; CRANE; MATTEN, 2016; SHIVA, 2016). Feidt e Costea (2012) afirmam que a grandeza dos ganhos ao nível mundial apenas com a diminuição dos consumos de fontes primárias, mediante maiores eficiências energéticas (EE), pode ultrapassar os ganhos potenciais, a se obter com o uso de fontes alternativas de geração de energia.

Há décadas o fornecimento de eletricidade confiável e de baixo custo é um dos objetivos de investigação. Vários métodos para o Despacho Econômico de Carga (DEC) têm sido desenvolvidos, a fim de enfrentar o desafio da provisão contínua e sustentável de eletricidade a um custo otimizado (GUVENC *et al.*, 2016; PRADHAN *et al.*, 2016; SUMAN *et al.*, 2016). A rápida escalada dos preços dos combustíveis, o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e as preocupações ambientais, obrigaram os setores industriais a incorporar as Energias Renováveis (ER) no portfólio energético.

Nos últimos anos, devido à deterioração do meio ambiente, os problemas das emissões têm sido adicionados ao despacho econômico de carga dando origem ao termo “Despacho Econômico Ambiental (DEA)” (HARDIA *et al.*, 2015). O DEA é um problema de otimização multiobjetivo não linear com dois objetivos concorrentes e conflitantes. Torna-se relevante na gestão das usinas termoelétricas, não só considerar os aspectos relacionados com os custos e as eficiências dos motores, mas também os aspectos relacionados com a poluição ambiental (JEDDI; VAHIDINASAB, 2014). Estudos têm sido desenvolvidos usando o despacho de carga como uma medida de avaliação e.g. KAMBOJ *et al.*, 2017; QIN *et al.*, 2017; SAKA *et al.*, 2017; SHAHINZADEH *et al.*, 2017.

Considerando que a Engenharia de Produção envolve um conjunto de recursos de *input* (insumos) usado para transformar algo, ou ser transformado em *outputs* (saídas) de bens e serviços, acredita-se que é possível transferir a abordagem conceitual e multidimensional da sustentabilidade empresarial para uma tomada de decisão (organizações eficientes e menos poluentes e organizações não eficientes e mais poluentes) com base em seus indicadores de eficiência e impacto

ambiental. Além disso, também possibilita identificar as mudanças de desempenho ao longo do tempo e poder comparar a eficiência entre diferentes plantas de geração de energia elétrica.

A literatura explorada até o momento mostrou que a eficiência conforme os conceitos exergéticos tem alguns paradoxos nos casos de transferência de calor que tradicionalmente utiliza o conceito de entropia quando a literatura já dispõe do conceito de entransia. O novo conceito da eficiência conforme a entransia ainda não foi aplicado nas usinas geradoras de energia elétrica, contudo, segundo Kim (2015), este conceito serve para avaliar as perdas de calor produzidas durante o processo de produção de eletricidade. Conforme mencionado anteriormente, não foi encontrado na literatura revisada um procedimento para avaliar conjuntamente o custo e as emissões atmosféricas de uma usina geradora de energia elétrica por meio de um modelo matemático otimizável, neste caso pode ser usado o conceito de Ecoeficiência. A expressão ecológica, proposta pela primeira vez por Angulo Brown (1991), considera além da potência de saída e a taxa de geração de entropia, um novo critério para motores térmicos. Porém, seu desenvolvimento não considera os impactos ambientais de uma usina geradora de energia elétrica. Associado a estes fatos, a pesquisa bibliográfica também mostrou que não se dispõe de uma ferramenta que permita ao gestor de termoeletricas avaliar e realizar o gerenciamento de uma usina geradora de eletricidade com base em uma otimização do despacho de carga, tendo em conta as emissões e que tenha incorporado os últimos avanços da ciência e da teoria na área térmica e ambiental.

Como destacado anteriormente, esta tese consiste em desenvolver um procedimento para a gestão termoecológica de usinas termoeletricas com motores à combustão interna utilizando diferentes pontos de vista de eficiência com a inclusão de variáveis ambientais (gestão termoecológica). Para isso, serão definidas as variáveis técnicas (eficiências), ambientais (índice de emissões, função ecológica e ecoeficiência) e econômicas (consumo de combustível) que permitam a construção de diferentes cenários de simulação interligados simultaneamente.

A contribuição científica é o avanço da ciência no campo da eficiência, associada ao desenvolvimento de uma proposta de gestão que se traduz em um procedimento e uma ferramenta que possibilite simulações, correlacionando as variáveis técnicas, econômicas e ambientais. Esta proposta permite aos gestores realizar simulações de diferentes cenários de geração e, a partir do mesmo, tomar decisões

sobre os impactos e pontos de operação face aos diferentes resultados e impactos na eficiência global das usinas.

Por meio deste trabalho, o gestor passará a ter um procedimento e uma ferramenta computacional que fará uso da otimização de um modelo matemático complexo para, após alimentar o sistema, obter de maneira rápida informações que lhe permitirá avaliar os diferentes cenários de geração segundo as principais teorias existentes e a associação delas. Assim poderá tomar decisões que irão permitir uma gestão com uma visão termoecológica e mais abrangente de suas usinas termelétricas.

1.3. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho considerou para efeitos de cálculo dos custos, exclusivamente o consumo de combustível das usinas avaliadas. O custo com combustível representa uma parcela superior a 60% podendo chegar, dependendo dos equipamentos, a 90% do custo operacional de uma usina termoeétrica. O cálculo deste custo operacional foi realizado com base nas medições de consumo de combustível realizadas durante a fase de coleta de dados de campo e no valor do combustível praticado na ocasião das medições.

Em relação ao tipo de usina termoeétrica, este trabalho focou em usinas com motores de combustão interna que utilizam um dos seguintes combustíveis: Óleo Diesel (OD), Óleo Combustível Pesado (OCB1), Gás Natural (GN) e/ou a combinação deles. O experimento foi desenvolvido coletando dados do sistema supervisor e por medições individuais na totalidade dos motores instalados nas duas usinas termoeétricas avaliadas.

Optou-se por avaliar duas termoeétricas específicas devido a quantidade total de motores instalados na mesma (total de 56 motores) representarem cerca de 40% dos motores de maior porte instalados na região no momento da pesquisa.

A região adotada para o trabalho foi a cidade de Manaus, Amazonas, onde o pesquisador recebeu apoio por meio de bolsa de estudos da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, além desta introdução. O Capítulo 2 apresenta o subsídio teórico sobre o qual a pesquisa se

fundamenta. Desenvolve-se o marco teórico, primeiramente avaliando na literatura a evolução das pesquisas em cada um dos assuntos relacionados ao tema, buscando apontar as lacunas existentes na literatura e, assim, fundamentando a realização deste estudo. São abordados os conceitos de Ecoeficiência, Ecologia Industrial, as diferentes expressões da primeira e segunda lei da termodinâmica para o cálculo da eficiência térmica e outros aspetos teóricos relacionados com a combustão. Neste capítulo estão aprofundados estudos e considerações que foram apresentadas na introdução e que mais a frente serão trabalhados e utilizados no desenvolvimento da tese.

O Capítulo 3 trata dos métodos e técnicas utilizadas para elaboração da tese. O principal propósito deste capítulo foi apresentar como a proposta foi construída e o trabalho foi desenvolvido. Nele descreve-se passo a passo todo o procedimento que permite que a pesquisa possa ser replicada, apresenta-se o papel da literatura na escolha do objeto de estudo, os tipos de dados utilizados e como foram coletados e analisados.

O Capítulo 4 apresenta todas as expressões matemáticas utilizadas e/ou desenvolvidas para avaliar as eficiências dos motores segundo a primeira e segunda lei da termodinâmica. Também são apresentadas as expressões desenvolvidas para a aplicação neste trabalho referentes a ecoeficiência e ecologia industrial. Ao final, apresenta-se o modelo matemático e o procedimento a ser utilizado na proposta de gestão termoecológica da usina.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação do procedimento desenvolvido no Capítulo 4 em diversos tipos de motores à combustão utilizados nas termoeletricas avaliadas. Evidencia-se, no capítulo, o atingimento do objetivo geral, bem como os objetivos específicos. São comparados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação do procedimento e ferramenta computacional, a importância de cada um deles do ponto de vista acadêmico e é demonstrada a importância deste trabalho como alternativa para a gestão de usinas termoeletricas.

O Capítulo 6 discute o trabalho realizado do ponto de vista da gestão termoecológica em relação ao que foi verificado na literatura existente. São apresentadas as evidências e implicações das contribuições para a prática e para a academia

O Capítulo 7 apresenta as conclusões, bem como as limitações desta tese e sugestões de trabalhos futuros. Por fim, são listadas as referências bibliográficas e evidenciados os apêndices as tabelas de dados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a concepção deste trabalho foi realizada uma busca pelo estado da arte em 4 (quatro) áreas distintas relacionadas ao tema que são: i) a questão ambiental, a sustentabilidade, a Ecoeficiência e a ecologia industrial que apresenta o conceito de eficiência ecológica; ii) a eficiência térmica conforme os conceitos da energia e da exergia; iii) a evolução dos conceitos termodinâmicos em termos de entropia e que serão a base do aperfeiçoamento a ser desenvolvido e; iv) a questão do despacho de carga onde se constata que durante o trabalho de pesquisa se observou a existência de algumas limitações dos métodos atualmente desenvolvidos nas bibliografias referenciadas.

À partir destas limitações e lacunas buscou-se criar, utilizando os conceitos desenvolvidos nas duas outras bases, uma proposta de gestão e uma ferramenta computacional para permitir ao gestor o gerenciamento e utilização prática da teoria desenvolvida.

2.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E SUSTENTABILIDADE - SOB A ÓTICA DO TRIPLE BOTTOM LINE

Segundo Feil *et al.* (2016), o uso da sustentabilidade e do Desenvolvimento Sustentável (DS) como tema em diversas discussões ocorreu em função da busca pela obtenção do bem estar a longo prazo. Os termos sustentabilidade e DS são confundidos e até tratados como sinônimos. Sendo assim, cabe realizar uma diferenciação destes termos (FEIL *et al.*, 2016).

Os conceitos de Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável foram concebidos com a finalidade de fornecer a ideia de um equilíbrio de longo prazo entre o ambiental, o econômico e o bem estar social da humanidade (HÖFER, 2009; CHASIN, 2014). Dessa forma, por meio de tecnologias e práticas, esses conceitos procuram minimizar o impacto humano ao meio ambiente.

Conforme Feil *et al.* (2016), a interpretação desse termo é considerada inconsistente e com alto grau de ambiguidade, especialmente na última década, haja visto que a sociedade moderna, em muitos casos, confunde com a ideia de crescimento, progresso, maturidade, evolução, ou riqueza. Segundo Yolles e Fink (2014), o surgimento do conceito de sustentabilidade tem atraído críticas significativas e que haveria a necessidade de encontrar uma compreensão coerente de seu significado.

Sartori *et al.* (2014), salientam que o desenvolvimento sustentável é objetivo a ser alcançado e a sustentabilidade é o processo para atingir o desenvolvimento sustentável. A alta complexidade da noção de desenvolvimento sustentável requer novas metodologias para a análise. Precisa-se de novos indicadores para medir o desempenho econômico da empresa e da economia nacional, que leva em conta aspectos ambientais também.

Para esta discussão, não tomou-se como base todas as dimensões da sustentabilidade definidas por Sachs (1993) que considera em seu trabalho além das dimensões econômicas, sociais e ambientais, que compõem o *Triple Bottom Line*, outras dimensões como ecológica, espacial, cultural e política. Neste trabalho optou-se por utilizar o TBL que envolve as dimensões mais aplicadas no campo empresarial, o conceito de Ecoeficiência que aborda as dimensões econômicas e ambientais e o conceito de Ecologia Industrial focando dar ênfase a sustentabilidade ecológica na limitação da redução de consumo de combustíveis fósseis (não-renováveis) e redução do volume de emissões atmosféricas (índice de emissões).

O *Triple Bottom Line* (TBL) é um conceito que avalia uma empresa conforme seu desempenho em três das dimensões da sustentabilidade apresentadas por Sachs (1993). Segundo Savits e Weber (2006), empresas que dirigem seus negócios conforme os indicadores da TBL são provavelmente empresas mais rentáveis a longo prazo, e muitas das principais empresas do mundo já tem adotado este enfoque (SAVITZ; WEBER, 2006).

Quando foi criado o termo de TBL, Elkington estava procurando por uma nova linguagem para a expansão da agenda ambiental, já que o conceito de sustentabilidade, segundo ele, não envolvia totalmente as dimensões sociais e econômicas da agenda, que já havia sido sinalizada em 1987 no Relatório Brundtland (WCED, 1987), reforçando que teria de ser abordada de uma forma mais integrada se o progresso ambiental real era para ser feito.

Milne e Gray (2013), argumentam que os relatórios de sustentabilidade com o uso de *Triple Bottom Line* (TBL), *Global Reporting Initiative* (GRI) e o emergente protocolo de Relatórios Integrados não estão aptos para avaliar totalmente a sustentabilidade, porque os relatórios, através da sua utilização desses protocolos, não combatem o aspecto urgente do nosso tempo: “sustentar os sistemas ecológicos de apoio à vida dos que a humanidade e outras espécies dependem” (p. 13). Os autores argumentam que “uma coisa que você não pode aprender à partir de um relatório de sustentabilidade é a

contribuição ou detração para a sustentabilidade que a organização tem feito" (p. 17). No entanto, relatórios de sustentabilidade incidem sobre o que aconteceu, mas esses acontecimentos não ajudam as instituições e, finalmente, a humanidade, a seguir um caminho que tange a sustentabilidade (MILNE; GRAY, 2013).

Medir o desempenho organizacional é difícil, especialmente quando o que tem que ser medido muda continuamente. Os conceitos de sustentabilidade alargaram drasticamente o âmbito de opções de medição e organizações líderes estão envolvidos em relatórios de sustentabilidade, mas não há nenhum sinal de consenso sobre um padrão comum de relatório e as estruturas concorrentes são incrivelmente complexas. Hubbard (2009), reconhece que a medição do desempenho sustentável tem que ser baseada conceitualmente, mas simplificada para usos práticos, o autor propõe uma abordagem baseada em um Balance Scorecard Sustentável (SBSC) acoplado com Índice de Performance de Sustentabilidade Organizacional. O índice ajuda a tornar o desempenho organizacional mensurável e sustentável, acessível às partes interessadas.

Segundo Dyllick e Hockerts (2002), às vezes o conceito de sustentabilidade é utilizado como o de Ecoeficiência, mas com essa abordagem deixa-se de considerar vários critérios importantes que uma empresa tem que satisfazer para se tornar sustentável. Os autores discutem como o conceito de desenvolvimento sustentável tem evoluído nas três últimas décadas, ainda definem três tipos de capital relevante dentro do conceito da sustentabilidade corporativa: capital social, natural e econômico. Baseado nesses conceitos, desenvolvem seis critérios para que os gestores possam avaliar a sustentabilidade corporativa: Ecoeficiência, Eco-efetividade, Sócio-eficiência, Sócio-efetividade, Suficiência e Equidade-Ecológica. Neste trabalho foi dada a ênfase à Ecoeficiência conforme será apresentado mais adiante.

O "*triple bottom line*" (TBL) envolve indicadores de desempenho econômico, ambiental e social para a gestão de processos e relatórios das empresas e negócios. Milhares de organizações anualmente usam agora esses relatórios de desempenho (CRIFO; FORGET, 2015).

Milne *et al.* (2008), argumentam que a TBL e GRI são condições insuficientes para que as organizações contribuam para a manutenção da ecologia da Terra. Paradoxalmente, eles podem reforçar maiores níveis de não-sustentabilidade nos negócios.

Huppés e Ishikawa (2009), analisam a compatibilidade entre os avanços tecnológicos no nível micro e a sustentabilidade em nível macro. Segundo os autores as duas principais abordagens para evitar a

degradação ambiental são aprimoramento tecnológico e decrescimento econômico. A sustentabilidade das opções tecnológicas pode ser medida por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) do sistema de tecnologia, combinada com a análise econômica do custo, o que oferece uma primeira pontuação integrada da Ecoeficiência. Segundo os autores, encaixar um conhecimento mais abrangente sobre as opções de avaliação da sustentabilidade requer uma estrutura sistemática unificadora e fornecem um procedimento de dez passos para este fim. A análise desenvolvida mostra a mudança na Ecoeficiência global da sociedade, combinando a criação de valor total com os impactos ambientais negativos.

Segundo Vellani e Ribeiro (2010), há no mercado divulgação de gastos incorridos em atividades não relacionadas com a sustentabilidade ecológica, como gastos ambientais. Para evitar isso, é necessário compreender o fato gerador do gasto ambiental. Eles investigam, analisam e identificam o tipo de evento relacionado com o fato gerador do gasto ambiental para melhorar a informação sobre as atividades que visam à sustentabilidade ecológica dos negócios. Além disso, analisam certos conceitos, limitam o campo de atuação da contabilidade da gestão ambiental e propõem um conceito chamado de *O Sistema Empresa Eco eficiente* e o analisa e o compara com determinados casos práticos (VELLANI; RIBEIRO, 2010).

Em um esforço para desenvolver a "economia de sustentabilidade" Baumgartner e Quaas (2010) negligenciam o conceito central da Economia-ambiental que é a "externalidade ambiental". Bergh (2010) assegura que tanto a sustentabilidade, como as externalidades, refletem uma perspectiva de sistemas e propõe que, para soluções eficazes de sustentabilidade, mais atenção seja dada aos *feedbacks* dos sistemas, em consideração às preferências e interações sociais e de energia e recuperação ambiental.

A medição da eficiência ecológica fornece algumas informações importantes para a gestão ambiental das empresas. A eficiência ecológica geralmente é medida pela comparação dos indicadores de desempenho ambiental. A análise envoltória de dados (DEA) mostra um elevado potencial para suportar tais comparações, porque não precisa de pesos explícitos que sejam necessários para agregar os indicadores. Em geral, a DEA assume que as entradas e saídas são "bens", mas à partir de uma perspectiva ecológica também podem ser considerados "males". Na literatura, "males" são tratados de maneiras diferentes e, por vezes, arbitrariamente escolhidos. Dyckhoff e Allen (2001), visam a derivação sistemática de modelos DEA ecologicamente estendidos. À partir dos

pressupostos da DEA, em teoria, produção e análise de atividade derivam de uma generalização dos modelos básicos da DEA, através da incorporação de uma função multidimensional (f) de valor.

Muitas empresas iniciaram uma variedade de iniciativas de sustentabilidade para atender às demandas e expectativas da sociedade. Embora a maioria dos analistas argumentam que estas iniciativas contribuem para tornar as empresas mais rentáveis, há muitos gestores que ainda não estão convencidos da validade deste argumento. A razão é que a maioria das iniciativas sustentáveis têm sido desenvolvidas de forma isolada da atividade empresarial e ainda não estão diretamente ligadas à estratégia de negócios. Uma forma de reforçar a ligação entre os dois é medir o grau em que uma empresa aumenta o desempenho como resultado da implementação de iniciativas sustentáveis. Szekely e Knirsch (2005) examinaram as melhores métricas disponíveis usadas por vinte grandes empresas alemãs para medir a sustentabilidade.

Segundo Sachs (1993), a dimensão da sustentabilidade ecológica visa a preservação dos recursos naturais na produção de recursos renováveis e na limitação de uso dos recursos não-renováveis; limitação do consumo de combustíveis fósseis e de outros recursos esgotáveis ou ambientalmente prejudiciais, substituindo-os por recursos renováveis e inofensivos; redução do volume de resíduos e de poluição, por meio de conservação e reciclagem; autolimitação do consumo material; utilização de tecnologias limpas; definição de regras para proteção ambiental.

A economia da sustentabilidade possui objetivos conflitantes, ou seja, busca manter um crescimento econômico, enquanto reduz a poluição, ou seus impactos. Com especial atenção para os problemas ligados ao fornecimento de energia estão as alterações climáticas e, maior agravante, o consumo de combustíveis fósseis. Há uma necessidade de integração dos recursos e da economia ambiental sob uma nova rubrica, que é a da economia da sustentabilidade (AYRES, 2008).

Figge e Hahn (2004) propõem uma nova abordagem para medir as contribuições corporativas para a sustentabilidade, chamada de Valor Sustentável Adicionado. O valor é criado sempre que os benefícios excedem os custos. As abordagens atuais para medir o desempenho corporativo sustentável levam em conta os custos externos causados por danos ambientais e sociais, ou se concentram na relação entre a criação de valor e o consumo de recursos. A abordagem do Valor Sustentável Adicionado é mais promissora para desenvolver medidas sustentáveis com base em custos de oportunidade. O resultado global pode ser

expresso em qualquer uma das três dimensões da sustentabilidade (FIGGE; HAHN, 2004).

Recentemente, a metodologia original de benchmarking da abordagem de Valor Sustentável se tornou submetida a um debate sério. Enquanto Kuosmanen (2009) questiona criticamente a sua validade e introduz a teoria de eficiência produtiva, Figge e Hahn (2009) comentam que a implementação da teoria eficiência produtiva cria severos conflitos com a perspectiva de economia financeira original da abordagem de Valor Sustentável. O debate é muito confuso, porque a abordagem de Valor Sustentável original apresenta dois objetivos, em grande parte incompatíveis. No entanto, ambas as formas de avaliação comparativa poderiam fornecer informações úteis e, além disso, complementares. Se alguém pretende apresentar a eficiência global dos recursos da empresa, do ponto de vista do investidor, é recomendável a metodologia de benchmarking inicial. Se, por outro lado, aspira-se a criar uma ferramenta prescritiva, criando algum tipo de esquema de realocação, Ang e Passel (2010) defendem a implementação da teoria da eficiência produtiva.

Um dos problemas enfrentados pelas empresas na condução da sustentabilidade ambiental é a falta de foco. Para superar este problema, Yeo *et al.* (2016) propõem uma metodologia baseada no conceito de melhoria da Ecoeficiência (EEI) para ajudar as empresas a planejar melhorias de sustentabilidade ambiental. Através desta metodologia, o estado atual de uma empresa em termos de desempenho ambiental é avaliado e possibilidades de melhoria são identificadas. Posteriormente, as possibilidades são avaliadas e priorizadas para ajudar a empresa a concentrar os seus esforços de sustentabilidade e para alcançar maiores impactos.

2.2. A ECOEFICIÊNCIA

Em geral, a eficiência mede a relação entre as saídas e as entradas à partir de um processo. Quanto mais elevada for a saída para uma dada entrada, ou a parte inferior da entrada para uma dada saída, mais eficaz será uma atividade, produto ou negócio. Como o objetivo do comportamento econômico é administrar recursos escassos da melhor maneira possível, a ênfase é colocada sobre a necessidade dos gestores para buscar resultados eficientes.

A eficiência é um conceito multidimensional, porque as unidades nas quais a entrada e saída são medidas podem variar. Se as entradas e saídas são medidas em termos técnicos, a ênfase é geralmente colocada

sobre as medidas físicas, como consumo de combustível. A eficiência técnica também é chamada de produtividade, estas sendo medidas pela produção por hora e a produtividade por funcionário.

Como a Eficiência é expressa como uma razão entre uma medida de saída e uma medida de entrada, não está vinculado à uma dimensão financeira, ou técnica, então, a eficiência ecológica pode ser interpretada como a relação entre uma medida de saída e uma medida de impacto ambiental (SCHALTEGGER; STURM, 1992):

$$\text{Eficiência Ecológica} = \frac{\text{Saída}}{\text{Impacto Ambiental Adicionado}} \quad (2.1)$$

O impacto ambiental adicionado é a medida de todas as influências ambientais que são avaliadas de acordo com seu impacto ambiental relativo (SCHALTEGGER *et al.*, 1996; GRAY, 1997). A gestão ecologicamente eficiente de uma empresa é caracterizada por uma alta relação entre os produtos vendidos, ou funções realizadas, e o impacto ambiental associado.

A eficiência ecológica do produto é uma medida da relação entre o fornecimento de uma unidade de produto e o impacto ambiental criado sobre a totalidade, ou sobre uma parte, do ciclo de vida do produto (DYCKHOFF; ALLEN, 2001; HOANG; ALAUDDIN, 2012; SARKIS; CORDEIRO, 2012; VILLA *et al.*, 2014).

A eficiência cruzada (*cross-efficiency*) entre a dimensão ecológica e a dimensão econômica da eficiência é a relação entre a mudança de valor e a mudança no impacto ambiental adicionado, sendo, muitas vezes, a eficiência econômica-ecológica referida à Ecoeficiência (ALCARAZ *et al.*, 2013; DU *et al.*, 2014; GOVINDAN *et al.*, 2014).

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor monetario adicionado}}{\text{Impacto ambiental adicionado}} \quad (2.2)$$

Qualquer medida de ecoeficiência requer informações financeiras, para o cálculo do numerador e informações físicas sobre o meio ambiente, para o cálculo do denominador. As equipes de contabilidade e finanças devem fornecer informações financeiras importantes sobre o numerador nos cálculos de ecoeficiência e vincular isso com informações físicas. Eles dependem de informações físicas fornecidas pelos cientistas naturais. Assim, para calcular as medidas de ecoeficiência e para adicionar valor corporativo, é essencial integrar a contabilidade convencional e a gestão financeira com medidas de

ciências naturais (físicas), tal como as fornecidas pela contabilidade ecológica (SCHALTEGGER; BURRITT, 2000).

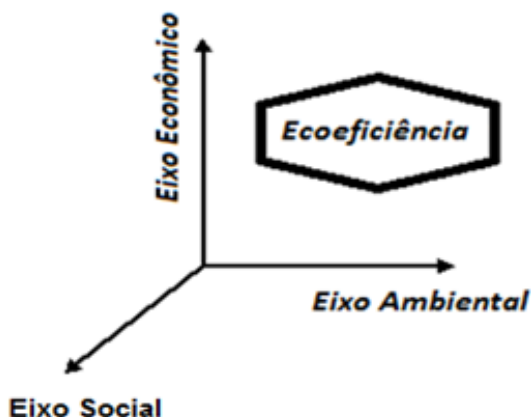
O objetivo da ecoeficiência é combinar a criação de valor econômico, ou a valorização, enquanto reduz o uso de recursos ambientais e impactos negativos de forma contínua. Ecoeficiência é um fator chave para o desempenho geral do negócio, porque ajuda as empresas a entender que elas podem produzir melhores produtos e serviços utilizando menos recursos e reduzindo o impacto ecológico: melhorando assim a ambos, o seu desempenho ambiental e o seu *bottom line*. A ecoeficiência é o link dos negócios com o desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade (DESIMONE; POPOFF, 2000; LEONIDOU *et al.*, 2016).

O conceito de Ecoeficiência, como um dos principais motores da excelência empresarial, foi introduzido pelo empresário suíço Stephan Schmidheiny, no mesmo ano, por meio de seu livro *Changing course: A global business perspective on development and the environment* (SCHMIDHEINY, 1992). Identificar a ligação positiva entre as melhorias ambientais e os benefícios econômicos é a primeira base da ecoeficiência. No cerne da Ecoeficiência está criar ou entregar mais, com menos. Contudo no cerne da Responsabilidade Social Corporativa (CSR), ou *Triple Bottom Line*, está criar, mas com a adição de valor justo e levando em conta os aspectos sociais.

A importância teórica e prática do conceito de Ecoeficiência reside em sua habilidade de combinar o desempenho ao longo de dois dos três eixos da sustentabilidade: o eixo econômico e o eixo ambiental (representado na figura 2.1). Questões relativas à equidade social e a outras propriedades não estão incluídos no conceito de Ecoeficiência (EHRENFELD, 2005).

Em abordagens sobre a política ambiental, a noção de ecoeficiência é frequentemente utilizada. A produção conjunta de bens e saídas indesejáveis, tais como poluentes que são livremente descartados sem custos, provoca dificuldades para medir o desempenho geral da empresa. Devido à ausência de preços de mercado para as saídas indesejáveis, não são confiáveis os procedimentos para estimar os custos ambientais. Algumas das dificuldades de medição e avaliação podem ser superadas empregando a Análise Envoltória de Dados (DEA) (MASUDA, 2016).

Figura 2.1 - O conceito de Ecoeficiência.



Fonte: Ehrenfeld (2005).

Autores como Korhonen e Luptacik (2004) propõem a utilização de duas abordagens diferentes. Na primeira abordagem, começam pela decomposição do problema em duas partes: (1) o problema de medir a eficiência técnica (como a relação das saídas desejáveis às entradas) e (2) o problema de medir a assim chamada eficiência ecológica (como a relação das saídas desejáveis para as saídas indesejáveis) separadamente. Na segunda abordagem os autores tratam as emissões como as entradas e então buscam aumentar as saídas desejadas e reduzir as emissões e/ou entradas. O autor desta tese usa a primeira dessas duas abordagens e avança ao propor três maneiras diferentes de avaliar e realizar a gestão termoecológica das usinas termoeletricas.

Passetti e Tenucci (2016) investigam o uso da medição da Ecoeficiência. Eles também analisam como o planejamento ambiental, as estratégias de negócios, as práticas operacionais, a certificação do sistema de gestão ambiental e a gestão de contabilidade ambiental influenciam a Ecoeficiência. Os cinco fatores organizacionais expressam elementos formais da estrutura organizacional. O projeto de pesquisa desenvolvido pelos autores consiste em uma abordagem de método misto com um conjunto de informações composto por uma pesquisa com 65 empresas, mais 14 entrevistas. Os resultados mostram um mau uso da medição da Ecoeficiência e a influência positiva do planejamento apenas ambiental e da contabilidade de gestão ambiental. O que se

destaca é a urgência de incentivar as empresas a ter ferramentas de medição e avaliação mais articuladas para analisar a relação entre o desempenho ambiental e econômico (isto é ecoeficiência). O artigo estende estudos empíricos sobre as ferramentas de contabilidade de gestão relacionados com o ambiente. Este estudo também destaca a importância de analisar a dimensão organizacional, que é fundamental para promover a integração das questões ambientais em controles de gestão (PASSETTI; TENUCCI, 2016).

Conforme Davé *et al.* (2016), a Ecoeficiência está se tornando uma medida cada vez mais importante do desempenho organizacional. Os fabricantes atualmente contam com métodos reativos tais como auditoria de avaliação. Ainda existem barreiras teóricas e práticas significativas, incluindo uma falta de conhecimento sobre a granularidade de dados, modelo de qualidade de resultados e incentivos repartidos entre instalações e gerenciamento de ativos. A modelagem é usada para representar a Ecoeficiência em subdivisões, usando indicadores de desempenho. O autor contribui para a literatura de sustentabilidade industrial por meio da aplicação de um quadro de modelagem de Ecoeficiência e em um estudo comparativo de dados da empresa avaliada. Ativos de instalações, serviços públicos e de manufatura são modelados e analisados à partir de fatores de granularidade dos dados registrados (DAVÉ *et al.*, 2016).

Segundo Zhang *et al.* (2008), a Ecoeficiência é um instrumento para a análise da sustentabilidade, indicando o quão eficiente a atividade econômica é no que diz respeito aos bens e serviços da natureza. Ele faz uma análise de Ecoeficiência para sistemas industriais regionais na China por meio do desenvolvimento de modelos baseados na análise de envoltória de dados (DEA). O autor em seu trabalho ilustra o padrão de Ecoeficiência dos sistemas industriais regionais.

Sinkin *et al.* (2008) argumentam que a Ecoeficiência se refere a um processo que visa maximizar a eficácia dos processos de negócios, minimizando seus impactos sobre o meio ambiente. Fundamental para a Ecoeficiência é a adoção de uma filosofia de gestão que estimule a busca de melhorias ambientais que geram benefícios econômicos paralelos. A Ecoeficiência é aumentada em atividades que criam valor econômico, enquanto reduz continuamente impactos ecológicos e a utilização dos recursos naturais (DESIMONE; POPOFF, 2000).

Segundo Chatzimouraditis e Pilavachi (2009), a complexidade da avaliação das usinas termoeletricas são crescentes. Cada vez mais critérios estão envolvidos na avaliação global, enquanto os dados da avaliação mudam rapidamente. Além de avaliar vários aspectos de

usinas separadamente, é necessário uma análise multicritério com base em fatores adequadamente estruturados, de modo a abordar a avaliação global de usinas de energia de acordo com os aspectos tecnológicos, econômicos e de sustentabilidade (CHATZIMOURATIDIS; PILAVACHI, 2009)

Segundo Vukadinovic *et al.* (2016), a produção de eletricidade utilizando combustíveis à base de carbono é responsável por uma grande parte das emissões de dióxido de carbono em todo o mundo. Na Sérvia, 70% da eletricidade é produzida por usinas de energia movidas à carvão. O objetivo da investigação desenvolvida por Vukadinovic foi identificar as oportunidades de adaptação para reduzir a intensidade de carbono da geração de energia. O uso eficiente de recursos e uma avaliação de produção mais limpa foi realizada em uma central térmica de carvão, que opera dentro do setor elétrico da Sérvia. A avaliação da operação da usina térmica foi apoiada por dados medidos experimentalmente. Os dados coletados e analisados durante a operação da usina foram utilizados para o desenvolvimento de uma nova abordagem geral com uma análise abrangente do sistema, usando os seguintes indicadores de Ecoeficiência da planta: consumo de energia, alterações climáticas, acidificação e de geração de resíduos. A análise de duas unidades mostrou que a potência nominal pode ser aumentada em 60 MW, com um aumento da eficiência bruta de cada unidade de 0,4% e uma redução do consumo de carvão, de água e de eletricidade. A implementação de medidas do uso eficiente dos recursos e produções mais limpas (RECP) permitiu a análise do desempenho global do sistema, como evidenciado pelos indicadores de ecoeficiência: o consumo de energia (redução de 3%), emissão de CO² (redução de 3%), e emissão de SO² (diminuiu 39%). Consequentemente, pode-se concluir que a proposta de abordagem RECP, testado em centrais térmicas e apresentados como indicadores de ecoeficiência, mostram que a metodologia descrita pode ser implementada com sucesso no setor da energia e para a melhoria das usinas. Este trabalho diferencia-se pela análise e aplicação dos conceitos em outra tecnologia de geração de energia. Outro diferencial foi a otimização multicriterial que combinou os possíveis resultados de ecoeficiência com o custo oriundo do consumo de combustível fóssil. A otimização permite ao gestor de termoeletricas com motores à combustão avaliar e implementar medidas de gestão com um aumento da ecoeficiência, redução do consumo de combustível e eventualmente dos níveis de emissões atmosféricas.

A falta de medidas, como preços de mercado para avaliar resíduos e emissões, ou para outras saídas indesejáveis é um dos

problemas que mais dificultam a elaboração de indicadores de ecoeficiência. Um dos primeiros trabalhos a este respeito, elaborado por Färe *et al.* (1989), utiliza uma abordagem não-paramétrica para a produtividade, estabelece comparações multilaterais quando algumas saídas são indesejáveis. Salgado (2004) na sua dissertação propõe indicadores de ecoeficiência para o setor de transporte de gás natural, baseado na identificação dos potenciais impactos ambientais desta atividade. A prática de utilização dos indicadores de ecoeficiência permitirá acompanhar o desempenho econômico e ambiental desta etapa da cadeia de gás natural. Esta prática visa reduzir o consumo de recursos naturais, das emissões atmosféricas e da geração de resíduos. Para tanto, é desenvolvida uma metodologia de proposição de indicadores de ecoeficiência contendo suas respectivas fórmulas de cálculo. A viabilidade desta metodologia é conferida à partir dos resultados apresentados e das conclusões obtidas (SALGADO, 2004).

Segundo Despeisse *et al.* (2016), ecoeficiência é geralmente definida como fazer mais com menos, com o objetivo de dissociar o impacto ambiental da criação de valor econômico e social. Estes autores apresentam três ferramentas para orientar a implementação da ecoeficiência nas fábricas: (1) definição e padrões de boas práticas de produção sustentável, (2) uma ferramenta de auto avaliação e grade de maturidade e (3) um quadro de modelagem da fábrica.

Hoje em dia a maioria das organizações estão tentando alcançar o desenvolvimento sustentável com respeito ao conceito "verde". Um dos principais critérios para avaliar o desempenho verde é a ecoeficiência (RASHIDI; SAEN, 2015). Para identificar todos os aspectos da ecoeficiência, as entradas devem ser divididas em energéticas e não energéticas e as saídas devem ser divididas em bons e maus resultados. Para lidar com este problema Rashidi e Saen (2015) desenvolvem um modelo de uma análise envoltória de dados (DEA). Da mesma forma, as variáveis são separadas em ambos os fatores discricionários e não discricionários. Por conseguinte, uma medida ajustada limitada (BAM) com base em indicadores verdes é desenvolvida para calcular a ecoeficiência das unidades de tomada de decisão (DMU). Além disso, as potenciais economias de energia e os potenciais de redução de saída indesejáveis são calculados para mostrar o coeficiente de correlação entre o consumo de energia e de saída indesejável.

Finalmente, o modelo proposto é validado através da avaliação da ecoeficiência de alguns membros selecionados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE). Austrália, Finlândia, Irlanda, Nova Zelândia e Suíça são reconhecidos como países

eco-eficientes e no resto dos países são ineficientes em termos de ecoeficiência.

Cha *et al.* (2008) discutem uma abordagem para medir e melhorar a eficiência econômica e ecológica de projetos de Mecanismo de Quioto. A abordagem consiste em ecoeficiência do Aquecimento Global (GWEE), Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM) e Implementação Conjunta (JI) da Eficiência Ambiental (EA) e CDM e JI da Produtividade Econômica (EP).

O indicador GWEE baseia-se na relação entre o valor acrescentado de um sistema para a sua influência no aquecimento global, a fim de medir a ecoeficiência de um produto em termos da questão do aquecimento global. Além disso, a CDM e JI EE e CDM e JI EP são propostos para medir os desempenhos ambientais e econômicos dos projetos CDM e JI, respectivamente. A viabilidade desses indicadores é examinada através de um estudo para as gerações de potência no campo da energia alternativa.

As técnicas *Multi-Criteria Decision Making* (CMMS) estão ganhando popularidade em gestão de energia sustentável. As técnicas fornecem soluções para os problemas que envolvem objetivos conflitantes e múltiplos. Vários métodos baseados em médias ponderadas, a definição de prioridades, princípios de lógica *fuzzy* e suas combinações são utilizados para decisões de planejamento de energia (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

Park e Behera (2014) propõem um indicador de ecoeficiência como um parâmetro integral para quantificar simultaneamente o desempenho econômico e ambiental das redes de simbiose industrial (IS). Baseado no Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável e a definição de ecoeficiência, os indicadores de ecoeficiência propostos incluem um indicador econômico e três indicadores ambientais simplificados de aplicação geral (consumo de matérias-primas, o consumo de energia e emissão de CO₂).

Três medidas de ecoeficiências correspondem aos três indicadores ambientais são avaliadas utilizando sete redes desenvolvidas entre 2007 e 2012, que estão atualmente em operação no Parque Eco Industrial (EIP) em Ulsan, Coreia do Sul. Os resultados indicaram que a Ecoeficiência das redes individuais melhorou em até 28,7%. Além disso, a evolução de sete redes que estão compostas por 21 empresas resultou em uma melhoria global da Ecoeficiência de cerca de 10%.

Os indicadores de Ecoeficiência propostos para essas redes podem ser facilmente utilizados como ferramentas na tomada de decisões em qualquer nível operacional. A adoção destes conceitos

auxilia a transformação de complexos industriais convencionais para o nível esperado para que possam integrar o Parque Eco Industrial (EIP). As implicações do estudo e limitações da metodologia são delineadas (PARK; BEHERA, 2014).

Segundo Hauschild (2015) a sustentabilidade está ganhando destaque entre as prioridades das grandes empresas e os engenheiros assumiram o desafio da ecoeficiência, otimizando a funcionalidade e minimizando os impactos ambientais negativos dos produtos e tecnologias.

Vários trabalhos abordam a medição da performance ambiental das empresas (TYTECA, 1996; DELMAS *et al.*, 2013; GHOLAMI *et al.*, 2013; YOUN *et al.*, 2013), outros autores usam a DEA para medir a eficiência em plantas geradoras de eletricidade (SUEYOSHI; GOTO, 2012b; 2012a; SUEYOSHI, GOTO; SNELL, 2013; SUEYOSHI, GOTO; SUGIYAMA, 2013; BI *et al.*, 2014), sendo estes considerados bons métodos para avaliar a eficiência técnica das plantas geradoras de eletricidade. Contudo não foram encontrados trabalhos que combinem em uma ferramenta de gestão de usinas termoeletricas a minimização dos custos de combustível com a maximização da ecoeficiência, sendo esta combinação um dos aporte desta tese.

2.3. A ECOLOGIA INDUSTRIAL

A Ecologia Industrial (EI) está preocupada com a mudança de processos industriais de sistemas lineares (circuito aberto), em que os recursos e investimentos de capital se movem através do sistema para se tornar resíduos. Para sistemas de circuito fechado, os resíduos se tornam entradas para outros processos (GRAEDEL, 1995). A ecologia industrial foi popularizada por Frosch e Gallopoulos (1989), que perguntaram por que os sistemas industriais não se comportam como um ecossistema, onde os resíduos de uma espécie são um recurso para outra espécie. Por que as saídas de uma indústria não ser as entradas de outras, reduzindo o uso de matérias-primas e de poluição e economizando em tratamento de resíduos?

Lowe e Evans (1995) afirmam que a ecologia industrial sugere a utilização do projeto de ecossistemas para orientar a reformulação dos sistemas industriais e alcançar melhor equilíbrio entre desempenho industrial e restrições ecológicas e, consequentemente, para determinar um caminho para o desenvolvimento sustentável.

De acordo com esse conceito, as tecnologias industriais modernas devem ser projetadas como os ecossistemas em que (i) a massa de

entrada e fluxos de energia são minimizados e (ii) o fornecimento de energia seja através de fontes renováveis de energia. A minimização do consumo de energia de combustíveis fósseis em processos industriais implica na eliminação de saída de fluxos de energia de resíduo, ou na emissão de resíduos que estão em equilíbrio com as condições (pressão, temperatura, composição) do meio ambiente.

A Ecologia Industrial oferece oportunidades promissoras para alcançar o desenvolvimento industrial sustentável. Seu objetivo é conseguir uma organização industrial mais racional, equilibrada, tentando imitar a estrutura e o funcionamento do ecossistema.

Em analogia com organismos naturais, os ecossistemas industriais consomem materiais, energia e água, transformando-os em produtos com os correspondentes resíduos. No entanto, existe uma diferença principal: a diferença é que os resíduos produzidos por organismos naturais podem ser utilizados como matéria prima para outros sistemas naturais (VALERO, 2010). Por isso é muito importante que a ecologia industrial siga esse princípio sempre que seja possível.

Os métodos da ecologia industrial podem benéficamente incorporar o conceito de exergia para fornecer ferramentas mais poderosas. A análise exérgica dos sistemas térmicos é realizada para melhorar a utilização das fontes de energia por meio da determinação da ordem de destruições de exergia e as perdas de exergia nos processos e componentes do sistema e, em seguida, reduzindo-as (RAKOPOULOS, 2009). É geralmente aceito que o aumento da eficiência de utilização de combustíveis fósseis torna tecnologias industriais ecologicamente mais benignas e seguras.

Szargut (2005) cita o seguinte exemplo: numa instalação de energia combinada, equipada com uma caldeira a carvão e uma turbina de gás, as perdas de exergia no processo de transferência de calor na caldeira de recuperação do calor da turbina à gás pode ser reduzida através da colocação de um aquecedor extra na caldeira, para recuperar o vapor da turbina a gás. Em outro exemplo, à partir da indústria química, são conduzidas análises de energia e de exergia em um aparelho de destilação de petróleo bruto de uma fase tradicional e uma unidade de duas fases para investigar as eficiências e as perdas de exergia (DINCER, 2007).

Nas usinas geradoras de eletricidade também é gerada grande quantidade de poluentes do ar nos gases de exaustão. Existem padrões nacionais (CONAMA, 2012) e internacionais (EPA, 2012) que estabelecem os limites permissíveis das diferentes substâncias

contaminantes presentes nas emissões, embora ainda não exista desenvolvida uma expressão matemática para avaliar e mensurar o impacto ambiental produzido por todos os componentes dos gases de exaustão em conjunto.

Um padrão de qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que garanta a proteção da saúde e do bem estar das pessoas. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada.

O nível de poluição do ar é medido pela quantificação das substâncias poluentes presentes neste ar. Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que pela sua concentração possa torná-lo impróprio, nocivo, ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora, ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A determinação sistemática da qualidade do ar deve ser, por problemas de ordem prática, limitada a um restrito número de poluentes, definidos em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis para identificá-los e avaliá-los.

De uma forma geral, a escolha recai sempre sobre um grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar, consagrados universalmente: dióxido de enxofre (SO_2), poeira em suspensão, monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2). A razão da escolha destes parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada a sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente.

São poluentes padronizados no Brasil:

- partículas totais em suspensão;
- fumaça;
- dióxido de enxofre (SO_2);
- partículas inaláveis;
- monóxido de carbono (CO);
- ozônio (O_3);
- dióxido de nitrogênio (NO_2).

2.3.1. Função Ecológica do Angulo – Brown

A análise e otimização dos ciclos termodinâmicos para diferentes objetivos de otimização têm sido um dos aspectos mais importantes e analisados na teoria termodinâmica de tempo finito. Além da potência de saída e a taxa de geração de entropia, um novo critério para motores térmicos foi proposto pela primeira vez por Angulo Brown (1991). Este critério é expresso como:

$$E' = P - T_c \cdot \sigma \quad (2.3)$$

Onde P é a potência de saída do motor, T_c é a temperatura do reservatório frio e σ é a taxa de geração de entropia. Como a função objetivo E' é semelhante ao objetivo ecológico em certo sentido, a função então é chamada função objetivo ecológica.

Esta função foi aperfeiçoada por Yan (1993) como:

$$E = \dot{W} - T_0 \cdot \dot{S}_g \quad (2.4)$$

Onde:

\dot{W} é a potencia de saída

\dot{S}_g é a taxa de geração de entropia

T₀ é a temperatura ambiente.

Chen (1994) apresenta uma função baseada na exergia e na ecologia de uma forma unificada e que é aplicável a todos os ciclos termodinâmicos:

$$E'' = \frac{A}{\tau} - \frac{T_0 \Delta S}{\tau} = \frac{A}{\tau} - T_0 \sigma \quad (2.5)$$

Onde A representa a saída de exergia, ΔS é a geração de entropia, σ é a taxa de geração de entropia e τ é o período de tempo do ciclo. Para o caso particular dos motores, a taxa de produção de exergia do ciclo é a Potência de saída: $\frac{A}{\tau} = P$ e a função de otimização ecológica se torna, então, a função desenvolvida por Yan (1993):

$$E' = P - T_0 \cdot \sigma \quad (2.6)$$

Esta função complementa os aspectos da termodinâmica clássica relacionados à potência de saída, à eficiência e à geração de entropia. No entanto, não é realmente uma função da eficiência, ignorando os aspectos mais modernos da segunda lei da termodinâmica e os impactos produzidos pelos gases de exaustão.

Por outro lado, as aplicações relacionadas ao método da geração de entropia se baseiam, principalmente, na geração de entropia adimensional, definido mediante o relacionamento da taxa de geração de entropia com respeito na taxa de capacidade calorífica. No entanto, verificou-se que o número de geração de entropia definido de tal modo apresenta o chamado "paradoxo da geração de entropia" (BEJAN, 1980; HESSELGREAves, 2000).

2.4. EFICIÊNCIA TÉRMICA CONFORME OS CONCEITOS DA ENERGIA E DA EXERGIA

As equações da segunda lei da termodinâmica são apresentadas e discutidas exaustivamente por Moran (2000) e Cengel (2005) e são utilizadas para analisar o funcionamento de centrais de energia (ROSEN, 2003; SAHIN, 2006). No entanto, durante os últimos 30 anos, é bem conhecido que o uso apenas da primeira lei é inadequado para avaliação de algumas características de utilização de recursos energéticos (ROSEN, 2003). Desta forma, apesar da continuidade do uso dos conceitos de eficiência energética (primeira lei da termodinâmica), o uso da eficiência exérgica (segunda lei da termodinâmica) e busca por alternativas mais completas tem sido intensificado.

2.4.1. Eficiência Energética - Energia

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura, sendo um dos fenômenos físicos mais comuns no mundo, especialmente em sistemas de energia. As estimativas mundiais sugerem que na utilização de energia mais de 80% dos processos envolvem processos de transferência de calor (CENGEL, 2005). Assim, o melhor desempenho da transferência de calor oferece um enorme potencial para a conservação de energia e redução das emissões de CO₂, de modo a reduzir o aquecimento global (BERGLES, 1997).

Durante as últimas décadas, a ciência da transferência de calor vem lidando com análises das taxas de transferência de calor em

sistemas e tem desenvolvido um grande número de técnicas de aprimoramento de transferência de calor para melhorar o desempenho da geração, conversão, conservação e consumo de energia (BERGLES, 1998; DEWAN, 2004; NAPHON, 2006; LAOHALERTDECHA, 2007; WANG, 2007; WEBB, 1983; WEIGAND, 2011).

A maioria dos processos de fluxo transitórios pode ser modelada como um processo de fluxo uniforme (WANG, 2007). Com o objetivo de simplificar os cálculos dos motores à combustão interna através da primeira lei, as seguintes premissas foram estabelecidas: O motor opera no estado de equilíbrio, o volume de controle adotado é o grupo motorizador, o ar de combustão e os gases de escape separadamente formam misturas de gases ideais e, os efeitos de energia potencial e cinética das correntes de fluido de entrada e saída são ignorados. Após esses pressupostos, a taxa de fluxo de energia do combustível para o volume de controle é dada por meio da seguinte equação (ÖZKAN, 2015):

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \cdot LHV \quad (2.7)$$

Onde:

1. \dot{Q}_f é a taxa de fluxo de energia do combustível (kJ/s)
2. LHV é o poder calorífico inferior (kJ/kg)
3. \dot{m}_f é a taxa de fluxo de massa do combustível (kg / s)

A eficiência térmica do volume de controle, η_{th} , é geralmente determinada como a razão entre a potência de saída (trabalho líquido) e a entrada de energia do combustível e determinada pela equação seguinte:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Saída útil}}{\text{Energia Fornecida (energia do combustivel)}} = \frac{N}{\dot{Q}_f} = \frac{N}{\dot{m}_f \cdot LHV} \quad (2.8)$$

2.4.2. Eficiência Exergética - Exergia

Um estudo de revisão da literatura em relação à segunda lei da termodinâmica, ou análise exergética aplicado a motores à combustão interna, foi publicado por Caton (2000) e continuado por Rakopoulos (2006). Pode ser visto, à partir desses trabalhos de revisão, que vários estudos têm sido realizados sobre a aplicação da análise de exergia para motores de ignição por velas (SAYIN, 2007) e motores de ignição por compressão utilizando combustíveis fósseis e/ou combustíveis alternativos (AZOUMAH, 2009). Também têm sido realizados alguns estudos sobre a análise exergética dos motores à combustão interna em temperaturas fixas utilizando motores das mesmas características que utilizam combustíveis diferentes (KANOĞLU, 2005; ABUŞOĞLU, 2009).

Ertesvag, (2007) investigou as variações de exergia química para gases atmosféricos e combustíveis gasosos em condições ambientes. O cálculo da variação de exergia química durante determinados processos mostrou que a separação de gases do ar é potencialmente mais eficiente em climas frios, enquanto eletrólise da água em hidrogênio é favorável em climas mais quentes.

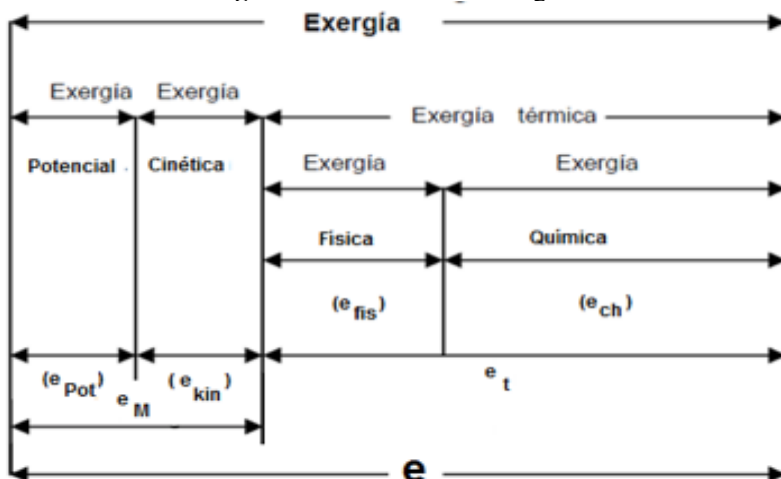
O processo de combustão é a fase mais importante durante o funcionamento do motor e a modelagem da combustão de uma forma realista é muito importante para os cálculos exergéticos. Por isso, muitos estudos têm sido dedicados às investigações dos motores de ignição por velas (centelhas) (SEZER e BILGIN, 2008 e 2009; RAKOPOULOS, 2009) e por compressão (AKASH, 2001; UST *et al.*, 2007).

Ao contrário da energia, o valor de exergia depende do estado do ambiente, bem como o estado do sistema. Por conseguinte, a exergia é uma propriedade combinada. A análise de exergia conduz a uma avaliação significativa das perdas de exergia dos processos, ou perdas não recuperáveis de exergia do combustível (RAKOPOULOS, 2009).

Em princípio, quatro tipos diferentes de exergia podem ser identificados. Estes são denotados como exergia cinética, potencial, física e química (figura 2.2). A exergia específica de fluxo de uma corrente de fluido (e) obtém-se à partir desta soma (SANTAMARÍA, 2006):

$$e = e_{pot} + e_{kin} + e_{fis} + e_{ch} = e_{tm} + e_{ch} \quad (2.9)$$

Figura 2.2 - Formas de Exergia.



Fonte: Agudelo (2006).

A exergia termo-mecânica é a soma das seguintes exergias: $e_{pot} + e_{kin} + e_{fis} = e_{tm}$ e equivale a exergia química (e_{ch}). Segundo Çengel e Boles (2005), Erduranlı (1997) e Sahin (2006), a exergia termo-mecânica pode ser definida pela equação:

$$e_{tm} = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (2.10)$$

Onde h e s são, respectivamente, entalpia e entropia de fluxo por unidade de massa à temperatura e pressão correspondente, enquanto que h_0 e s_0 são os valores correspondentes destas propriedades, quando o fluido entra em equilíbrio com o meio de referência. As exergias químicas específicas de combustíveis líquidos podem ser avaliadas a partir da expressão seguinte, com base em unidade de massa (KOTAS, 1995; PARLAK, 2005; CANAKCI, 2006):

$$e_F^{ch} = \left[1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c} \right) \right] |LHV| \quad (2.11)$$

h , c , o , e s são as frações mássicas de H, C, O e S, respectivamente.

Com o valor da exergia específica dos gases e o fluxo de combustível, pode ser encontrada a eficiência exérgica dos motores da

usina. As eficiências exerérgicas são úteis como meios de distinção para a utilização de recursos enerérgicos. As eficiências exerérgicas também podem ser usadas para avaliar a eficácia das medidas de engenharia tomadas para melhorar o desempenho de um sistema térmico. Finalmente, a eficiência exerérgica dos motores pode ser avaliada à partir da razão entre a potência de saída e a entrada de exerérgia do combustível (CALISKAN, 2009).

$$\psi = \frac{\text{Exerérgia do Trabalho}}{\text{Exerérgia fornecida}} = \frac{\text{Potência}}{\dot{E}_f} \quad (2.12)$$

Até o ano de 2007 as análises de eficiência baseadas na segunda lei da termodinâmica se limitavam no conceito de exerérgia e no uso da entropia, quando então surgiu um novo conceito que aos poucos passou a ser utilizado como método de cálculo e otimização, este conceito foi o de entransia apresentado a seguir.

2.5. O CONCEITO DE ENTRANSIA

O conceito de entransia foi enunciado pela primeira vez em 2007 e a partir desta data a teoria tem sido aplicada em muitos campos da ciência.

Os métodos de otimização da transferência de calor para melhorar efetivamente o seu desempenho são de grande importância para a conservação de energia (CHENG e LIANG, 2013b). Novos métodos de otimização com base na teoria de entransia foram desenvolvidos e validados através de diversos trabalhos publicados entre 2007 e 2013 (WU e LIANG, 2008; LIU *et al.*, 2009; CHENG *et al.*, 2011; WEI *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2013).

Segundo Guo (2007), a entransia foi identificada como uma base para a otimização dos processos de transferência de calor, em termos da analogia entre o calor e a condução elétrica. Esta quantidade, que será referida como entransia, corresponde à energia elétrica armazenada num condensador. Análises de transferência de calor mostram que a entransia de um objeto descreve a sua capacidade de transferência de calor, como a energia elétrica em um capacitor descreve a sua capacidade de transferência de carga. A dissipação de entransia ocorre durante o processo de transferência de calor, como uma medida da irreversibilidade da transferência de calor.

Os conceitos de entropia e dissipação de entropia foram usados para desenvolver o princípio extremo de dissipação de entropia para a otimização de transferência de calor. Para um fluxo de calor de limite fixo, o processo de condução é otimizado quando a dissipação de entropia é minimizada, enquanto que, para uma temperatura limite fixa, a condução é otimizada quando a dissipação de entropia é maximizada (GUO, 2007).

2.5.1. Entropia Conforme as Leis da Termodinâmica

O trabalho sobre a teoria da entropia desenvolvido por Xuetao, Cheng e Liang (2013a) desenvolve e analisa as expressões de entropia conforme as três leis da termodinâmica. A expressão de entropia da primeira lei é que a entropia de qualquer sistema está em equilíbrio termodinâmico. Para a segunda lei, a expressão da entropia para a transferência de calor é que os fluxos de entropia nunca serão transportados à partir de um corpo de baixa temperatura para um corpo de alta temperatura e automaticamente a dissipação de entropia sempre existe. Para a terceira lei, a sua expressão de entropia é que é impossível alcançar a entropia zero para qualquer organismo, através de processos limitados. Com estas expressões, a desigualdade de Clausius é provada e se define, então, o conceito de perda de entropia. Os autores também discutem a aplicação das perdas de entropia nos processos de transferência de calor e de conversão de calor em trabalho.

Liu *et al.* (2011), com base nas teorias da termodinâmica, introduzem a equação de energia em termos de entropia no processo de transferência de calor, o que não só descreve a transferência de entropia, mas também define a taxa de consumo de entropia. Conforme a regularidade da mudança de entropia no processo de transferência de calor e o efeito da taxa de consumo de entropia sobre a irreversibilidade do processo de transferência de calor. Segundo Liu *et al.* (2011), pode ser afirmado que a entropia é uma variável de estado, à partir do qual uma nova expressão para a segunda lei da termodinâmica é apresentada. Então, definindo a taxa de consumo de entropia e taxa de consumo de potência como objetivo da otimização e, uma vez determinadas as restrições, o princípio extremo condicional de Lagrange é usado para otimizar a área do fluxo de transferência de calor por convecção. Através da simulação numérica, a área do fluxo otimizado sob diferentes condições de restrição é obtida, o que mostra que o princípio do consumo mínimo de entropia é mais adequado do que o

princípio da geração mínima de entropia para otimizar o processo de transferência de calor por convecção.

Cheng e Liang (2011) afirmam que a entransia é um conceito desenvolvido nos últimos anos para medir a capacidade de transporte de calor a uma temperatura nos processos de condução e de convecção. No trabalho, eles desenvolvem o conceito de fluxo de entransia para radiação térmica em compartimentos com superfícies opacas. O balanço da equação de entransia e a função de dissipação de entransia é obtida. O princípio do mínimo de perda de entransia radiativa é desenvolvido. São obtidos os potenciais e a distribuição dos fluxos de calor que satisfaçam a lei de Stefan-Boltzmann e da equação do balanço de energia para a mínima, a perda de entransia radiativa. Os princípios de dissipação extrema de entransia (EEDP) para radiação térmica são desenvolvidos.

A teoria da entransia tem sido comparada com a teoria da entropia em vários aspectos, incluindo a transferência de calor, a irreversibilidade e o princípio de otimização para a economia de energia, ou redução de peso das instalações térmicas. Além disso, também tem sido comparada com a teoria estrutural em termos do objetivo da otimização, do método de otimização e dos resultados otimizados (CHEN, 2013; GUO, 2013).

Mingtian (2011) trabalhou definindo os conceitos de entransia e de dissipação de entransia à partir do ponto de vista termodinâmico. No trabalho é mostrado que a entransia é uma variável de estado e pode ser utilizada para descrever a segunda lei da termodinâmica. Para a condução de calor um princípio de dissipação mínima de entransia é estabelecida com base na segunda lei da termodinâmica em termos de dissipação de entransia, o que leva à equação governante de Fourier da condução de calor constante, sem fonte de calor.

Os conceitos de entransia e termomassa têm sido desenvolvidos para a análise de transferência de calor e de otimização (CHENG e LIANG, 2013b). A termomassa é a massa equivalente de calor com base na relação massa-energia de Einstein. O conceito de entransia reflete a energia da termomassa. As equações de equilíbrio de entransia, de condução de calor e a convecção de calor, que são a base dos princípios de otimização de transferência de calor, são derivados à partir da equação de energia da termomassa. Xia *et al.* (2010) desenvolveram um trabalho teórico detalhado validando conceitos da entransia em relação à entropia.

2.5.2. Entransia nos Ciclos de Carnot e Rankine

A teoria da entransia tem sido desenvolvida para a otimização da transferência de calor. Cheng e Liang (2012) buscaram estendê-la e otimizar os processos termodinâmicos. A equação de entransia dos processos termodinâmicos é introduzida pelos autores desenvolvendo o conceito de perda de entransia. Para o ciclo de Carnot e os processos termodinâmicos irreversíveis, onde o fluido de trabalho é aquecido pelas correntes de entrada de ar com temperaturas fixas, foi descoberto que a perda máxima de entransia leva ao máximo trabalho de saída, que é o princípio da máxima perda de entransia em processos termodinâmicos. No entanto, a geração de entropia não pode descrever a mudança da saída de trabalho para o ciclo de Carnot e, por este motivo, o conceito de perda da entransia poderia descrever melhor o desempenho dos processos termodinâmicos (CHENG *et al.*, 2012). O princípio é utilizado para otimizar os processos termodinâmicos de grupos de trocadores de calor e também do projeto do ciclo de Brayton irreversível. Para estes problemas, os parâmetros de operação são otimizados para que o trabalho de saída seja máximo, calculando a perda máxima de entransia.

Baseados nesses conceitos, Cheng e Liang (2013b) analisam, do ponto de vista da entransia, um sistema fechado, passando por diferentes processos termodinâmicos. A entransia do fluxo de calor e o fluxo de entransia do trabalho são definidos com a consideração da interação de calor e interação de trabalho, respectivamente. A equação de balanço de entransia é desenvolvida para o ciclo termodinâmico e os processos do ciclo de Carnot são discutidos. No ciclo, o fluxo líquido da entransia do calor mostrou ser igual ao fluxo líquido da entransia do trabalho.

O ciclo Rankine tem sido largamente utilizado na indústria e a otimização do ciclo Rankine é de grande importância para a melhoria de utilização da energia. Wang *et al.* (2013) aplicaram os conceitos de geração de entropia e perda de entransia na análise dos processos termodinâmicos do ciclo Rankine, que recebe calor da caldeira do calor de gases de escape com uma corrente quente e libera calor a um fluxo frio. A fim de obter a potência máxima, a taxa de fluxo de massa do meio de trabalho é otimizado. A análise teórica e os resultados numéricos mostram que tanto a taxa de perda máxima de entransia e a taxa mínima de geração de entropia correspondem à potência máxima, quando as temperaturas de entrada e as taxas de fluxo da capacidade de calor dos fluxos são fixas. Quando as temperaturas de entrada de ar, ou as taxas de fluxo da capacidade de calor dos fluxos não são fixas, uma

menor taxa de geração de entropia não conduz a uma potência de saída maior, o que é um paradoxo. Contudo, uma maior taxa de perda de entropia conduz ainda a uma potência maior para este tipo de caso, o que descreve melhor o processo.

2.5.3. Entropia na Conversão de Calor em Trabalho

Na conversão de calor em trabalho, verificou-se que a taxa mínima de geração de entropia, ou o máximo de perdas da entropia do calor, relaciona-se com a potência máxima de saída de acordo com as condições de absorção de calor e as forças termodinâmicas equivalentes correspondentes para a absorção e liberação de calor no sistema (CHENG *et al.*, 2013). Na transferência de calor, a taxa de geração de entropia máxima é consistente com a taxa máxima de transferência de calor, enquanto a taxa mínima de geração de entropia corresponde à diferença mínima da força termodinâmica equivalente com a taxa de transferência de calor fixa. Além disso, quando o conceito de perda de entropia do calor é utilizada, a taxa de perda máxima de entropia do calor corresponde à taxa máxima de transferência de calor com a diferença de temperatura equivalente, enquanto que a taxa de perda de entropia do calor mínima corresponde à diferença de temperaturas mínimas equivalentes com taxa de transferência de calor fixa.

Cabezas-Gomez *et al.* (2012) apresentam uma análise teórica de um trocador de calor de fluxo cruzado com um novo arranjo de fluxo, compreendendo várias linhas de tubos. O desempenho térmico do arranjo de fluxo proposto é comparado com o desempenho térmico de um arranjo de fluxo cruzado típico, que é utilizado nas indústrias de ar condicionado, química, refrigeração e automotivo. A comparação do desempenho térmico foi realizada em termos dos seguintes parâmetros: eficácia do trocador de calor e eficiência, geração de entropia e número de dissipação de entropia. A relação entre o recentemente introduzido "número dissipação de entropia" e a eficácia térmica convencional foi obtida em termos do "número de unidades de transferência".

Xu e Chen (2012) expõem que melhorar o desempenho de aquecimento de redes de aquecimento urbano (DHNs), um dos componentes mais importantes em sistemas de aquecimento urbano, tem influência significativa sobre a promoção da eficiência energética. Com base na teoria da entropia, os autores desenvolvem um método baseado em dissipação de entropia e otimização global de DHNs. Eles analisam a irreversibilidade dos três tipos de processos de transferência de calor em DHNs: (1) o processo de transferência de calor entre a água em

redes de aquecimento primário e DHNs em trocadores de calor de subestações, (2) o processo de transferência de calor entre a água de abastecimento em entrada de ar em radiadores e (3) o processo de mistura da água de retorno. Posteriormente, derivam as expressões de dissipação de entropia para cada processo e, finalmente, deduzem duas fórmulas diferentes da dissipação total de entropia em DHNs, conforme as demandas de projeto e os parâmetros estruturais e operacionais dos DHNs.

A teoria da entropia desenvolvida pode ser utilizada também para otimizar os processos de transferência de calor na construção de sistemas de água gelada central, de modo a melhorar a sua eficiência energética (CHENG e LIANG, 2012). Zhang *et al.* (2013) afirmam que a principal tarefa dos sistemas de climatização na condição de refrigeração é remover o calor do ambiente interno com o ambiente exterior. Os sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) são redes complexas de vários processos, como a transferência de calor, conversão de rede de calor, conversão calor-umidade e etc. Estes processos correspondem a equipamentos como trocadores de calor, terminais de refrigeração interior, bombas de calor e torres de resfriamento. Métodos de análise simples, ou parâmetros térmicos, dificilmente poderiam descrever todos os processos em um sistema de climatização. Reduzir a destruição de exergia se refere à perda da capacidade de conversão do calor em trabalho. Reduzir a destruição de exergia indica menos exergia fornecida (trabalho de entrada) dos sistemas de climatização. A entropia é um novo parâmetro definido como a capacidade de transferência de calor e sua dissipação está atrelada à perda da capacidade de transferência de calor. Quando o propósito da transferência de calor é o resfriamento, ou aquecimento, a análise de entropia é um método direto para a otimização dos processos de transferência de calor. As perdas dos sistemas HVAC são, principalmente, no processo de transferência de calor. O princípio extremo de dissipação de entropia, ou o princípio da mínima resistência térmica, é adequado para analisar o processo de transferência de calor nos sistemas HVAC. Para o resfriamento interno, reduzindo a dissipação de entropia, vai aumentar a temperatura da água gelada.

O fluxo da entropia do trabalho pode ser transferido à partir de uma temperatura menor para a maior, e vice-versa, mas o fluxo de entropia do calor só pode ser transferido de uma temperatura maior para a menor de forma espontânea, levando à dissipação de entropia. Os autores também introduzem a equação de balanço de entropia para o sistema fechado, com processos irreversíveis e motores de calor,

definindo a perda irreversível de entransia. As equações de balanço de entransia são aplicadas para analisar a conversão de calor em trabalho num sistema com o dado de entrada de calor. Mostra-se que a redução da perda irreversível de entransia, ou a diminuição da geração de entropia, pode melhorar a eficiência de conversão de calor em trabalho.

Xia *et al.* (2012) pesquisaram uma forma de otimizar processos de transferência de massa isotérmica. Com base na definição de entransia de massa é derivada a função de dissipação de entransia, que reflete a irreversibilidade da perda de capacidade de transferência de massa. A condição ótima para a mínima dissipação de entransia do processo de transferência de massa está associada à lei generalizada de transferência de massa, obtida através da aplicação de uma teoria de controle ótimo. Os resultados obtidos podem fornecer algumas orientações teóricas para o projeto e operação ótima de processos práticos de transferência de massa.

O projeto ótimo do desempenho dos trocadores de calor é a questão-chave na conservação de energia. Com base na teoria de entransia, Chen (2013) deduz a fórmula de resistência térmica baseada na dissipação de entransia (EDTR) para diferentes tipos de trocadores de calor. O autor analisou os fatores que influenciam a eficiência do trocador de calor e, o mais importante, desenvolveu um método EDTR alternativo para o projeto e otimização do desempenho dos trocadores de calor. Os resultados indicam que a EDTR dos trocadores de calor de casco e tubo de fluxo paralelo, contracorrente, têm uma fórmula geral que correlaciona diretamente o desempenho do trocador de calor para as taxas de capacidade de calor dos fluidos, a condutibilidade térmica e arranjo de fluxo do trocador, sem introduzir qualquer parâmetro fenomenológico adimensional.

Nas usinas termoeletricas se produz uma grande quantidade de calor que se perde com os gases de exaustão e que pode ser aproveitada para gerar energia em um processo de cogeração. Nesta tese o autor desenvolve expressões para avaliar a entransia dos gases de exaustão que será apresentada no Capítulo 4 e discutida no Capítulo 5.

2.6. DESPACHOS DE CARGA - DEC/DEAC

Ao produzir energia elétrica para qualquer sistema elétrico, no caso do Brasil, faz-se referência ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e se utiliza a nomenclatura “Despacho de Carga” para atribuir a quantidade de energia a ser entregue, ou “despachada”, para o sistema. Será apresentado neste subitem a evolução da literatura a respeito do

despacho econômico e suas principais variáveis. A literatura internacional utiliza para abordar os assuntos em questão, as siglas do inglês ELD (*Economic Load Dispatch*) que trataremos doravante como Despacho Econômico de Carga (DEC) e EELD (*Environmental and Economic Load Dispatch*) que será traduzido como Despacho Econômico e Ambiental de Carga (DEAC)..

2.6.1. Despacho Econômico de Carga (DEC)

O problema de despacho econômico de um sistema de potência é determinar a melhor combinação de saídas de energia para todas as unidades geradoras que irá minimizar o custo total de combustível e operação, desde que satisfaçam as restrições de carga e operações dos equipamentos de geração de energia.

O problema de despacho econômico é muito complexo para resolver devido à sua dimensão, uma função objetiva não linear e um grande número de restrições. Diversas técnicas como a programação inteira (GARVER, 1963; DILLON, 1978), a programação dinâmica (SNYDER, 1987; LOWERY, 1996) e as funções de Lagrange (BARD, 1988) têm sido usadas para resolver o problema de despacho econômico. Outros métodos de otimização, tais como Recozido Simulado (WANG, 1993), Redes Neurais (LEE, 1998; SU, 2000), Algoritmos Genéticos (DAMOUSIS, 2003), Otimização com Enxame de Partículas (KUMAR, 2003) e Algoritmo de Busca Tabu (LIN, 2001) também são praticados para resolver o problema de despacho econômico. Este despacho econômico, como um único objetivo, não pode mais ser considerado suficiente, devido às preocupações ambientais que surgem à partir das emissões produzidas por usinas geradoras de energia elétrica movidas à combustíveis fósseis. O despacho econômico e ambiental é um problema multi-objetivo conflitante. Diversas técnicas têm sido propostas para resolver este problema multi-objetivo. Métodos com base nas aproximações matemáticas têm sido desenvolvidos para oferecer uma solução mais rapidamente (PALANICHAMY, 1991; PALANICHAMY, 2002). Os algoritmos evolucionários multi-objetivo (DHILLON, 1994; KING, 2003) foram aplicadas ao problema em questão.

Com o aumento da consciência ambiental e a aprovação de regulamentos ambientais, as restrições ambientais passaram a ter um impacto significativo sobre o funcionamento dos sistemas de energia. Despacho econômico tradicional para minimizar o custo de combustível é inadequado, quando as emissões ambientais também devem ser

incluídas na operação de usinas geradoras de energia por meio da queima de combustíveis fósseis.

Trabalhos de pesquisa como os de Huang (2003) e Muslu (2004), incluindo restrições de emissão ao despacho econômico e seleção de máquinas, têm sido feitos, mas apenas com foco de minimização de custos.

O problema do despacho econômico (DEC) está relacionado com a programação de geração ótima dos geradores disponíveis num sistema de potência para minimizar o custo total do combustível, enquanto que satisfaça a exigência de carga e restrições operacionais. O DEC desempenha um papel importante no planejamento de operação e controle de sistemas de energias modernas (HOU, 2005). Ao longo dos últimos anos, uma série de abordagens foram desenvolvidas para resolver o DEC, utilizando métodos clássicos de programação matemática (LIN, 1984; LIANG, 1992; CHEN, 1993; YAN, 1997). Contudo, os métodos clássicos de otimização são altamente sensíveis a pontos de partida e frequentemente convergem para solução ótima local, ou divergem completamente. Os métodos de programação lineares são rápidos e confiáveis, mas a principal desvantagem está associada ao custo da aproximação linear. Por outro lado, os métodos de programação não-linear têm um problema de convergência e complexidade algorítmica. O algoritmo baseado em Newton tem um problema em lidar com um grande número de restrições de desigualdade (SWARUP, 2006).

Recentemente, modernas técnicas de otimização (BASU, 2005; YUAN, 2008) têm sido empregadas com sucesso para resolver o DEC como um problema de otimização não-suave, a fim de tornar os métodos numéricos mais convenientes para resolver os problemas de DEC.

Rajan (2010) desenvolveu uma nova abordagem para a solução do despacho econômico (DEC), usando um algoritmo integrado baseado em Programação Evolutiva (PE) e Recozido Simulado (SA) para os sistemas de energia em grande escala. A maioria dos métodos clássicos utilizados para resolver despacho econômico são baseados em cálculo. Para as unidades geradoras com funções de custo de combustível quadrática, as técnicas clássicas ignoram, ou achatam, as porções das curvas de custo de combustível incrementais e isso pode gerar dificuldades na determinação da melhor solução global para funções de custo de combustível não-diferenciáveis. Para superar esses problemas, as técnicas inteligentes, ou seja, a programação evolutiva e recozido simulado são empregadas. Estas técnicas de otimização são capazes de determinar as soluções de despacho ótimo global, ou próximo a elas.

Das e Patvardhan (1999) apresentam a concepção e aplicação de uma nova Pesquisa Heurística Híbrida Estocástica (HSS) para o problema do Despacho Econômico de Carga (DEC) em sistemas de potência. A heurística incorpora Recozido Simulado (SA) no processo de seleção do Algoritmo Genético (GA). A heurística HSS foi concebida com o operador genético chamado o cruzamento cego para proporcionar uma melhor capacidade de pesquisa. A heurística é bastante geral e vários aspectos, como descontinuidades da função quadrática de custo, o aumento dos custos, o controle de emissões e perdas de transmissão, etc., são facilmente incorporados conforme a necessidade. O desempenho e os resultados obtidos por esta heurística foram comparados com aqueles relatados na literatura. Estes resultados indicam que a nova heurística HSS converge para melhores soluções, mais rapidamente do que o outro GA e SA heurística e é, portanto, aplicável à sistemas de grande potência na vida real.

O problema do despacho econômico é minimizar simultaneamente o custo total e ao mesmo tempo satisfazer à demanda da planta produtora de eletricidade. O problema clássico do despacho econômico é fornecer a quantidade requerida de potência ao menor custo possível (WOOD, 1984). O problema do despacho pode ser estabelecido matematicamente da seguinte forma para minimizar o custo total de combustível:

$$F = \text{Min}_{P_i} \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (2.13)$$

A expressão anterior depende da igualdade do balanço de restrições da potência real:

$$\sum_{i=1}^n P_i - P^D - P^L = 0 \quad (2.14)$$

Onde:

$$P^L = \sum_{i=1}^n B_i P_i^2 \quad (2.15)$$

e a restrição de desigualdade dos limites na saída do gerador é:

$$P_{min.i} \leq P_i \leq P_{max.i} \quad (2.16)$$

Onde a_i , b_i e c_i são os coeficientes de custo de cada i gerador e n é o número de geradores no sistema. P_i é a potência de saída de cada

gerador i . P^D é a demanda de carga e P^L são as perdas da transmissão. Para obter os coeficientes a , b e c é necessário fazer a curva da potência versus consumo de cada motor.

Embora há um grande benefício financeiro da estratégia clássica do despacho econômico de carga descrita acima, ela tende a produzir emissões de SO_2 e de NO_x elevadas. Uma estratégia alternativa do despacho de carga (DEC) para satisfazer a exigência ambiental é minimizar o custo de operação sob restrições ambientais. O controle das emissões pode ser incluído no despacho de carga econômico convencional, adicionando o custo ambiental ao despacho normal (KING, 1995; KULKARNI, 2000). As emissões são modeladas como um custo ambiental e são adicionadas, então, ao custo da geração.

A função objetiva se torna, então:

$$\text{Minimize } C = w_0F + w_1E_S + w_2E_N \quad (2.17)$$

Onde: E_S é a função emissão de SO_2 , E_N é a função emissão de NO_x , w_0 , w_1 e w_2 são pesos de custo, e SO_2 e NO_x são as emissões.

2.6.2. Despacho Econômico e Ambiental (DEAC)

Abido (2003) utiliza um Algoritmo Genético de Pareto Aninhado (NPGA) para resolver o problema multi-objetivo do despacho econômico e ambiental (DEAC). O problema DEAC é formulado como um problema de otimização multi-objetivo restringido não-linear. A proposta de NPGA trata o DEAC como um problema multi-objetivo, tendo como objetivos que competem entre eles o custo e as emissões. Uma das principais vantagens do método proposto é que não existe restrição quanto ao número de objetivo a otimizar. O método proposto tem um mecanismo de diversidade de preservação para superar o problema da convergência prematura. Um agrupamento hierárquico é desenvolvido e imposto para fornecer ao tomador de decisão um conjunto pareto-ótimo representante e gerenciável. Além disso, a teoria dos conjuntos *fuzzy* (difusa) é utilizada para extrair a melhor solução de compromisso. Os resultados demonstram a capacidade da abordagem proposta para gerar Pareto soluções não-dominadas ótimas bem distribuídas do problema multi-objetivo DEAC em um único ciclo. A comparação com os métodos clássicos demonstra a superioridade da abordagem proposta e confirma o seu potencial para resolver o problema multi-objetivo do DEAC.

Basu (2005) desenvolveu um novo método de otimização multi-objetivo para o despacho de carga, tendo em conta os aspetos económicos e as emissões para plantas hidroelétricas e plantas térmicas com custo de combustível e funções de nível de emissão não suaves. Neste trabalho, o problema trata os aspetos económicos e as emissões como objetivos contrários. Assumindo que o gestor tem metas para cada uma das funções objetivo, o problema multi-objetivo é convertido num único objetivo de otimização pelo método do “alcance da meta”, o qual é, então, tratado através da técnica de simulação Recozido Simulado (SA). A metodologia de solução pode oferecer uma solução global inferior, ou quase igual a global, na direção de um dos objetivos aproximado das necessidades do gestor.

Tankut e Yalcinoz (2007) apresentam em seu estudo uma técnica de otimização baseada na articulação progressiva de informações preferenciais para resolver o despacho económico ambiental (DEAC) simultaneamente. Em problemas de otimização multi-objetivos, o uso de pesos para formar uma função objetivo composta reduz um problema múltiplo a um único problema (YALCINOZ e KSOY, 2007). No entanto, também é perdida alguma informação na conversão e não se espera que esta estratégia proporcione uma solução sólida, ou, ainda, ajude a traçar a fronteira da eficiência das soluções. No trabalho, os autores facilitaram uma série de soluções para o problema sem precisar converter o problema original a um caso mais simples. O método proposto lida com o problema de uma forma interativa e não precisa conhecer qualquer estrutura de preferência global, ou algum tipo de metas iniciais do tomador de decisão para atingir os objetivos. Os resultados numéricos para dois estudos de caso, foram apresentados para ilustrar o desempenho e a aplicabilidade do método proposto. O método proposto é comparado com o algoritmo genético com cruzamento aritmético e com uma rede neuronal.

No trabalho de Osmana *et al.* (2009) é apresentada uma nova abordagem de algoritmo genético multi-objetivo para o problema de otimização do despacho ambiental e económico da carga (DEAC). O problema DEAC é formulado como um problema de otimização multi-objetivo não-linear restringida tanto com restrições de igualdade, como com restrições de desigualdade. Um novo algoritmo de otimização que se baseia no conceito de co-evolução e algoritmo de reparação para o tratamento de restrições não lineares é apresentado. O algoritmo mantém um arquivo de tamanho finito de soluções não dominadas que fica interativamente atualizado na presença de soluções não dominadas com base no conceito de ε -dominância. O uso de ε -dominância também faz

que os algoritmos sejam práticos, permitindo que um gestor possa controlar a resolução do conjunto de Pareto, escolhendo um valor “ε” apropriado.

Coelho (2009) aperfeiçoou um algoritmo meta-heurística de busca chamado *harmonic search* (HS), imitando o processo de improvisação de tocadores de música. O algoritmo HS tem sido bem sucedido em diversos problemas de otimização. O algoritmo HS não requer informações derivadas e usa busca aleatória estocástica em vez de uma pesquisa de gradiente. Além disso, o algoritmo de HS é simples em termos de conceito em alguns parâmetros e fácil de implementação. No trabalho os autores apresentam um algoritmo harmônico de pesquisa melhorado (IHS) com base na distribuição exponencial para resolver problemas de despacho econômico. Um sistema de teste de 13 unidades com função de custo do combustível parcial, tendo em conta uma função quadrática melhorada, é usado para ilustrar a eficácia do método proposto. Os resultados numéricos mostram que o método IHS tem uma boa propriedade de convergência. Além disso, os custos de produção do método IHS são inferiores às do HS clássico e outros algoritmos de otimização relatados na literatura recente.

Palanichamy (2008) afirma que devido às preocupações ambientais que se desenvolvem à partir das emissões produzidas por usinas movidas à combustíveis fósseis, o despacho econômico, que só minimiza o custo total de combustível, não pode mais ser considerado o único caminho. Eles propõem uma estratégia analítica baseada em modelos matemáticos para resolver problemas econômicos, de emissão, de despacho e problemas econômicos e de emissão combinados por uma única função objetivo equivalente. A estratégia proposta tem sido aplicada a diferentes sistemas realistas e em diferentes condições de carga, demonstrando resultados positivos.

No seguinte capítulo serão fornecidos os procedimentos metodológicos para a abordagem do trabalho. Conforme a revisão da literatura e com base nas lacunas encontradas, o procedimento desenvolvido contemplou a análise da eficiência dos motores conforme a primeira e segunda lei da termodinâmica e conjuntamente ao conceito da entropia. Além disso, considerou aspectos ambientais e de sustentabilidade conforme a Ecoeficiência, as emissões e a ecologia industrial, sem perder o foco na minimização de custos.

Este capítulo, ao buscar o estado da arte nestas áreas distintas e relacionadas ao tema, identificou as bases da teoria, onde o trabalho foi desenvolvido, bem como as lacunas que reforçam a necessidade e relevância de se buscar com este trabalho gerar uma contribuição

científica para a gestão de termoelétricas com motores à combustão e utilizando estes conceitos e otimizações, atender a questão do despacho de carga de uma forma eficiente e com menores custos.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa e o atingimento dos objetivos propostos. Ghauri e Gronhaug (2005) e Hanington e Martin (2012) afirmam que o método de pesquisa tem papel fundamental para alcançar as soluções da pesquisa. Visando atender aos procedimentos metodológicos, utilizou-se uma abordagem quali-quantitativa que, segundo Martins (2011), permite dar uma visão sobre a coleta e análise de dados com mais esclarecimentos dos instrumentos de pesquisa utilizados.

Em relação à condução do estudo, trata-se de uma análise e verificação de uma proposta desenvolvida para a gestão termoecológica de usinas termelétricas. Desta forma, o pesquisador coletou dados sobre as teorias de cálculo de eficiência existentes, sobre a Ecoeficiência e sobre o objeto de estudo, buscando a convergência desses dados, organizando-os e comparando-os com ideias e definições da literatura, como uma maneira de testá-los.

Em relação ao objeto de estudo, considera-se que o estado do Amazonas e as usinas térmicas nele existentes contribuem para os impactos ambientais na região, uma vez que a cidade de Manaus possui 7 (sete) usinas termoeletricas cada uma com mais de 70MW de potência instalada, incluindo as usinas objeto deste estudo. O trabalho desenvolvido é direcionado para termoeletricas com motores à combustão e uso de combustíveis fósseis. Como delimitação da pesquisa no aspecto coleta de dados considerou-se a região de Manaus onde o pesquisador recebe auxílio por meio de bolsa de Pesquisa do Governo do Estado por intermédio da FAPEAM (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas).

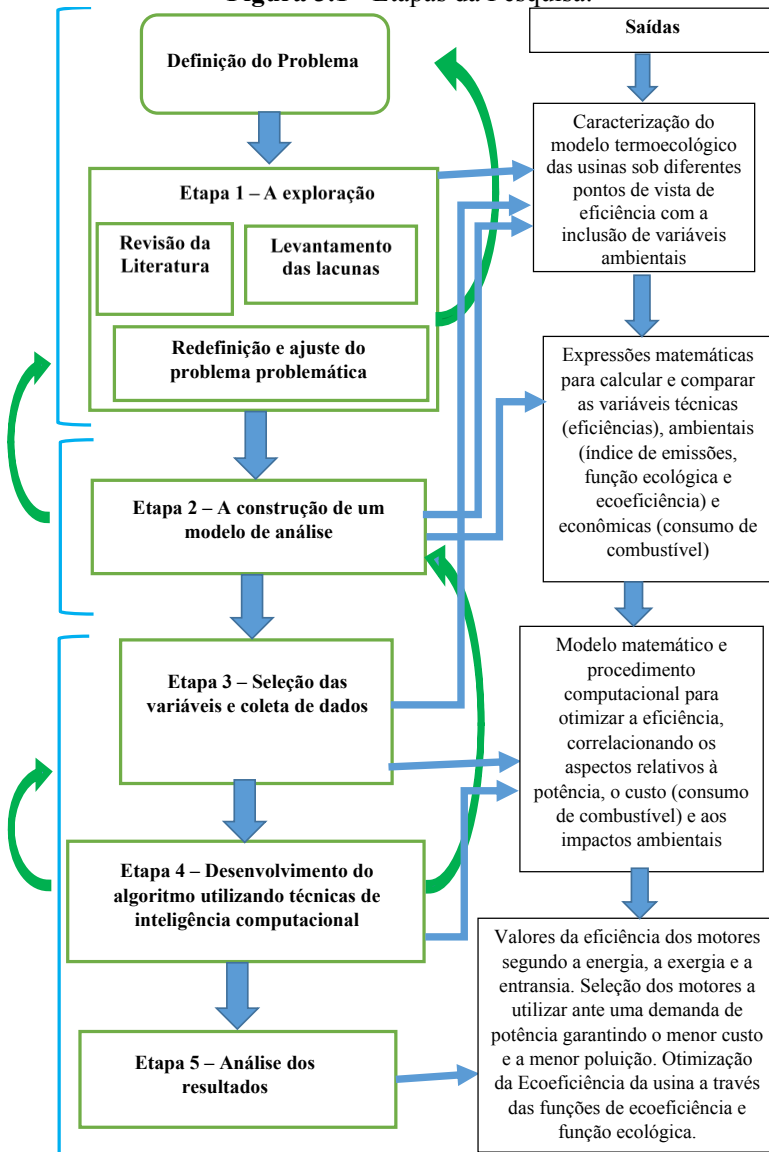
Nesse caso específico, a verificação do procedimento ocorreu por meio do algoritmo proposto nesta pesquisa (apresentado no Capítulo 4), com o desenvolvimento do modelo matemático que otimizado em um procedimento computacional oferece uma proposta de gestão termoecológica de uma usina de geração termoeletrica. Isso permitirá uma visão mais abrangente da gestão de termoeletricas com motores à combustão interna e suas respectivas eficiências.

3.1. ETAPAS DA PESQUISA

A estrutura geral da pesquisa (Figura 3.1) define e detalha os passos que foram seguidos dentro dos métodos adotados para a mesma. Todas as etapas da pesquisa são descritas em subitens, após a

apresentação da figura. A Figura 3.1 apresenta ainda o fluxo e a correlação existente entre as etapas da pesquisa e os resultados obtidos no decorrer do trabalho. Após a figura as etapas são detalhadas.

Figura 3.1 - Etapas da Pesquisa.



3.1.1. Definição do Problema

Neste trabalho o pesquisador buscou formular um projeto à partir de uma questão inicial de pesquisa. Através desta questão, o pesquisador buscou expressar o mais precisamente possível o que se buscou conhecer, elucidar e compreender melhor. A questão inicial serviu de fio condutor da pesquisa (mostrada abaixo).

Com base na revisão prévia da literatura, apresentada no Capítulo 2, não foram identificadas respostas e/ou ferramentas que permitam ao gestor de usinas termoeletricas efetuar uma análise integrada dos impactos técnicos, econômicos e ambientais ocasionados ao se modular a carga dos motores à combustão interna no processo de geração de energia. Possuir a capacidade de avaliar estes impactos durante a gestão dos empreendimentos de geração de energia, permite ao gestor optar por uma forma de operação com maior eficiência térmica, econômica e/ou ambiental, ou mesmo escolher por operar no ponto de equilíbrio entre essas variáveis, já que são objetivos antagônicos.

Essa lacuna de conhecimento dificulta aos gestores de termoeletricas de operar suas usinas em um ponto ótimo de equilíbrio do ponto de vista integrado e/ou de verificar o impacto que as variações de potência causam na eficiência dos motores à combustão de uma forma mais abrangente. Sendo assim, o problema identificado foi: Qual é o método mais apropriado para realizar a gestão de uma usina térmica com motores à combustão interna, considerando a eficiência térmica, a Ecoeficiência e as emissões atmosféricas? À partir desta questão norteadora foram traçadas e trabalhadas as etapas detalhadas a seguir.

3.1.2. Etapa 1: A Exploração

A pesquisa bibliográfica desta tese buscou identificar, avaliar e interpretar um conjunto de artigos relacionados com a gestão das usinas termoeletricas, conforme a eficiência, as emissões, a ecologia industrial, e a ecoeficiência.

Por meio das primeiras ideias e inquietações, foi iniciado o processo de pesquisa seguido da varredura horizontal (consulta à literatura), aprofundamento e posicionamento diante da literatura, evidenciação do problema de pesquisa e as lacunas do conhecimento. Nessa fase, a pesquisa foi realizada de na literatura para aprofundar sobre os conhecimentos existentes a respeito de “load dispatch”, “thermal efficiency”, “sustainability”, “engines efficiency”, “optimization”, “eco-efficiency” e “industrial ecology” em periódicos internacionais.

Na fase seguinte, foi realizada a consulta à literatura (varredura vertical) a fim de explorar o problema de pesquisa e delinear os objetivos. Esta fase teve por objetivo uma análise crítica das teorias sobre o problema, elaboração de uma nova teoria como solução, proposições e previsões à partir da teoria, delineamento do teste e escolha dos métodos de pesquisa conforme recomendado na literatura (e.g. FLEURY, 2011; MARTINS, 2011).

Na varredura vertical, as palavras chaves foram redefinidas e houve um aprofundamento acerca de métodos de despacho de carga, emissões ambientais, eficiência dos motores à combustão interna e otimização. Nesse sentido, as palavras-chave “*energetic efficiency*”, “*exergetic efficiency*”, “*entransy*”, “*indicators*”, “*methods*”, “*modelling*”, “*load dispatch*” foram combinadas com “*emissions*”, “*industrial ecology*” e “*eco-efficiency*”. As palavras-chave foram usadas para recuperar as publicações que contêm pelo menos uma das palavras no *abstract*, *title*, *keywords*. Os artigos científicos foram identificados por meio das palavras-chave nas seguintes bases de dados: Web of Knowledge, Wiley, Science Direct, Enginerring Village e Scopus. Essas bases foram usadas pois são as que possuem maiores acervos técnicos com larga quantidade de periódicos e livros cadastrados, muitos deles com JCR.

Foram analisadas mais de 6500 publicações em relação aos seguintes aspectos: (i) artigos repetidos; (ii) idioma inglês; (iii) tipo: *journal article*; (iv) títulos dos artigos alinhados ao tema de pesquisa; (v) resumos alinhados ao tema de pesquisa; e (vi) texto integral dos artigos alinhados com o tema da pesquisa. Não houve delimitação temporal das publicações. O software de apoio utilizado para o registro e seleção dos artigos foi o EndNote X6®. Os livros consultados não foram fichados, mas apenas estudados para proporcionar uma base teórica para o desenvolvimento do estudo. Também foi feita uma análise bibliométrica das publicações relacionadas com os conceitos de Entransia, em função de ser o conceito central da proposta da tese.

Como resultado da pesquisa bibliográfica, foram selecionadas três formas para avaliar a eficiência dos motores:

- A eficiência energética;
- A eficiência exergetica;
- A eficiência segundo a entransia. (Esta última como lacuna do conhecimento a ser explorada).

Foram selecionadas três formas para avaliar o impacto ambiental das usinas termoelétricas:

- Mediante as emissões atmosféricas geradas pelos gases de exaustão dos motores;
- Mediante a função Ecológica;
- Mediante a Ecoeficiência.

As duas últimas não têm sido aplicadas às usinas termoeletricas como forma de otimização da gestão das mesmas o que neste trabalho foi reconhecido como uma oportunidade de aprimoramento. Foram ainda identificadas lacunas relacionadas com o despacho econômico ambiental de carga e verificou-se que não existem publicações de otimização que apresentem a diminuição dos custos com combustíveis e o aumento da ecoeficiência.

Assim, essas lacunas encontradas na revisão bibliográfica foram exploradas no trabalho como meio de permitir avaliar as usinas termoeletricas conforme os critérios, técnicos, econômicos e ambientais.

3.1.2.1. Redefinição e ajuste do problema

Conforme a revisão da literatura, o problema de pesquisa foi aperfeiçoado. Não foi encontrado na literatura um método geral para realizar a gestão termoeológica de uma usina térmica com motores à combustão interna, que ao mesmo tempo permita avaliar a eficiência térmica, a ecoeficiência e as emissões atmosféricas, minimizando os custos. Sendo assim, como forma de possibilitar aos gestores uma visão mais ampla de seu empreendimento, este trabalho buscou explorar estas lacunas existentes como descrito adiante.

3.1.3. Etapa 2: Construção de um Modelo de Análise

Tomando como base a revisão bibliográfica, foram encontradas as expressões para calcular a eficiência dos motores. No caso da eficiência foram reunidos três procedimentos, descritos no Capítulo 4, para o cálculo dela: (i) eficiência conforme a energia, (ii) eficiência conforme a exergia e (iii) eficiência conforme a entropia. Não existiam na literatura, procedimentos precedentes para o cálculo da eficiência dos motores de combustão interna conforme a entropia, assim sendo, a sua expressão matemática foi desenvolvida mediante os princípios metodológicos indutivos e dedutivos, baseado na literatura sobre entropia e as equações matemáticas da eficiência energética e exérgica da primeira e segunda lei da termodinâmica.

Para avaliar simultaneamente os impactos ambientais e os custos, foram analisadas muitas publicações acerca da ecologia industrial e a ecoeficiência. Com base nos métodos de análise e sínteses foram estudados todos os procedimentos para calcular a Função Ecológica de Ângulo Brown e a ecoeficiência. Posteriormente e usando o método lógico dedutivo foram desenvolvidas novas expressões sem precedentes na literatura baseadas na entransia e na dissipação da entransia para calcular a função ecológica e a ecoeficiência. Foi usado também o método hipotético-dedutivo e as seguintes premissas foram consideradas:

1. Os gases da combustão constituem um sistema fechado.
2. Os gases da combustão são considerados como ar com comportamento de gás ideal.
3. As energias cinéticas e potenciais são desprezadas.

Todos estes modelos matemáticos e procedimentos aparecem detalhados no capítulo a seguir.

3.1.4. Etapa 3: Seleção de variáveis e coleta de dados

A terceira etapa desta pesquisa representou a definição das variáveis e a coleta de dados a utilizar no modelo matemático desenvolvido.

3.1.4.1 Seleção das variáveis

Com base nas teorias existentes e formulações matemáticas, bem como os dados técnicos de funcionamento dos motores à combustão interna, as variáveis de entrada do modelo matemático a serem trabalhadas e, por conseguinte, coletadas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Variáveis de entrada.

Variável	Referências
• Consumo de combustível.	(BOURHIS; LEDUC, 2010; DASH <i>et al.</i> , 2014; BEJAN, 2016)
• Composição química do combustível.	(CATON, 2000; ERTESVAG, 2007; WHITING <i>et al.</i> , 2017; WON <i>et al.</i> , 2017)

<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura dos cilindros de todos os motores. 	(CALISKAN, 2009; SHAMEER; RAMESH, 2017; XU <i>et al.</i> , 2017)
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura dos gases de exaustão. 	(BORLA, 2016; ALY <i>et al.</i> , 2017; CHO <i>et al.</i> , 2017)
<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de emissões de CO₂, NO_x, SO₂, O₂ e CO. 	(LIRA-BARRAGÁN <i>et al.</i> , 2015; CHO <i>et al.</i> , 2017)

A partir da entrada de variáveis nas expressões matemáticas envolvidas no modelo matemático, as variáveis de saída são as apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Variáveis de saída.

Variável	Referências
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência Energética, segundo a primeira lei da termodinâmica, no caso dos motores à combustão interna, a razão entre a potência de saída (trabalho líquido) e a entrada de energia do combustível. 	(ALLCOTT; GREENSTONE, 2012; BI <i>et al.</i> , 2014; VILLA <i>et al.</i> , 2014)
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência Exergética, conforme a segunda lei da termodinâmica, a razão entre a potência de saída e a entrada de exergia do combustível. 	(SAHIN, 2006; AZOUMAH, 2009; SUEYOSHI; GOTO, 2012; VILLA <i>et al.</i> , 2014)
<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência segundo a Entransia. A teoria da entransia tem sido desenvolvida para a otimização da transferência de calor e otimizar os processos termodinâmicos. O cálculo da eficiência nos motores de combustão interna será um dos aportes deste trabalho. 	(MINGTIAN, 2011; WANG <i>et al.</i> , 2013; CHENG; LIANG, 2015; KIM; KIM, 2015)
<ul style="list-style-type: none"> • Função Ecológica, em que a potência de saída e a taxa de 	(ANGULO-BROWN, 1991; CHEN, 1994; SARKIS;

<p>geração de entropia é associada a temperatura inicial, passa a ser aprimorada com a teoria da entransia como outro aporte deste trabalho.</p>	<p>CORDEIRO, 2012; VILLA <i>et al.</i>, 2014)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Índice de Emissões, ou seja, a soma de todas as emissões atmosféricas. 	<p>(GRANT <i>et al.</i>, 2016; LIU <i>et al.</i>, 2016; TALATI <i>et al.</i>, 2016; CHAN <i>et al.</i>, 2017)</p>

Optou-se por trabalhar com variáveis de entrada disponíveis e passíveis de serem facilmente coletados pelos gestores de usinas termoelétricas. Estas variáveis foram utilizadas para a otimização baseada em mais de um critério (multicriterial) e as respostas para a gestão termoecológica das usinas são as variáveis de saída. A seguir é mostrada uma síntese de como foi realizada a coleta de dados, que foi conduzida por meio de observações e medições conforme sugerido por Dresch e Cauchick Miguel, (2015).

3.1.4.2 Coleta de dados - Eficiência Térmica

Para avaliar a eficiência de qualquer motor, segundo a literatura revisada, são necessários uma série de dados do consumo de combustível em diferentes potências, além das temperaturas, pressões e outros (ver Capítulo 4). Para a coleta de dados visando avaliar a eficiência segundo as diferentes expressões, incluindo a entransia, foi desenvolvido um projeto de experimentos.

O experimento consistiu em colocar em funcionamento todos e cada um dos motores das usinas em diferentes regimes de potência: 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da potência nominal. Foram realizadas 10 medições do consumo de combustível de cada motor para cada faixa de potência e foram processados estatisticamente os resultados, encontrando-se o valor médio do consumo de cada motor para as diferentes potências.

Foram medidas também todas as temperaturas e pressões em todos e cada um dos cilindros de todos e cada um dos motores e calculado o valor médio desses valores para cada motor. Foram medidas, além disso, as temperaturas dos gases de exaustão e foi analisada a composição química do combustível, tomando-se amostras do mesmo e fazendo análise química. A composição química do combustível é necessária para poder calcular a exergia do combustível.

Com esses dados e o preço do combustível foram traçadas as curvas de potência *versus* custo de combustível para cada motor e, usando o software *curve expert para Windows*, foram encontradas as equações de regressão e os seus respectivos coeficientes. Um exemplo dessas curvas é mostrado no Anexo 13.

3.1.4.3 Coleta de dados - Impactos Ambientais

Para avaliar os impactos ambientais foram analisadas as composições dos gases de exaustão tomando amostras dos mesmos nas chaminés com uma sonda em todos e cada um dos motores. Neste caso foi usado o método da experimentação. Assim como na medição de eficiências, foram realizadas 10 medições na chaminé de cada motor, em cada faixa de potência, coletando-se os dados de emissões de CO₂, NO_x, SO_x e material particulado. Para este procedimento foi utilizado um analisador de gases modelo TESTO 350 devidamente calibrado e uma coleta simultânea na base de dados do sistema supervisor das usinas.

Os resultados foram processados estatisticamente e foi considerado o conjunto de todas as emissões como índice de emissões. Esses dados foram posteriormente utilizados para avaliar o impacto ambiental e da ecoeficiência.

A escolha dos poluentes a compor o índice de emissões recaiu sobre um grupo de poluentes que servem como indicadores de qualidade do ar (CONAMA, 2012), que são: dióxido de enxofre (SO₂), partículas em suspensão, monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂). A razão da escolha destes parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada à sua maior frequência de ocorrência, a capacidade do equipamento utilizado na coleta e análise dos gases de exaustão e aos efeitos adversos que tais poluentes causam ao meio ambiente.

3.1.5. Etapa 4: Desenvolvimento do algoritmo utilizando inteligência computacional

O modelo matemático foi feito tomando em consideração três objetivos a otimizar:

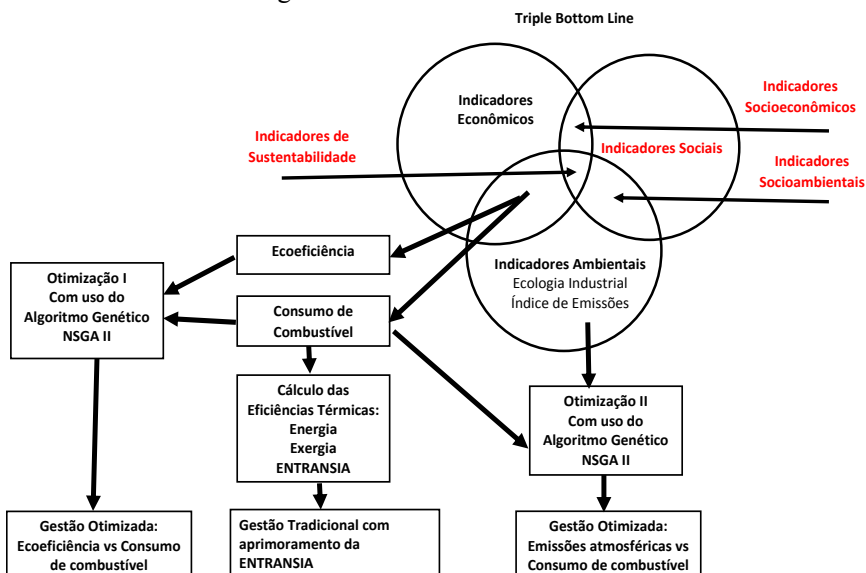
- A eficiência dos motores (através de três equações, uma para determinar a eficiência em função da energia, a outra em função da entropia e a terceira em função da entropia).
- As emissões atmosféricas (avaliada através da função índice de emissões, função ecológica e ecoeficiência).

- O custo (avaliado através da função consumo de combustível de cada motogerador).

Para a determinação das eficiências, conforme a primeira e segunda lei da termodinâmica, foi utilizado o software Microsoft Excel® e para a otimização, levando em conta os aspectos econômicos, de gestão e ambientais, foi utilizado o software MATLAB R 2016®, particularmente a função de Otimização. Foi necessário, além disso, programar as diferentes funções de custo e ecoeficiência no ambiente de MATLAB e usar o *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGAII) para poder desenvolver a otimização multiobjetivo (DEB *et al.*, 2002). Ainda no próprio algoritmo do NSGA II foram realizadas modificações para possibilitar ao gestor a tomada de decisão e a avaliação dos resultados ao se optar por desligar os motores menos eficientes em qualquer dos aspectos.

A figura 3.2 apresenta o foco metodológico do trabalho, onde pode-se observar as três possibilidades de análise para uma proposta de gestão e tomada de decisões geradas à partir da associação dos aspectos estudados, atingindo os termos econômicos e ambientais considerados no Triple Bottom Line. As informações em vermelho (social) foram aquelas não consideradas na elaboração deste trabalho.

Figura 3.2 - O *triple bottom line*, a sustentabilidade e a Ecoeficiência dentro da gestão das usinas termoeletricas.



A partir dos resultados apresentados na ferramenta computacional o gestor de uma usina termelétrica deve ser capaz de simular o desligamento dos motores menos eficientes e verificar os impactos que serão ocasionados em termos de ecoeficiência, índice de emissões, estando estes otimizados com a variável consumo de combustível e a eficiência térmica segundo diferentes conceitos da termodinâmica. Com essas três diferentes visões de impactos e resultados caberá ao gestor a tomada de decisão sobre como melhor operar seus ativos de geração de energia. O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do modelo.

3.1.6. Etapa 5: Análise dos Resultados

A lógica para a análise é que uma usina termelétrica será melhor, em termos de nível de sustentabilidade, quão melhores forem suas dimensões ambientais, econômicas e sociais. Sendo assim, foram avaliadas duas termoelétricas a fim de testar o procedimento. Por fim, as discussões geradas com a aplicação do procedimento e da ferramenta computacional devem contribuir para reunir elementos que possam justificar a disseminação do uso da gestão eficiente das usinas térmicas como apoio à sustentabilidade.

Callens e Tyteca (1999) apontam que um determinado resultado só pode ser considerado em relação ao conjunto de dados associado. Nesse sentido, também é verificado se o método proposto representa apropriadamente o problema, isto é, descreve adequadamente o desempenho dos indicadores (MORABITO; PUREZA, 2012). Portanto, a análise de resultados pode indicar, ainda, a necessidade de adaptações ao procedimento.

O Quadro 3.1 a seguir apresenta os resultados de acordo com cada objetivo específico bem como a etapa nos quais os mesmos foram atingidos.

Quadro 3.1 – Objetivos específicos e resultados declarados no texto da tese.

Etapa	Objetivo Específico	Entrega dos Objetivos
1, 2 e 3	Identificar em uma termoelétrica pontos de aprimoramento de gestão de usinas com foco em eficiência, incluindo a entransia, e variáveis ambientais;	Capítulos 1 e 2 <ul style="list-style-type: none"> • Contextualizar o tema; • Identificar os pontos de aprimoramento de gestão de usinas com foco em eficiência e variáveis ambientais; • Exploração teórica/empírica

		sobre as diferentes formas de cálculo de eficiência em usinas.
2 e 4	Fornecer um conjunto de expressões matemáticas para calcular e comparar as variáveis técnicas (eficiências), ambientais (Índice de Emissões, Função Ecológica e Ecoeficiência) e econômicas (consumo de combustível);	Capítulos 3 e 4 <ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer o critério de cálculo do índice de emissões; • Estabelecer o critério de cálculo da função ecológica; • Estabelecer meios de cálculo de eficiências térmicas e ambientais • Expressões matemáticas
4	Otimizar a eficiência por meio de um modelo matemático e um procedimento computacional, correlacionando os aspectos relativos à potência, o custo (consumo de combustível) e os impactos ambientais;	Capítulo 5 <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar os cálculos às usinas avaliadas e comparar os cenários; • Desenvolver o procedimento conforme modelo matemático criado; • Usar técnicas de otimização multi-objetivo para o modelo desenvolvido.
5	Realizar uma avaliação termoecológica de gestão para as diferentes possibilidades da usina atender a demanda de energia, visando a eficiência térmica segundo as diferentes expressões da primeira e segunda lei da termodinâmica, a ecoeficiência e o índice de emissões.	CAPÍTULOS 5 e 6 <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar a ferramenta à diferentes cenários de geração; • Testar o modelo aplicando ele à diferentes usinas e tecnologias; • Verificar consistência dos resultados e impactos na gestão de termoeletricas do ponto de vista termoecológico.

O capítulo a seguir apresenta o desenvolvimento do modelo que será empregado na ferramenta computacional para a obtenção das informações desejadas para a gestão termoecológica das usinas.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO PARA A GESTÃO TERMOECOLÓGICA DA USINA

Para desenvolver uma gestão economicamente sustentável nas usinas termoeletricas, não é só importante reduzir os custos, mas também diminuir a contaminação ambiental gerada pelos motores à combustão interna utilizados para gerar a eletricidade. Para levar em conta todos os parâmetros que afetam a eficiência e as emissões ambientais, foi desenvolvido um modelo matemático que será utilizado em um programa computacional que permitirá automatizar o modelo e gerar simulações por parte dos gestores. O modelo matemático foi elaborado considerando quatro objetivos a otimizar: i) eficiência dos motores; ii) as emissões atmosféricas; iii) o custo; e iv) a Ecoeficiência.

No caso da contaminação ambiental, foram avaliadas as perdas de energia dos gases de exaustão através dos diferentes enunciados da segunda lei da termodinâmica, usando a dissipação da entropia, aspecto novo e inédito para esta análise. Foram utilizados e aprimorados os conceitos de Ecoeficiência e da função ecológica. Em continuação será desenvolvido o procedimento para obter o modelo e as suas equações.

Este capítulo fará uso de algumas das expressões matemáticas obtidas na literatura e apresentadas anteriormente no capítulo 2, bem como as correlacionará no desenvolvimento de novas expressões. Para maior facilidade na compreensão do assunto e do racional utilizado na elaboração do modelo, as expressões serão novamente apresentadas conforme a necessidade.

4.1. MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DOS MOTORES DO PONTO DE VISTA ENERGÉTICO

A maioria dos processos de fluxo transitórios pode ser modelada como um processo de fluxo uniforme (FUAMBA, 1997). Com o objetivo de simplificar os cálculos dos motores de gás através da primeira lei, as seguintes premissas foram estabelecidas:

Premissa 01: Todo o motor opera no estado de equilíbrio, incluindo o gerador, fazendo parte do mesmo volume de controle o ar de combustão e os gases de escape e formam misturas de gases ideais:

Premissa 02: Os efeitos de energia potencial e cinética das correntes de fluido de entrada e saída são ignorados.

Após esses pressupostos, a taxa de energia do combustível para o volume de controle é dada pelas seguintes equações (ÇENGEL, 2005):

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \cdot \text{LHV} \quad (4.1)$$

Onde:

LHV é o poder calorífico inferior (kJ/kg)

\dot{m}_f é a taxa de fluxo de massa do combustível (kg / s)

A eficiência energética do volume de controle (percentagem de energia) η_{th} é determinada pela razão entre a potência de saída (trabalho líquido) para a entrada de energia de combustível, sendo determinada pela equação seguinte:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Saída útil}}{\text{Energia Fornecida (valor calórico do combustível)}} = \frac{N}{\dot{Q}_f} = \frac{N}{\dot{m}_f \cdot \text{LHV}} \quad (4.2)$$

N – Potência fornecida pelo motor.

A equação de eficiência energética acima reflete o uso da primeira lei de termodinâmica e considera uma relação direta entre a energia de saída e de entrada.

4.2. MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DOS MOTORES DO PONTO DE VISTA EXERGÉTICO

Ao contrário da energia, o valor de exergia depende do estado do meio (ambiente no qual se encontra), bem como o estado do sistema, sendo uma propriedade combinada. A análise exergética dos sistemas térmicos é realizada para melhorar a utilização das fontes de energia por meio da determinação da ordem de destruições de exergia e das perdas de exergia nos processos e componentes do sistema, culminando na redução de tais perdas.

No entanto, exergia é a soma das exergias termo-mecânicas $e_{Pot} + e_{kin} + e_{fis} = e_{tm}$ e químicas (e^{ch}), respectivamente. A exergia termo-mecânica é definida pela equação de Erduranli (1997) e de Çengel (2005):

$$e_{tm} = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (4.3)$$

Onde h e s são entalpia e entropia de fluxo por unidade de massa à temperatura e pressão correspondente, enquanto que h_0 e s_0 são os valores correspondentes destas propriedades, quando o fluido entra em equilíbrio com o meio de referência. As exergias químicas específicas de combustíveis líquidos podem ser avaliadas à partir da expressão seguinte, na base de unidade de massa (CANAKCI, 2006):

$$e_F^{ch} = \left[1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c} \right) \right] |LHV| \quad (4.4)$$

h , c , o , s são as frações mássicas de H, C, O e S, respectivamente.

A exergia química do combustível a gás foi calculada usando esta equação, tendo em conta a composição do gás natural para as duas usinas.

Com o propósito de se comparar os resultados é necessário estabelecer as condições de referência (ambiente) padrão para realização do estudo (BEJAN, 2002). Este ambiente padronizado se caracteriza como sendo ar a 1 atm (1,013 bar) e 30 °C. Neste caso se tomará a composição sugerida por Valero *et al.* (1994), que em frações molares é:

$$X_{N_2} = 0,77503 \quad X_{O_2} = 0,20591 \quad (4.5)$$

$$X_{CO_2} = 0,0003 \quad X_{H_2O} = 0,01876 \quad (4.6)$$

O gás natural utilizado nas usinas avaliadas é uma mistura de gases (ver composição na tabela 5.3 – Anexo 1) que, nas condições de admissão no motor, pode-se considerar como gás ideal, para o qual sua exergia química molar é dada por Kotas (1995):

$$e_{GN}^{-Q} = \sum_i X_i e_i^{-Q} + \bar{R} T_0 \sum_i X_i \ln X_i \quad (4.7)$$

Onde \bar{R} é a constante universal dos gases e a exergia química do gás natural corresponde ao somatório de todos os componentes da mistura. Os resultados da somatória do segundo membro correspondem à exergia química de cada componente.

No caso dos combustíveis em estado padronizado, ela pode ser obtida diretamente das tabelas de Bejan (1989):

$$e_{CH_4}^{-Q} = 830.200 \frac{kJ}{kmol}$$

$$e_{C_2H_6}^{-Q} = 1.493.900 \frac{kJ}{kmol}$$

$$e_{C_3H_8}^{-Q} = 2.149.000 \frac{kJ}{kmol}$$

A exergia química de substâncias presentes no ambiente como o nitrogênio e o dióxido de carbono, se calcula como:

$$e_i^{-Q} = -\bar{R} T_0 \ln X_{i,o} \quad (4.8)$$

Segundo Caliskan (2009), por meio do valor da exergia específica dos gases e o fluxo de combustível, pode-se achar a eficiência exergética dos motores. As eficiências exergéticas são úteis como meios de distinção e comparação para a utilização de recursos energéticos que são termodinamicamente efetivos daqueles que são menos. As eficiências exergéticas também podem ser usadas para avaliar a eficácia das medidas de engenharia tomadas para melhorar o desempenho de um sistema térmico e, no caso de motores à combustão, pode ser avaliada à partir da razão entre a potência de saída e a entrada de exergia do combustível, conforme abaixo:

$$\psi = \frac{\text{Exergia do Trabalho}}{\text{Exergia fornecida}} = \frac{\text{Potência}}{\dot{E}_f} \quad (4.9)$$

A equação de eficiência exergética acima reflete o uso da segunda lei de termodinâmica e apesar de manter a relação entre energia de saída e entrada conforme visto em eficiência energética, considera muito mais variáveis na verificação dos valores de energia considerados no cálculo.

4.3. MODELO MATEMÁTICO PARA A ANÁLISE DOS MOTORES DO PONTO DE VISTA DA ENTRANSIA E DA DISSIPAÇÃO DE ENTRANSIA

Historicamente, o estudo da eficiência do motor térmico levou à segunda lei da termodinâmica, que coloca restrições sobre a direção da transferência de calor e as eficiências atingíveis dos motores (KONDEPUDI, 1998).

O conceito de entropia introduzido mais tarde estendeu a segunda lei da termodinâmica em quase todas as disciplinas da ciência. As análises da segunda lei têm encontrado aplicações difundidas em vários problemas de engenharia (SZARGUT, 1980).

No entanto, a definição de entropia na termodinâmica clássica apresenta natureza abstrata e ambígua, que foi observado até mesmo por Clausius (1865), o primeiro que definiu a entropia na termodinâmica clássica. Além disso, durante as aplicações dos conceitos de geração de entropia e entropia em engenharia térmica, alguns paradoxos e inconsistências foram encontrados.

Este trabalho aplica os conceitos de entransia e dissipação de entransia em uma usina geradora de energia com motores à combustão interna. A combustão nestes motores é um processo irreversível e a dissipação de entransia é a ferramenta que quantifica a entransia consumida nestes processos irreversíveis. Segundo Mingtian (2011), a dissipação de entransia num processo irreversível é definida como:

$$G_{diss} = -G_g \quad (4.10)$$

Fazendo uma analogia dos conceitos de eficiência exergetica e baseado nos conceitos da entransia e da dissipação de entransia, busca-se preencher uma das lacunas do conhecimento encontradas que é possibilitar o cálculo da eficiência conforme estes novos conceitos. A expressão matemática abaixo estabelece como deve ser calculada a eficiência dos motores à combustão conforme a entransia:

$$\eta_G = \frac{W.T_1}{Q(T_1-T_2)} = \frac{N.T_{ex}}{Q_f(T_{ex}-T_{amb})} \quad (4.11)$$

Onde:

N – Potencia fornecida pelo motor

T_{ex} = T_1 – Temperatura dos gases de exaustão

T_{amb} = T_2 – Temperatura do meio ambiente

\dot{Q}_f – Fluxo de calor ao motor.

Hu (2011) também definiu a eficiência da transferência de calor conforme a Entransia (eficiência da transferência de Entransia) da seguinte forma:

$$\eta = \frac{E_{vh,in} - E_{vh,out}}{E_{vh,in}} \quad (4.12)$$

Onde: $E_{vh,in}$ é a Entransia de entrada e $E_{vh,out}$ é a Entransia de saída.

O fluxo de Entransia de entrada é igual a soma do fluxo de Entransia de saída mais a Entransia dissipada por unidade de tempo e de volume.

A eficiência da transferência de Entransia é, então:

$$\eta_{ent} = \frac{\dot{E}_{vh,in} - \dot{E}_{vh,out}}{\dot{E}_{vh,in}} = \frac{T_{ex}}{T_{amb}} m \quad (4.13)$$

Como se pode observar, a variável temperatura assume um papel relevante no cálculo da eficiência da transferência de entrasia.

4.4. ENERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO

O calor de exaustão total \dot{Q}_{ex} , ou calor total dos gases de combustão, expresso em taxa de fluxo de energia, é dado pela equação (KOPAC, 2005):

$$\dot{Q}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot C_e (T_e - T_a) \quad (4.14)$$

Onde:

\dot{Q}_{ex} - energia (calor disponível dos gases de exaustão)

\dot{m}_{ex} - taxa de fluxo da massa dos gases de exaustão (kg / s)

C_e - calor específico dos gases de exaustão

T_e - Temperatura dos gases de exaustão em °C

T_a - Temperatura do meio ambiente em °C

O calor específico dos gases de exaustão depende da composição dos mesmos. Existe uma fórmula empírica aproximada para determinar este calor que é a seguinte (SALGA e CACERES, 2010):

$$C_e = 0,9952 + 92,1E-6 \cdot T \quad (4.15)$$

Essa referência de cálculo de calor específico foi utilizada mais a frente nos cálculos do calor total de exaustão.

4.5. EXERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO

Para calcular a exergia dos gases de exaustão há que se conhecer os seguintes parâmetros:

- volume dos gases de exaustão;
- pressão dos gases de exaustão;
- temperatura dos gases de exaustão;
- temperatura ambiente;
- pressão ambiente.

Foram assumidas as seguintes considerações e premissas:

1. Os gases da combustão constituem um sistema fechado.
2. Os gases da combustão são considerados com ar como comportamento de gás ideal.
3. As energias cinéticas e potenciais são desprezadas.
4. $T_0 = 27^\circ\text{C}$ e $p_0 = 1,013 \text{ bar}$

Conforme as premissas, a exergia específica dos gases de exaustão pode ser calculado com a seguinte expressão:

$$E_{ex} = u - u_0 + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (4.16)$$

Onde:

E_{ex} - exergia dos gases de exaustão

u - energia interna específica

s - entropia dos gases de escape

p_0 - pressão ambiente

T_0 - Temperatura ambiente

v - Volume específico

s_0 - Entropia específica

Os valores de energia interna e entropia podem ser encontrados em tabelas de referências (MORAN, 2004).

4.6. ENTRANSIA DOS GASES DE EXAUSTÃO

A Taxa de Entrância dos gases de exaustão, conforme a Segunda Lei da Termodinâmica, pode ser calculada por:

$$\dot{G}_{ex} = \dot{Q}_{ex}(T_{ex} - T_{amb}) \quad (4.17)$$

Onde:

\dot{G}_{ex} – Taxa de Entrância dos gases de exaustão em kJ/seg°K

T_{ex} – Temperatura dos gases de exaustão

T_{amb} – Temperatura ambiente

\dot{Q}_{ex} – Taxa de calor dos gases de exaustão

Desenvolvendo a fórmula anterior tem-se:

$$\dot{Q}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex}(T_{ex} - T_{amb}) \quad (4.18)$$

\dot{m}_{ex} – Fluxo dos gases de exaustão

c_{ex} – Calor específico dos gases de exaustão

Então:

$$\dot{G}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex}(T_{ex} - T_{amb}) \times (T_{ex} - T_{amb}) \quad (4.19)$$

$$\dot{G}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex}(T_{ex} - T_{amb})^2 \quad (4.20)$$

$$\dot{G}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex}(T_{ex}^2 - 2T_{amb} \cdot T_{ex} + T_{amb}^2) \quad (4.21)$$

O calor específico dos gases de exaustão depende da composição dos mesmos e pode ser calculado pela expressão aproximada já descrita anteriormente:

$$C_{ex} = 0,9952 + 92,1E-6 \cdot T \quad (4.22)$$

A fórmula aproximada acima apresentada (4.22) foi definida originalmente por Salga e Caceres (2010).

4.7. PRINCIPAIS DADOS E VARIÁVEIS A LEVAR EM CONTA PARA AVALIAR AS EFICIÊNCIAS CONFORME OS DIFERENTES CONCEITOS

Para poder aplicar todas as expressões do modelo que envolvem o cálculo das eficiências e traçar uma curva de comportamento dos motores em função das potências, fez-se necessário operar os motores a diferentes valores de potência (110%, 100%, 90%, 80%, 70%, 50%, 25%), de forma a mapear e avaliar o comportamento e eficiências a cada faixa operacional e integrar os pontos em uma curva. No quadro 4.1, a seguir, se apresenta os dados de entrada necessários para os cálculos e os resultados a obter.

Quadro 4.1 - Dados de Entrada e eficiências de saída.

Dados de entrada necessários	Resultados a calcular
Consumo de combustível (kg/h ou l/s)	Fluxo de Calor Q (kJ/s)
Potência Elétrica (Q) (kW)	Exergia do combustível (kJ/s)
Potência de saída (P) (kW)	Eficiência energética (%)
Temperatura ambiente (K)	Eficiência exergetica (%)
Temperatura gases de exaustão (K)	Eficiência na Entransia (%)
Pressão ambiente (bar)	
Pressão na câmara de combustão (bar)	
Exergia do combustível (ef) (kJ/kg)	
Poder Calorífico Inferior (LHV) (kJ/kg)	
Fluxo de combustível (mf) (kg/s)	

Depois de calcular as eficiências dos motores, é necessário se calcular a energia perdida nos gases de exaustão.

4.8. PRINCIPAIS DADOS E VARIÁVEIS AVALIAÇÃO DA ENERGIA PERDIDA NOS GASES DE EXAUSTÃO

Os gases de exaustão, além de contaminar o meio ambiente, têm uma grande quantidade de energia que pode ser calculada e aproveitada. Para poder fazer os cálculos dessa energia são necessários coletar uma série de dados, para depois realizar os procedimentos de análise e cálculos correspondentes. O quadro 4.2 a seguir apresenta os dados de entrada necessários para os cálculos e os respectivos resultados.

Quadro 4.2 - Dados de Entrada e energia calculada.

Dados de entrada necessários	Resultados a calcular
p_0 – pressão ambiente	c_{ex} – Calor específico dos gases de exaustão
T_0 – Temperatura ambiente	u – energia interna específica
v – Volume específico	s – entropia dos gases de exaustão
s_0 – Entropia específica	e_x - exergia dos gases de exaustão
C_e - calor específico gases	\dot{Q}_{ex} - energia (calor disponível dos gases de exaustão).
T_{ex} – Temperatura de exaustão (°C)	
T_{amb} – Temperatura ambiente (°C)	
\dot{m}_{ex} – Fluxo dos gases (kg/s)	

4.9. MODELO MATEMÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DA USINA

As medições relativas da ecoeficiência expressam as contribuições corporativas para a sustentabilidade como benefícios por unidade de impacto ambiental, ou econômico, e podem, assim, eliminar alguns problemas relacionados com os ganhos e o impacto ambiental (KORHONEN e LUPTACIK, 2004; KUOSMANEN e KORTELAJINEN, 2005; MÜLLER *et al.*, 2015).

Atualmente, há dois usos diferentes do termo ecoeficiência. Como postulado, a ecoeficiência se refere à redução, ou minimização, do impacto ambiental (DESIMONE e POPOFF, 2000; BENN *et al.*, 2014). O segundo conceito utiliza o termo ecoeficiência para descrever a relação entre o valor criado e o impacto ambiental produzido. Então, o valor mensurável da ecoeficiência pode ser calculado pela seguinte expressão (SCHALTEGGER e STURM, 1990):

$$\text{Ecoeficiência} = \frac{\text{Valor monetario adicionado}}{\text{Impacto ambiental adicionado}} \quad (4.23)$$

O conceito aqui adotado de valor agregado de uma empresa é definido como o valor residual que permanece após o volume de negócios, reduzido do custo de bens e serviços adquiridos pela empresa (HEIJUNGS *et al.*, 1992). O impacto ambiental agregado representa a soma de todos os fluxos de energia e materiais em consideração,

induzidos pela atividade econômica ponderada pela sua nocividade em relação ao meio ambiente (HEIJUNGS *et al.*, 1992). Segundo Heijungs *et al.* (1992), esta agregação é feita através da classificação de todas as emissões, de acordo com as suas contribuições para diferentes problemas ambientais que são, então, ponderadas por sua nocividade relativa.

A ecoeficiência descreve o grau em que uma empresa usa os recursos ambientais em relação à sua economia. No caso das usinas termoeletricas, o valor agregado tem a ver com a eletricidade produzida e o impacto ambiental agregado com as emissões atmosféricas geradas pela combustão do combustível fóssil nos motores usados para a geração de energia elétrica. Os objetivos da ecoeficiência em uma usina termoeletrica com motores à combustão seriam:

- reduzir necessidades de matéria-prima (água e combustível);
- reduzir a intensidade e perdas energéticas;
- reduzir a dispersão tóxica e as emissões gasosas;
- reforçar a capacidade de reciclagem de material;
- maximizar o uso sustentável dos recursos renováveis;
- estender a durabilidade e qualidade do bem produzido.

Nas usinas geradoras de energia elétrica, além da eletricidade, é gerada uma grande quantidade de calor e de poluentes do ar nos gases de exaustão. Existem vários padrões nacionais e internacionais que estabelecem os limites permissíveis para os diferentes poluentes do ar, embora ainda não tenha sido encontrada na literatura internacional uma expressão matemática para avaliar o impacto ambiental produzido por todos os componentes dos gases de exaustão como um todo, ou em conjunto.

Um dos aspectos que mais prejudica o meio ambiente são as emissões gasosas das usinas geradoras de eletricidade, que utilizam principalmente combustíveis fósseis. Estas não só poluem o meio ambiente com substâncias nocivas, tais como monóxido e dióxido de carbono, dióxido de nitrogênio, NO_x e outros, mas também contribuem para o aquecimento global devido à alta temperatura dos gases de exaustão. No entanto, existem poucas referências na literatura que ligam a energia gerada por um motor e os danos ao meio ambiente por ele causado.

Para aplicar a fórmula (4.23) é necessário ter todos os ganhos da usina em um período de tempo e, além disso, as emissões geradas.

4.10. MODELO MATEMÁTICO PARA A DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO ECOLÓGICA DA USINA

Neste trabalho se desenvolve uma nova "função ecológica", baseada na função de Angulo-Brown (1991) e tendo como base os conceitos de Entransia de Guo e Liang (2007). Para o desenvolvimento da expressão matemática se partiu da expressão (2.4) e se usou o princípio de analogia comparando a entropia com a entransia. Esta função será aplicada a uma usina geradora de eletricidade com motores à combustão.

A nova expressão desenvolvida neste trabalho foi:

$$E'_{ent} = P - \frac{G'_{ex}}{T_0} \quad (4.24)$$

Onde:

G'_{ex} é a taxa da dissipação de Entransia dos gases de exaustão

P é a potência em kW

T_0 é a temperatura ambiente em K

E'_{ent} é a função ecológica com base na entransia

Esta expressão tem a vantagem de levar em conta a Entransia dos gases de exaustão, que é a capacidade de transferência de calor à partir desses gases, que se não reaproveitado, contribuem para o aquecimento do ambiente através da dissipação de entransia. A dissipação de Entransia, ou Entransia dos gases de exaustão (a depender do referencial), pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$G'_{ex} = Q'_{ex}(T_{ex} - T_0) \quad (4.25)$$

Onde:

G'_{ex} – Taxa de Entransia dos gases de exaustão em kJ/s

T_{ex} – Temperatura dos gases de exaustão em K

T_0 – Temperatura do meio ambiente em K

Q'_{ex} – Fluxo de calor dos gases de exaustão

Desenvolvendo a fórmula anterior tem-se:

$$Q_{ex} = m'_{ex} \cdot c_{ex}(T_{ex} - T_0) \quad (4.26)$$

Onde:

\dot{m}_{ex} – Fluxo dos gases de exaustão

c_{ex} – Calor específico dos gases de exaustão

Então:

$$G_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex} - T_0) \times (T_{ex} - T_0) \quad (4.27)$$

$$G_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex} - T_0)^2 \quad (4.28)$$

$$G_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex}^2 - 2T_0 \cdot T_{ex} + T_0^2) \quad (4.29)$$

$$E' = P - \frac{\dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex}^2 - 2T_0 \cdot T_{ex} + T_0^2)}{T_0} \quad (4.30)$$

$$E' = P - \frac{\dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex}^2 - 2T_0 \cdot T_{ex} + T_0^2)}{T_0} \quad (4.31)$$

$$E'_{ent} = P - \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} \left(\frac{T_{ex}^2}{T_0} - 2 \cdot T_{ex} + T_0 \right) \quad (4.32)$$

Da expressão acima pode ser comprovado que, para um dado motor e do ponto de vista ecológico e para uma determinada potência, é importante que o fluxo dos gases de exaustão tenha a menor temperatura possível. Agora, em um processo de combustão que se deseja gerar o máximo de energia possível, a temperatura aumenta, assim, percebe-se que estes dois aspectos são antagônicos.

4.10.1. Dados de entrada para a Função Ecológica

Para comparar e aplicar as expressões da função ecológica será realizada uma coleta de dados a diferentes potências dos motores, e alguns cálculos intermédios como são os casos do fluxo de calor e da exergia do combustível. Ver modelo a ser preenchido no quadro 4.3 apresentado a seguir.

Quadro 4.3 - Dados motor a diferentes potências.

CONSUMOS REAIS E EFICIÊNCIAS	% da Potência				
	100%	80%	60%	40%	20%
Parâmetros / Variáveis					
Consumo de combustível (kg/h ou l/s)					
Potência Elétrica (Q) (kW)					
Potência de saída (P) (kW)					
Pressão da mistura / P1 Mistura					
Temperatura da mistura / T1 Mistura					
Temperatura ambiente (°C)					
Temperatura ambiente (K)					
Temperatura Média de exaustão °C					
Temperatura gases de exaustão (K)					
Lambda					
Pressão ambiente (bar)					
Pressão na câmara de combustão (bar)					
Exergia do combustível (ef) (kJ/kg)					
Poder Calorífico Inf. (LHV) (kJ/kg)					
Fluxo de combustível (mf) (kg/s)					
Fluxo de Calor (kJ/s)					
Exergia do combustível kJ/s					

4.10.2. Procedimento para aplicar a Função Ecológica

Para poder aplicar a expressão de Angulo-Brown (1991), foi desenvolvido o seguinte procedimento:

$$E' = P - T_0 \cdot \sigma \quad (4.33)$$

A geração de entropia conforme Ribeiro (2006) e Ribeiro *et al.* (2007) pode ser calculada como:

$$\dot{S}_{gen} = \sigma = \frac{\dot{Q}_{ex}(T_{ex}-T_0)}{T_0 \cdot T_{ex}} \quad (4.34)$$

A taxa de calor total dos gases de exaustão expressa em taxa de fluxo de energia é dada pela equação (BLAIR, 1999; KOPAC e KOKTURK, 2005; PARLAK *et al.*, 2005):

$$\dot{Q}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex} - T_0) \quad (4.35)$$

Onde:

\dot{Q}_{ex} - Fluxo da taxa de calor disponível dos gases de exaustão

\dot{m}_{ex} - taxa de fluxo de massa dos gases de exaustão (kg / s)

c_{ex} - calor específico dos gases de exaustão.

T_{ex} - Temperatura dos gases de exaustão em K

T_0 - Temperatura ambiente em K

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{Q}_{ex}(T_{ex}-T_0)}{T_0 \cdot T_{ex}} \quad (4.36)$$

$$\dot{Q}_{ex} = \dot{m}_{ex} \cdot C_{ex} (T_{ex} - T_0) \quad (4.37)$$

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex}-T_0)(T_{ex}-T_0)}{T_0 \cdot T_{ex}} \quad (4.38)$$

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex}-T_0)^2}{T_0 \cdot T_{ex}} \quad (4.39)$$

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} (T_{ex}^2 - 2 \cdot T_0 T_{ex} + T_0^2)}{T_0 \cdot T_{ex}} \quad (4.40)$$

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} \left(\frac{T_{ex}}{T_0} - 2 + \frac{T_0}{T_{ex}} \right) \quad (4.41)$$

$$E' = P - T_0 \cdot \sigma \quad (4.42)$$

$$E' = P - T_0 \cdot \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} \left(\frac{T_{ex}}{T_0} - 2 + \frac{T_0}{T_{ex}} \right) \quad (4.43)$$

$$E' = P - \dot{m}_{ex} \cdot c_{ex} \left(T_{ex} - 2 \cdot T_0 + \frac{T_0^2}{T_{ex}} \right) \quad (4.44)$$

A expressão (4.44) é o desdobramento da expressão do Ângulo-Brown, em função da temperatura ambiente e da temperatura dos gases de exaustão.

Ao ser comparada essa expressão (4.44) com a expressão desenvolvida neste trabalho com o uso dos conceitos de entropia (4.32), pode-se observar que na função de Ângulo-Brown (4.44) a temperatura ambiente tem coeficiente de maior peso no resultado, enquanto na expressão desenvolvida neste trabalho a temperatura mais relevante na análise da eficiência ecológica de um motor a combustão passa a ser a dos gases de exaustão que de fato varia em função da potência aplicada a cada motor.

O calor específico dos gases de exaustão depende da composição dos mesmos. Existe uma fórmula aproximada para determinar de maneira aproximada este calor que é a seguinte (DOMINGUES, 2011):

$$C_e = 956,0 + 0,3386 \times T_{ex} - 2,476 \times 10^{-5} T_{ex}^2 \quad (\text{J/kg/K}) \quad (4.45)$$

Com estes dados, pode-se achar o fluxo de calor perdido nos gases de exaustão. O quadro 04 a seguir apresenta a relação de resultados a serem obtidos e avaliados a cada faixa de potência do motor de combustão analisado. Estes resultados serão calculados de acordo com as expressões matemáticas aqui apresentadas em relação ao fluxo dos gases de exaustão.

Este quadro será preenchido com os cálculos realizados para a potência dos motores ajustadas para 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Desta forma, ao final torna-se possível traçar uma curva que descreva o comportamento de cada um destes parâmetros em função do despacho de carga de cada motor.

Quadro 4.4 - Resultados da energia dos gases de exaustão.

Resultados a calcular	% da Potência				
	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %
Parâmetros / Variáveis					
Energia dos gases de exaustão					
Exergia específica dos gases de exaustão					
Exergia dos gases de exaustão					

Entransia dos gases de exaustão					
Geração de Entropia					
Função ecológica Angulo-Brown (E')					
Função ecológica do autor (E' _{ent}) - Entransia					

4.11. MODELO MATEMÁTICO – DESPACHO ECONÔMICO E AMBIENTAL

O problema de despacho econômico é simultaneamente minimizar a taxa de custo global e atender à demanda de carga de um sistema de potência. O problema de despacho econômico clássico se destina a fornecer a quantidade necessária de energia para o menor custo possível (WOOD e WOLLENBERG, 2012). O problema de despacho econômico pode ser afirmado matematicamente como se segue:

Para minimizar o custo total de combustível em usinas térmicas:

$$F_1(P_i) = \text{Min} \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad \$/\text{h} \quad (4.46)$$

Onde a_i , b_i e c_i são os coeficientes de custos de cada uma das i_{th} unidades geradoras, n é o número de geradores e P_i é a potência ativa de cada gerador.

Sujeito às restrições de igualdade reais de balanço de potência:

$$\sum_{i=1}^n P_i - P^D - P^L = 0 \quad (4.47)$$

Onde P_i é a potência de saída de cada i gerador, P^D é a demanda de potência e P^L são as perdas da transmissão.

O cálculo das perdas de potência P^L , abrange a solução do problema do fluxo de potência, que tem restrições de igualdade da potência ativa e da potência reativa em cada barramento como segue:

$$P^L = \sum_{i=1}^n B_i P_i^2 \quad (4.48)$$

Para modelar as perdas da transmissão se aplica uma simplificação, estabelecendo-as como uma função da potência de saída de cada gerador através dos coeficientes de perdas de Kron, derivados da fórmula de Kron para as perdas.

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^M B_{0i} P_{Gi} + B_{00} \quad (4.49)$$

Onde B_{ij} , B_{0i} e B_{00} são os coeficientes de perda de potência na rede de transmissão. Pode ser obtida uma precisão razoável quando as condições de operação reais ficam perto do caso base de onde foram obtidos os coeficientes B (WANG e SINGH, 2007).

A potência está sujeita também a uma restrição de desigualdade em termos de capacidade de geração. Para uma operação estável, a potência de cada gerador está limitada por limites superiores e inferiores. A restrição nos limites de saída de cada gerador é:

$$P_{min.i} \leq P_i \leq P_{max.i} \quad (4.50)$$

Onde, P_i – Potência de saída do i gerador, $P_{min.i}$ – Potência mínima do i gerador e $P_{max.i}$ – Potência máxima do i gerador.

Considera-se também duas outras restrições do ponto de vista logístico, que são as seguintes:

- A primeira é uma restrição de desigualdade em termos de fornecimento de combustível, onde em cada intervalo de tempo, a quantidade de combustível fornecido F_{im} a cada gerador deve ficar dentro do seu limite inferior F_i^{min} e o seu limite superior F_i^{max} (BASU, 2014), ou seja:

$$F_i^{min} \leq F_{im} \leq F_i^{max}, i \in N, m \in M \quad (4.51)$$

Onde:

F_{im} – Combustível fornecido ao motor i no intervalo m ;

F_i^{min} – Mínima quantidade de combustível fornecido a cada motor i ; e

F_i^{max} – Máxima quantidade de combustível fornecido a cada motor i .

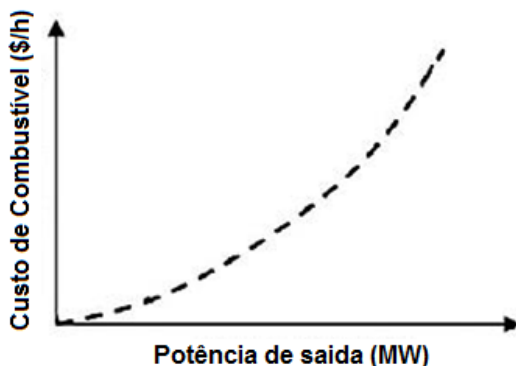
- A segunda é uma restrição de desigualdade em termos de limites de armazenamento de combustível onde, o volume de armazenamento de combustível V_{im} de cada unidade em cada intervalo deve estar dentro de seu limite inferior V_{min} e seu limite superior V_{max} , (BASU, 2014), ou seja:

$$V_{min} \leq V_{im} \leq V_{max} \quad (4.52)$$

$$V_{im} = V_{(m-1)} + F_{im} - t_m [\eta_i + \delta_i P_i + \mu_i P_i^2] \quad i \in N, m \in M \quad (4.53)$$

Onde, η_i , δ_i e μ_i são os coeficientes de consumo de combustível de cada unidade geradora. A curva de custo/consumo de combustível versus a potência de saída de um motor a combustão é apresentada a seguir.

Figura 4.1 - Custo de combustível *versus* a Potência de Saída.



Fonte: Basu (2014)

O despacho clássico de potência gera resultados financeiros sem avaliar os aspectos ambientais, com isso, as usinas tendem a produzir alta quantidade de CO_2 , SO_2 e NO_x . Uma estratégia alternativa do despacho econômico para satisfazer a exigência ambiental é minimizar custo de operação sob restrições ambientais.

O controle das emissões pode ser incluído no despacho econômico convencional, adicionando o custo ambiental aos custos de geração (KING *et al.*, 1995; YALCINOZ e ALTUN, 2002). As emissões são modeladas com o meio ambiente e, em seguida, são adicionadas ao custo de geração.

A função objetivo geral a ser minimizada ficaria como:

$$\text{Minimizar } C = w_0 F_1 + w_1 E_S + w_2 E_N \quad (4.54)$$

Onde C é o custo total levando em conta as emissões, F_1 é o custo de geração, E_S é a função de emissão de SO_2 , E_N é a função de emissão de NO_x . w_0 , w_1 e w_2 são os pesos do custo, da emissão de SO_2 e das emissões de NO_x , respectivamente.

Nesta pesquisa, serão usadas como curvas de custo de combustível as curvas do SO_2 e o NO_x . As curvas podem ser expressas como segue:

$$E_S = \sum_{i=1}^n (d_i + e_i P_i + f_i P_i^2) \quad (4.55)$$

$$E_N = \sum_{i=1}^n (g_i + h_i P_i + k_i P_i^2) \quad (4.56)$$

Onde d_i , e_i , f_i , g_i , h_i e k_i são parâmetros estimados com base aos resultados de testes de emissão das diferentes unidades.

Neste modelo, quando os pesos das emissões são iguais a zero, a função objetivo se torna um problema de despacho econômico clássico. Nesta opção do despacho econômico só se trata de minimizar os custos da produção de eletricidade. No caso em que o peso dos custos de geração sejam zero, trata-se de um problema de minimização das emissões. Quando nenhum dos pesos é zero na função objetivo, então o problema se converte em uma minimização das emissões e do custo de combustível ao mesmo tempo.

Segundo Purkayastha e Sinha (2010), a t/h de emissão total $F_2(P_i)$ de poluentes atmosféricos tais como o dióxido de enxofre, SO_2 , óxidos de nitrogênio e NO_x , causadas pela queima de combustíveis em unidades térmicas, pode ser expressa como:

$$F_2(P_i) = \text{Min} \sum_{i=1}^n (d_i + e_i P_i + f_i P_i^3) \quad \text{m}^3/\text{h} \quad (4.57)$$

Onde d_i , e_i e f_i são os coeficientes das características de emissão por cada i_{th} unidade geradora.

Segundo Zhang *et al.* (2013), o problema biobjetivo de despacho de emissão e econômico combinado pode ser convertido em um problema de otimização de um só objetivo através da introdução de um fator “h” de penalidade de preço como segue:

$$\text{Minimizar } F = F_c + h_i * EC \quad (4.58)$$

Onde F_c é a função custo de combustível.

A expressão anterior está sujeita às equações e restrições de fluxo de potência. O fator de penalidade do preço “h” combina a emissão com o custo de combustível e F é o custo operacional total em \$ / h. O fator de penalidade de preço h_i é a relação entre o custo máximo de

combustível e a emissão máxima do gerador correspondente (ZHANG *et al.*, 2013).

$$h_i = \frac{F_c(p_{gi}^{max})}{EC(p_{gi}^{max})} \quad (4.59)$$

Onde d_i , e_i e f_i são os coeficientes das características de emissão por cada i_{th} unidade geradora.

4.12. PROCEDIMENTO PARA A OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO ECONÔMICA E AMBIENTAL DA USINA USANDO NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM (NSGAI)

O NSGA-II é conhecido como algoritmo genético e tem características como a de usar técnicas de categorização não dominadas para fornecer a solução o mais próximo possível para a solução de Pareto ótima, usar técnicas de distância de aglomeração para proporcionar diversidade na solução e usar técnicas elitistas para preservar a melhor solução da população atual na próxima geração.

Existem duas fases na resolução de problemas multiobjetivo: a determinação do conjunto de soluções não-dominadas e a seleção da melhor solução de compromisso. O processo de execução é explicado nos seguintes passos (DHILLON; JAIN, 2011):

Passo - 1 Organização dos dados do gerador de acordo com os mais eficientes e a seleção de número mínimo de geradores que satisfazem a demanda de potência ativa.

Passo - 2 Definição da demanda de potência a ser fornecida pela planta em MW.

Passo - 3. Estabelecer os parâmetros do algoritmo: tamanho da população; número de interações.

Passo - 4 Inicializar a população P_t .

Passo - 5 Criar a população prole ou descendentes Q_t da população atual P_t .

Passo - 6. Combine as duas populações Q_t e P_t para formar R_t onde $R_t = P_t \cup Q_t$.

Passo - 7. Encontrar as frentes de Pareto não-dominadas F_i de R_t .

Passo – 8. Iniciar a nova população $P_{t+1} = \text{zero}$ e a contagem de frente para a inclusão $i = 1$.

Passo – 9. Enquanto $P_{t+1} + F_i \leq N_{pop}$, fazer: $P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup F_i$, onde $i \leftarrow i + 1$.

Passo – 10. Ordenar a última frente F_i usando a distância de aglomeração em ordem decrescente e escolher os primeiros elementos $(N_{pop} - P_{t+1})$ de F_i .

Passo – 11. Usar os operadores de seleção, cruzamento e mutação para criar a população, prole ou os descendentes da nova população Q_{t+1} .

No presente trabalho foi usado o NSGAI para otimizar o funcionamento de uma planta geradora de eletricidade. A otimização 01, primeira forma de otimização, sendo esta para permitir aos gestores uma análise dos impactos de suas operações em função do custo e das emissões atmosféricas, utilizou as seguintes funções objetivo:

- 1- O Custo de combustível
- 2- O Índice de Emissões

A otimização 02, segunda forma de otimização, sendo esta para permitir aos gestores uma análise dos impactos de suas operações em função do custo e da Ecoeficiência, utilizou as seguintes funções objetivo:

- 1- O Custo de combustível
- 2- Ecoeficiência

As otimizações com mais de um objetivo apresentadas acima, são conhecidas como multi-objetivo e foram apresentadas e formuladas usando o NSGA-II. Estas otimizações oferecem um conjunto de soluções ótimas de Pareto, em que um objetivo não pode ser melhorado sem sacrificar outros objetivos. Para aplicações práticas, no entanto, é preciso selecionar uma solução que irá satisfazer os diferentes objetivos, em certa medida. Essa solução é chamada melhor solução de compromisso (DHILLON; JAIN, 2011).

Todas as funções utilizadas são quadráticas. Os coeficientes das expressões do custo do combustível, das emissões e da Ecoeficiência nos motores à combustão, foram que ser obtidos por meio de testes dos motores a diferentes potências, cálculos e medições dos resultados.

Em uma otimização multicritério utilizando-se o NSGA II o programa inicia gerando aleatoriamente uma população e satisfazendo as restrições do balanço de potência. Para fornecer a diversidade da população, a distância de aglomeração é calculada (DHILLON; JAIN, 2011). Em primeiro lugar atribui o valor limite para o infinito e, em seguida, calcula-se a distância de aglomeração (DHILLON; JAIN, 2011). Uma vez que os indivíduos são classificados com base na não-dominância com a distância de aglomeração atribuída, a seleção é realizada através de um operador de comparação de aglomeração ($> n$) e a melhor solução é selecionada.

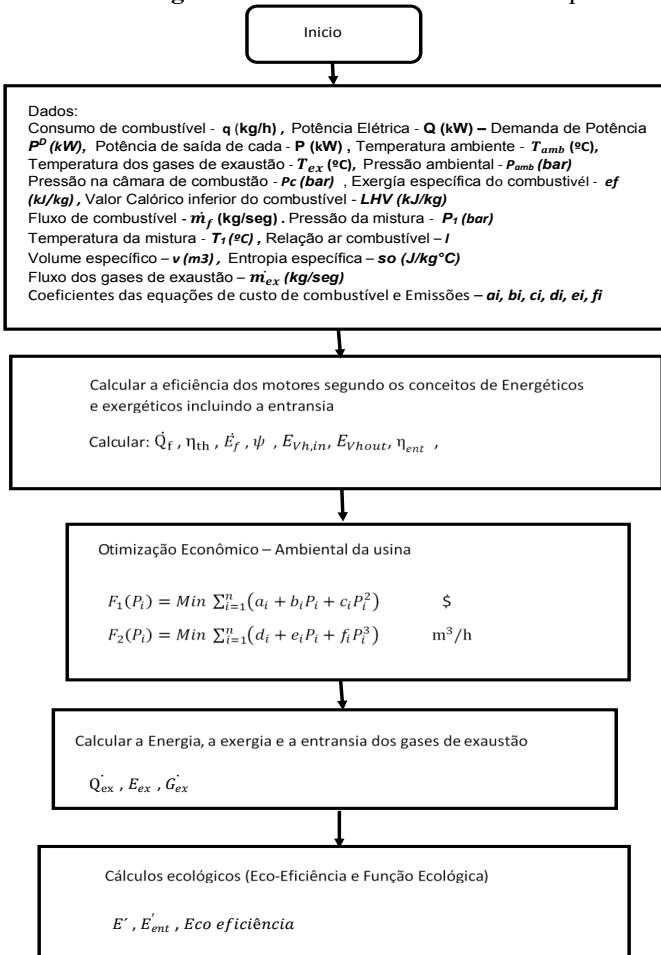
O algoritmo genético a ser empregado neste trabalho usa o cruzamento simulado binário e a mutação polinomial para criar a população. Para gerar a prole ou soluções filhas usando cruzamento, é necessário selecionar aleatoriamente a solução de dois pais ($p_{1,k}, p_{2,k}$) da população inicial e, em seguida gerar a solução de dois descendentes ($c_{1,k}, c_{2,k}$). No caso da mutação polinomial se seleciona aleatoriamente uma solução-pais à partir da população e aplica o operador de mutação para gerar uma única descendência (DHILLON; JAIN, 2011).

Ao final das interações o programa oferece o que é considerado como solução ótima, ou melhor solução compromisso.

4.13. PROCEDIMENTO GERAL PARA A OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA USINA DO PONTO DE VISTA ECONÔMICO E AMBIENTAL

Para realizar a otimização geral da usina desde o ponto de vista econômico e ambiental tem que se aplicar todas as expressões e modelos matemáticos desenvolvidos anteriormente. Na Figura 4.2 é apresentado o fluxo esquemático simplificado do procedimento desenvolvido neste trabalho e apresentado neste capítulo.

Figura 4.2 - Procedimento Geral Simplificado.



Fonte: Construção própria.

Ao se obter os resultados de cada cálculo e otimização apresentado acima o gestor será capaz de avaliar com o objetivo de não só reduzir os custos, mas também diminuir a contaminação ambiental gerada pelos motores à combustão interna, otimizando sua gestão operacional tendo em vista os resultados e os pontos de maior eficiência. O capítulo a seguir apresenta os resultados obtidos neste trabalho ao aplicar estes procedimentos em casos práticos.

5. RESULTADOS

A formulação desenvolvida no capítulo anterior foi aplicada em duas usinas termoelétricas com motores à combustão interna. Os procedimentos de gestão otimizada multicritério foram aplicados a uma amostra de motores. Este capítulo irá apresentar e analisar do ponto de vista técnico o significado de cada um dos resultados obtidos. No capítulo seguinte serão discutidos estes resultados do ponto de vista de gestão termoecológica.

5.1. DESCRIÇÃO DAS USINAS

A primeira usina avaliada, doravante denominada como Usina X, está configurada conforme mostra a tabela 5.1

Tabela 5.1. Dados da usina X.

Usina X				
Motor				
Quantidade Instalada	Tipo	Fabricante	Potência	Combustível
03	18V 48/60	MAN B & W	18.428 kW	OCA1
01	16V 32/40	MAN B & W	7.457 kW	OCA1
01	18V 51/60 DF	MAN B & W	17.560 kW	OCA1 e GN
23	J620	GE Jenbacher	3.290 kW	Gás Natural (GN)
Geradores				
Quantidade Instalada	Tipo	Fabricante	Tensão	
04	AMG 1600UU	ABB	13,8kV	
01	AMG 1120MP	ABB	13,8kV	
23	AVK 620	AVK	13,8kV	

A segunda usina avaliada, doravante denominada como Usina Y, está configurada com o mostra a tabela 5.2

Tabela 5.2. Dados da usina Y.

Usina Y				
Motor				
Quantidade Instalada	Tipo	Fabricante	Potência	Combustível
04	18V 48/60	MAN B & W	18.428 kW	OCA1
01	16V 32/40	MAN B & W	7.457 kW	OCA1
23	J620	GE Jenbacher	3.290 kW	Gás Natural (GN)
Geradores				
Quantidade Instalada	Tipo	Fabricante	Tensão	
04	AMG 1600UU	ABB	13,8kV	
01	AMG 1120MP	ABB	13,8kV	
23	AVK 620	AVK	13,8kV	

5.2. COMPOSIÇÃO DO GÁS NATURAL DAS USINAS

A composição do gás natural da Usina X é apresentada na tabela 5.3 e da Usina Y na tabela 5.4 do Anexo 1.

Com base na composição do gás natural e a adoção da fórmula 4.4 apresentada no capítulo 4 e transcrita abaixo, foram calculadas as **exergias específicas** do combustível.

$$e_F^{ch} = \left[1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2,0628 \frac{h}{c} \right) \right] |LHV| \quad (4.4)$$

Os valores obtidos para cada uma das usinas foram:

Usina X: $e_F^{ch} = 50050,7$

Usina Y: $e_F^{ch} = 50834,2$

A diferença nos resultados é em função a pequenas variações na composição do gás utilizado em cada uma das usinas no momento dos testes.

5.3. EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS MOTORES DAS USINAS - MOMENTO DA INSTALAÇÃO

Apresenta-se à seguir os resultados e análises dos cálculos de eficiência térmica dos motores selecionados para exemplificação dos resultados. Foram calculadas e analisadas as eficiências energéticas, exergéticas e, conforme o novo conceito desenvolvido de eficiência, a entransia. Nesta primeira análise se apresenta as eficiências para os dados registrados no momento da instalação e teste de desempenho para operação comercial.

5.3.1. Eficiência Energética - Motores à Gás - Usina X

Para calcular a eficiência energética dos motores da Usina X no momento da instalação (setembro de 2010), foram usados os dados do teste de desempenho, realizado na época e conduzido pelo fabricante para comprovar o rendimento de cada um dos motores em diferentes níveis de potência para a aceitação dos proprietários e início das operações.

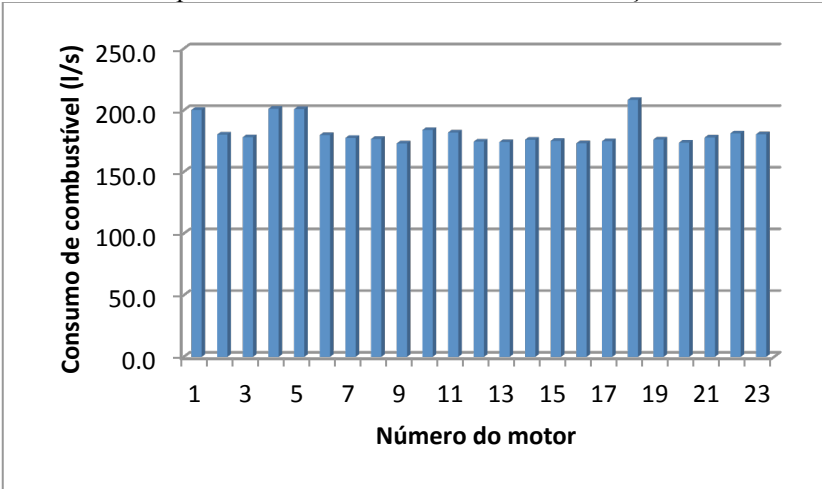
Na Tabela 5.5 do Anexo 2 são apresentados estes dados para a máxima potência dos motores.

Também foram obtidos os dados do poder calorífico inferior e da densidade do gás no período do teste. Utilizando esses valores e com o fluxo de combustível, foi calculado o valor do calor fornecido pelo combustível.

Tendo esses parâmetros, foi possível determinar a eficiência energética dos motores. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 5.6 do Anexo 3.

Na Figura 5.1 é apresentada uma comparação do consumo de combustível dos motores à gás no momento da instalação e na potência máxima de todos os motores à gás da Usina X.

Figura 5.1 - Comparação do consumo de combustível dos motores à gás da Usina X em potência máxima no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

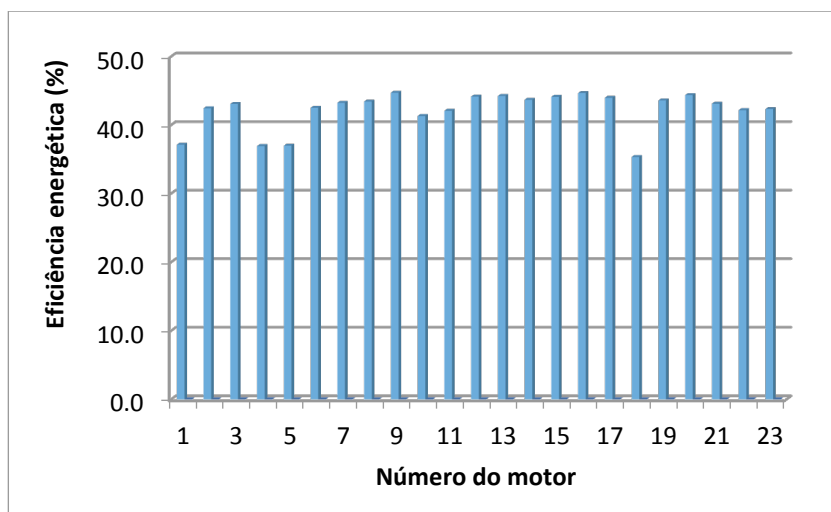
Da figura anterior pode se observar que, ainda sendo novos, os motores à gás da Usina X tinham diferentes valores de consumo de combustível para máxima potência.

Essa informação é muito valiosa para o gestor, porque diante de uma demanda de potência que não precise utilizar todos os motores, ele pode decidir usar os motores com menor consumo e mais eficientes.

Com o modelo matemático desenvolvido para o cálculo da eficiência energética, obtiveram-se os valores deste parâmetro para os motores da usina.

Na Figura 5.2 é apresentada uma comparação da eficiência energética dos motores à gás da Usina X no momento da instalação e na potência máxima.

Figura 5.2 - Comparação da eficiência energética dos motores à gás da Usina X em potência máxima no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

Neste caso pode-se observar que o motor 18 é o menos eficiente, o que está coerente com a comparação anterior (Figura 5.1), onde o mesmo apresenta ter comparativamente o maior consumo de combustível.

Como se pode observar, na Figura 5.2 acima, existe uma grande diferença de eficiência entre os motores no momento do teste de desempenho realizado na instalação. O motor de maior eficiência naquele momento era a Unidade 9, com 44,77% de eficiência, e a menor eficiência era a Unidade 18, com 35,39% de eficiência. Ao se comparar estes dados com os dados de consumo de combustível, percebe-se que estão coerentes e são inversamente proporcionais, como esperado.

5.3.2. Eficiência Energética - Motores à Gás - Usina Y

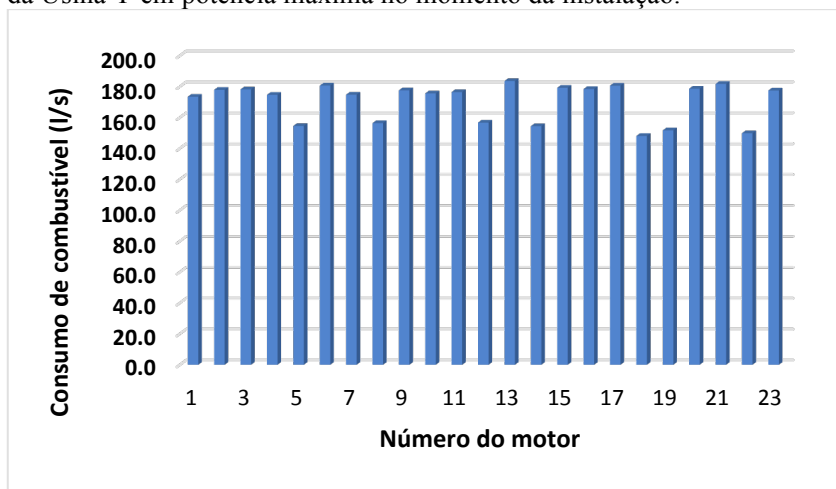
A eficiência energética dos motores à gás da Usina Y foi calculada de maneira análoga à Usina X no momento da instalação. Para calcular a eficiência no momento da instalação dos motores da usina (novembro de 2010) foram usados os dados do teste de desempenho realizado na época e conduzido pelo fabricante para comprovar o rendimento de cada um dos motores em diferentes níveis de potência

para a aceitação dos proprietários e início das operações. Nesta usina, por opção dos proprietários, a numeração sequencial das unidades geradoras inicia-se pelo número 02. Assim sendo, o primeiro motor (motor 01) corresponde com a unidade 2 e, assim, sucessivamente para os demais motores à gás.

Na tabela 5.7 do Anexo 4 são apresentados estes dados para a máxima potência dos motores.

Na Figura 5.3 é apresentada uma comparação do consumo de combustível dos motores à gás no momento da instalação e na potência máxima de todos os motores à gás da Usina Y.

Figura 5.3 - Comparação do consumo de combustível dos motores à gás da Usina Y em potência máxima no momento da instalação.

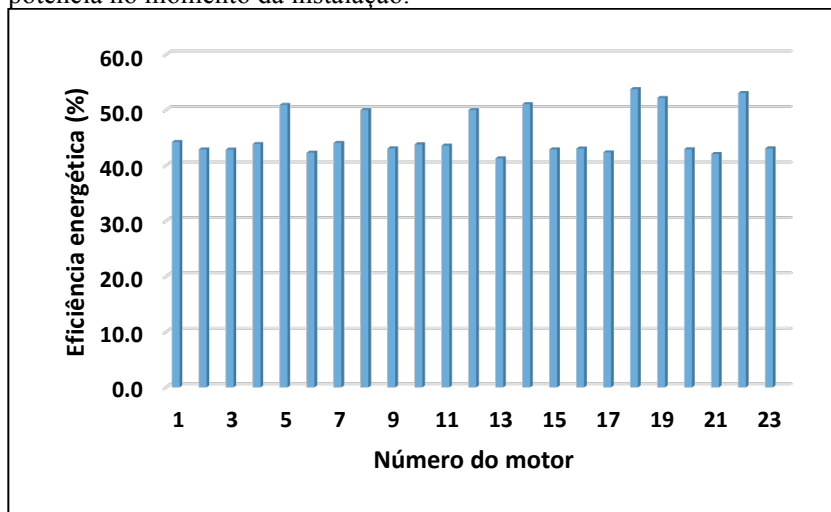


Fonte: Construção própria.

Verifica-se que os motores, mesmos sendo novos e recém instalados, utilizando o mesmo combustível e estando sujeitos basicamente as mesmas condições ambientais (temperatura e pressão), possuem variações significativas no consumo de combustível. Este fenômeno se dá devido a pequenos ajustes e regulagens a serem aperfeiçoados para uma operação contínua. De fato, os resultados jamais serão iguais, mas se torna fundamental ao gestor conhece-los para não apenas poder saber onde deve intervir e buscar melhorias, mas também poder optar por uma geração de menor custo e maior eficiência.

Na Figura 5.4 é apresentada uma comparação da eficiência energética dos motores à gás da Usina Y no momento da instalação e na potência máxima.

Figura 5.4 - Eficiência Energética dos motores da Usina Y a máxima potência no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

À partir da Figura 5.4 observa-se que a eficiência dos motores no momento da instalação varia significativamente e de forma inversamente proporcional ao consumo de combustível (Figura 5.3). Esse comportamento é análogo ao verificado na Usina X avaliada com este mesmo procedimento.

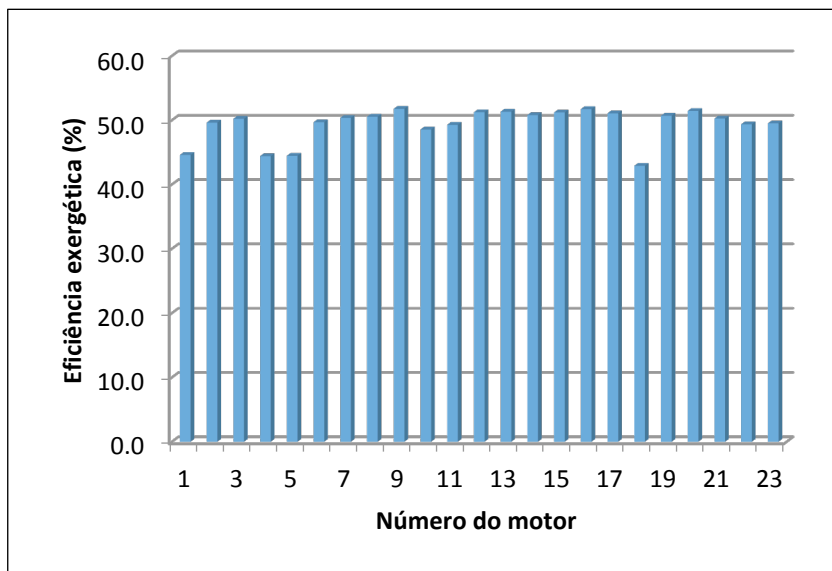
Essa consistência de resultados é positiva na avaliação do procedimento adotado nas verificações.

5.3.3. Eficiência Exergética - Motores à Gás - Usina X

Usando os mesmos procedimentos e critérios, só que com as expressões correspondente a eficiência exergética do modelo matemático apresentado no capítulo 4, foram calculadas estas eficiências para as duas usinas.

Na Figura 5.5 são apresentados os valores da eficiência Exergética no momento da instalação dos motores à gás da Usina X.

Figura 5.5 - Valores da eficiência Exergética dos motores à gás da Usina X a máxima potência no momento da instalação



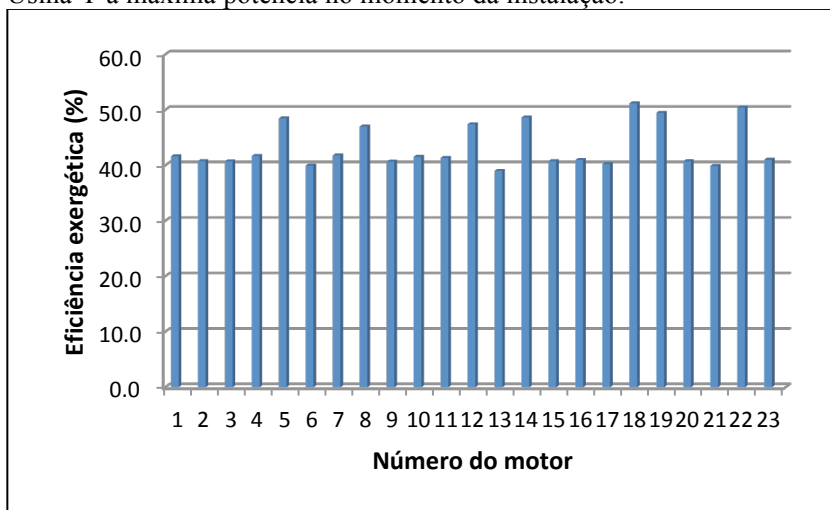
Fonte: Construção própria.

Como pode ser verificado, a distribuição das eficiências é similar ao caso da eficiência energética, só que os valores totais ligeiramente menores. Estes valores estão dentro do esperado e estão de acordo com a literatura. A análise exergética considera o valor de energia que se perde, a capacidade de se gerar trabalho e as perdas por entropia presentes em todos os processos espontâneos, conforme a segunda lei da termodinâmica e, por isso, tem valores menores que os calculados conforme a primeira lei (Eficiência Energética). O motor 18, como ocorrido no cálculo anterior, também é o de menor eficiência exergética.

5.3.4. Eficiência Exergética - Motores à Gás - Usina Y

Na Figura 5.6 são oferecidos os valores da eficiência Exergética no momento da instalação dos motores à gás da Usina Y.

Figura 5.6 - Valores da eficiência Exergética dos motores à gás da Usina Y a máxima potência no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

Na tabela 5.7 do Anexo 4, são apresentados os dados da Eficiência energética e exergética de todos os motores à gás da Usina Y no momento da instalação.

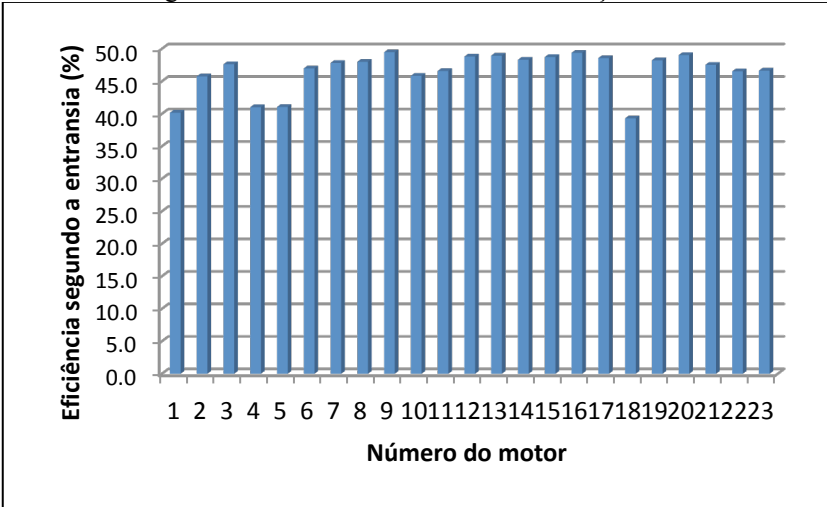
O comportamento e resultados verificados são semelhantes aos obtidos na Usina X, apresentados anteriormente. Essa similaridade de comportamento e repetitividade de eventos demonstram a consistência do trabalho e do procedimento empregado.

5.3.5. Eficiência conforme a Dissipação de Entrância - Motores à Gás - Usina X

Os conceitos de entrância e dissipação de entrância, na literatura revisada, não haviam sido até então aplicados para se avaliar a eficiência dos motores à combustão interna de uma usina termelétrica. Neste item, com o uso da formulação matemática desenvolvida no capítulo anterior, aplica-se essa nova teoria no cálculo da eficiência.

Na Figura 5.7 são apresentados os valores da eficiência dos motores à gás da Usina X no momento da instalação de acordo com os conceitos de Entrância.

Figura 5.7 - Valores da eficiência conforme os conceitos de Entransia dos motores à gás da Usina X no momento da instalação.



Fonte: Construção própria. (precisa melhorar os n. No eixo X, estão muito próximos)

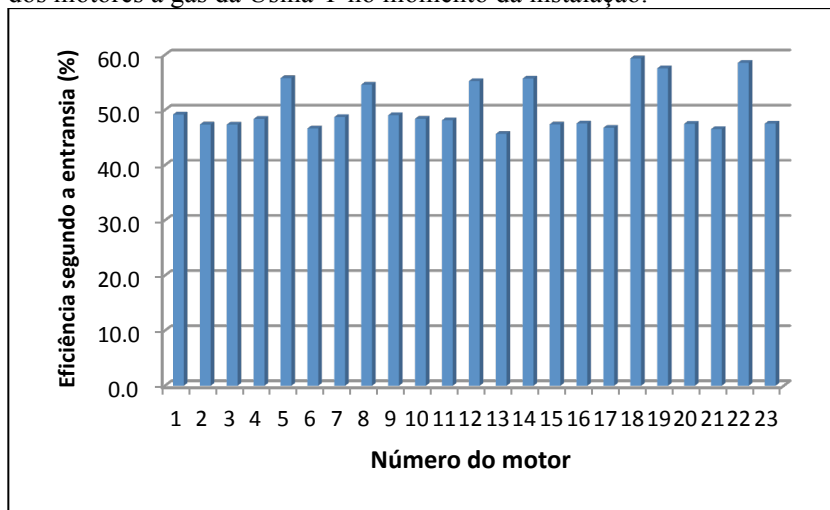
Verifica-se que os valores de eficiência calculados desta forma são maiores que o da literatura convencional – Energia e Exergia. Os valores de eficiência, segundo a Entransia, são maiores, porque a entransia avalia a capacidade do sistema para transferir calor, independentemente da possibilidade de produzir trabalho.

A capacidade de produzir trabalho é o que se chama de qualidade de energia, que é o valor considerado no caso da avaliação exergética. Assim sendo, os valores de eficiência segundo a Entransia não se traduzem da mesma forma que a eficiência nos conceitos anteriores, mas sim em uma forma de avaliar conjuntamente a capacidade de produzir trabalho e de transferir calor. Essa capacidade adicional de se transferir calor pode ser explorada na forma de aprimoramento das termoelétricas, utilizando-se, por exemplo, cogeração de energia.

5.3.6. Eficiência conforme a Dissipação de Entransia - Motores à Gás - Usina Y

Na Figura 5.8 são apresentados os valores da eficiência dos motores à gás da Usina Y no momento da instalação conforme aos conceitos de Entransia.

Figura 5.8 - Valores da eficiência conforme os conceitos de Entransia dos motores à gás da Usina Y no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

Verifica-se que os valores de eficiência, segundo a Entransia na Usina Y, assim como ocorreu na Usina X, são maiores que os valores calculados de eficiência energética e/ou exergética.

Essa informação passa a ser válida e relevante para os gestores de usinas termoeletricas na avaliação dos motores à combustão interna, à partir do momento em que se deseja utilizar o calor produzido na exaustão em outros processos de troca de calor.

Estes outros processos, quando se trata de termoeletricas, podem ser um processo de cogeração de energia utilizando-se, por exemplo, esta capacidade adicional de se transferir calor para gerar vapor, água gelada, ou outros.

5.3.7. Eficiência Energética e Exergética - Motores à HFO - Usina X

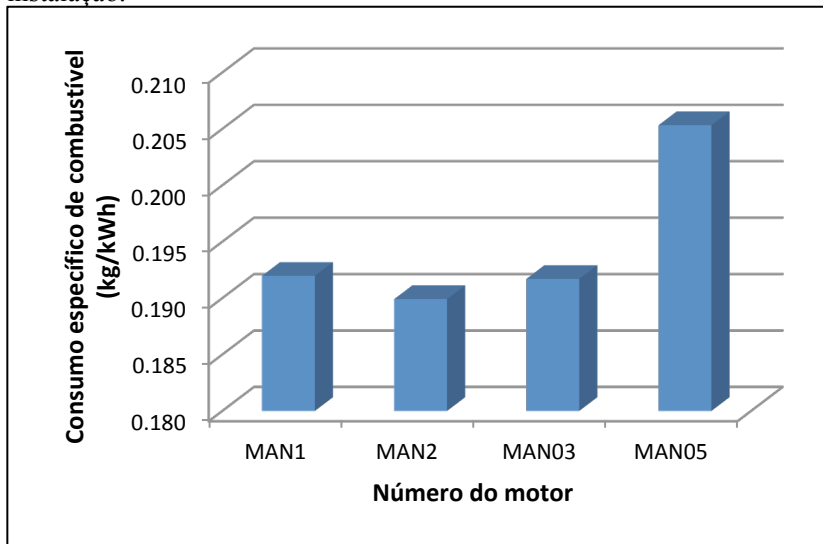
Com o objetivo de verificar os resultados do trabalho desenvolvido nesta tese em mais de uma tecnologia e situação, utilizou-se o mesmo procedimento e expressões desenvolvidas e aplicadas nas análises dos motores à gás natural para se determinar as eficiências dos motores movidos a óleo pesado ou HFO (Heavy Fuel Oil). Certamente por parte do procedimento envolver a determinação da energia presente no combustível, foram considerados apenas alguns parâmetros como o poder calorífico inferior do combustível (PCI ou LHV) e a densidade e temperatura do combustível para cálculo da exergia química do combustível (ef) e vazão de combustível. A eficiência energética dos motores a HFO da Usina X foi encontrada no momento da instalação. Para calcular a eficiência energética dos motores movidos a óleo combustível da Usina X no momento da instalação, foram usados os dados do teste de desempenho realizado e conduzido pelo fabricante para comprovar o rendimento de cada um dos motores em diferentes níveis de potência para a aceitação dos proprietários no início das operações. Também foram fornecidos os valores de poder calorífico inferior do combustível (PCI ou LHV) e densidade do combustível utilizado no momento dos testes. Utilizando estes valores e com a vazão de combustível, foi calculado o valor do calor fornecido pelo combustível.

Com o valor da exergia específica do combustível (HFO) e o fluxo de combustível pode ser calculada a eficiência exergética dos motores. As eficiências exergéticas são úteis como meio de distinção para a utilização de recursos energéticos, que são termodinamicamente efetivos daqueles que são menos. A eficiência exergética dos motores pode ser avaliada à partir da razão entre a potência de saída e a entrada de exergia do combustível. A eficiência energética e exergética dos motores das usinas foram apresentadas nas Tabelas 5.8 e 5.9 constantes dos anexos deste trabalho. Na tabela 5.8 do Anexo 5 são relacionados estes dados para as diferentes faixas de potência de operação dos motores. Na tabela 5.9 do Anexo 6 são apresentados estes mesmos dados para o motor MAN Bicombustível que é único em suas características técnicas e mais uma evidência de uso do procedimento aqui desenvolvido em diferentes tecnologias.

Do motor MAN 04 não localizaram-se os dados no momento da instalação e por isso não aparece nas avaliações realizadas. Na Figura 5.9 é apresentada uma avaliação do consumo de combustível dos motores a HFO no momento da instalação estando eles, para efeitos de

comparação de resultados, sempre ajustados para a potência máxima de saída.

Figura 5.9 - Comparação do consumo específico de combustível dos motores a HFO da Usina X a potência máxima no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

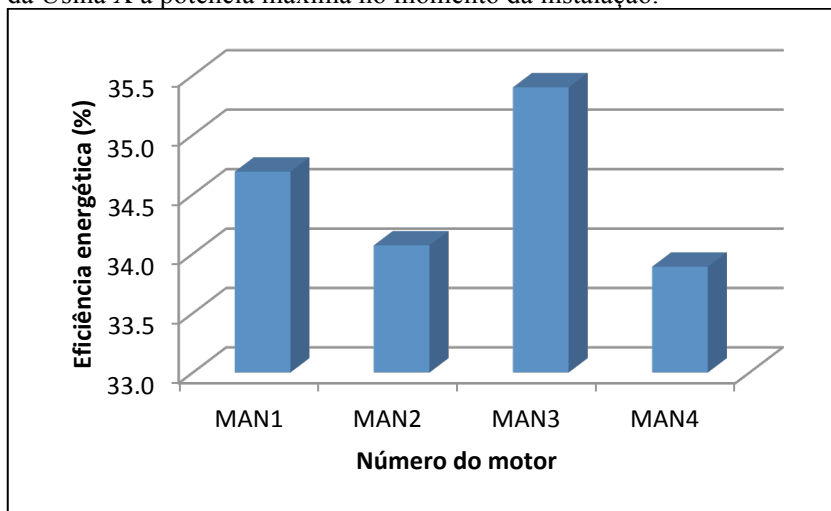
Verifica-se no resultado que o consumo de combustível do motor MAN 05 é cerca de 10% maior do que o motor de menor consumo. Essa diferença equivale a aproximadamente 0,02 kg/kWh, ou seja, 2,0 kg/MWh.

A razão desta diferença está associada a tecnologia empregada e ao fato deste motor possuir além da alimentação regular de óleo combustível uma alimentação adicional e paralela de óleo diesel que, quando o mesmo é operado a gás natural, serve como combustível piloto ou ignitor.

Na avaliação do consumo e das eficiências, este combustível piloto que possui diferentes características (poder calorífico inferior, densidade e vazão) foi considerado nos cálculos e corroborou para a diferença entre os resultados obtidos.

Na Figura 5.10 são apresentados os valores da eficiência dos motores a HFO da Usina X no momento da instalação, operando na máxima potência.

Figura 5.10 - Comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina X a potência máxima no momento da instalação.

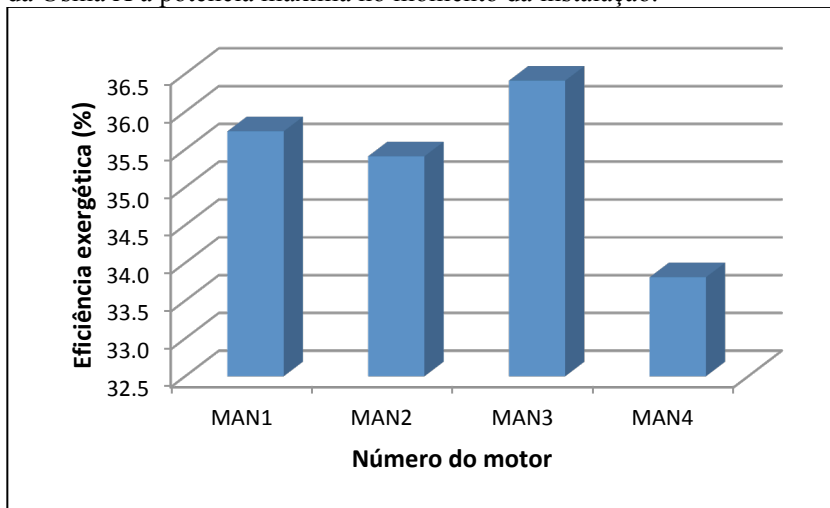


Fonte: Construção própria.

Como se pode observar da figura anterior não há uma grande diferença da eficiência dos motores no momento da instalação. A máquina de maior eficiência, nesse momento, era a Máquina 3, com uma eficiência maior do 35%, e a de menor eficiência era a Máquina 4, com um pouco mais do 33% de Eficiência.

Na Figura 5.11 é apresentada uma comparação da eficiência exergética dos motores a HFO da Usina X no momento da instalação deles, sempre considerando as unidades em sua máxima potência.

Figura 5.11 - Comparação da eficiência exergética dos motores a HFO da Usina X a potência máxima no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

Com a eficiência exergética acontece uma situação similar que com a eficiência energética. O motor mais eficiente é o motor 3 e o menos eficiente é o motor 4. A diferença de resultados é de 3%.

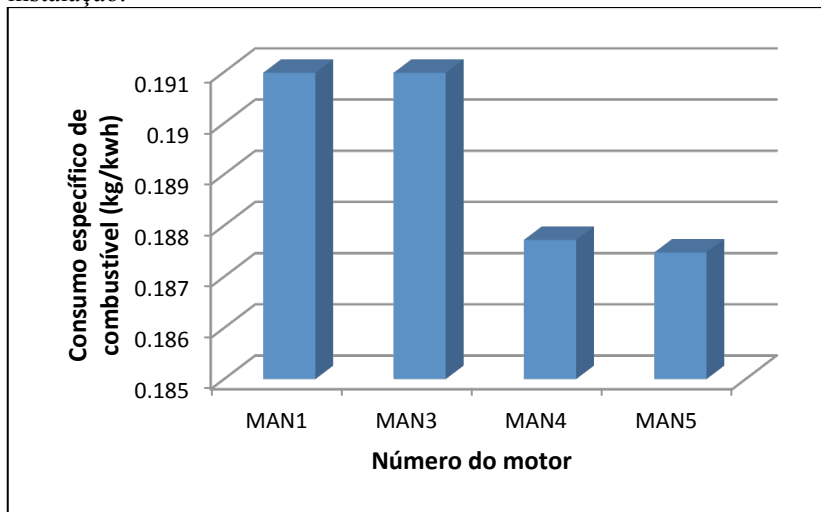
5.3.8. Eficiência Energética e Exergética - Motores à HFO - Usina Y

O procedimento e as expressões de cálculo para determinar as eficiências dos motores movidos a óleo pesado ou HFO (*Heavy Fuel Oil*) foram as mesmas utilizadas na Usina X. Na tabela 5.10 do Anexo 7 são apresentados estes dados para as diferentes potências dos motores.

Do motor MAN 02 não foram localizados os dados necessários e coletados no momento da instalação e por isso não aparece nas avaliações realizadas.

Na Figura 5.12 é apresentada uma comparação, para os motores movidos a HFO, do consumo específico de combustível no momento da instalação operando a plena carga, ou seja, potência máxima.

Figura 5.12 - Comparação do consumo específico de combustível dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.



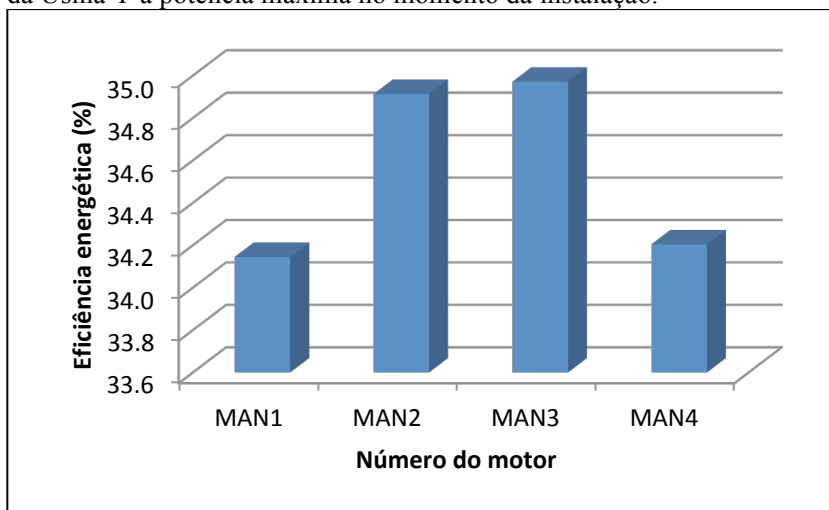
Fonte: Construção própria.

Apesar de graficamente parecer haver uma diferença expressiva de resultados, ao se modificar a escala ou olhar os resultados numéricos verifica-se que a diferença é da ordem de 0,0033 kg/kWh ou 0,33 kg/MWh.

Esta pequena variação pode ser explicada por diferenças de ajustes mecânicos e de erros de precisão dos instrumentos empregados nas medições de vazão. A escala do gráfico não foi modificada exatamente para poder verificar visualmente a diferença existente.

Na Figura 5.13 é apresentada uma comparação da eficiência energética dos motores à HFO no momento da instalação operando a potência máxima.

Figura 5.13 - Comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.

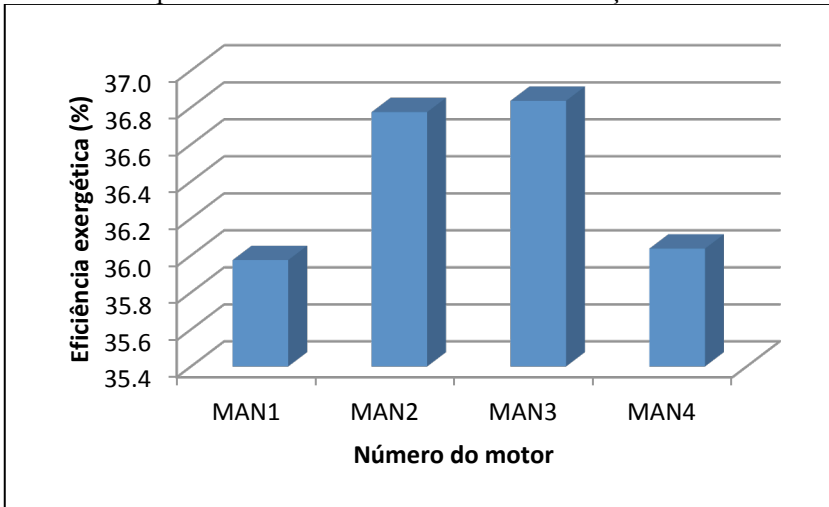


Fonte: Construção própria.

Como se pode verificar na Figura 5.13, tal como o ocorrido em relação ao consumo de combustível, não há uma grande diferença da eficiência dos motores no momento da instalação. A máquina de maior eficiência nesse momento era o Motor 3 com uma eficiência perto do 34,9% e a de menor eficiência era o Motor 1 com um pouco mais do 34,1% de Eficiência.

Na Figura 5.14 é apresentada uma comparação da eficiência exérgica dos motores à HFO da Usina Y no momento da instalação.

Figura 5.14 - Comparação da eficiência exerérgica dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima no momento da instalação.



Fonte: Construção própria.

De maneira semelhante ao que foi observado na Usina X, os valores de eficiência exerérgica, ao considerar apenas a energia capaz de produzir trabalho, são ligeiramente menores que os valores de eficiência energética.

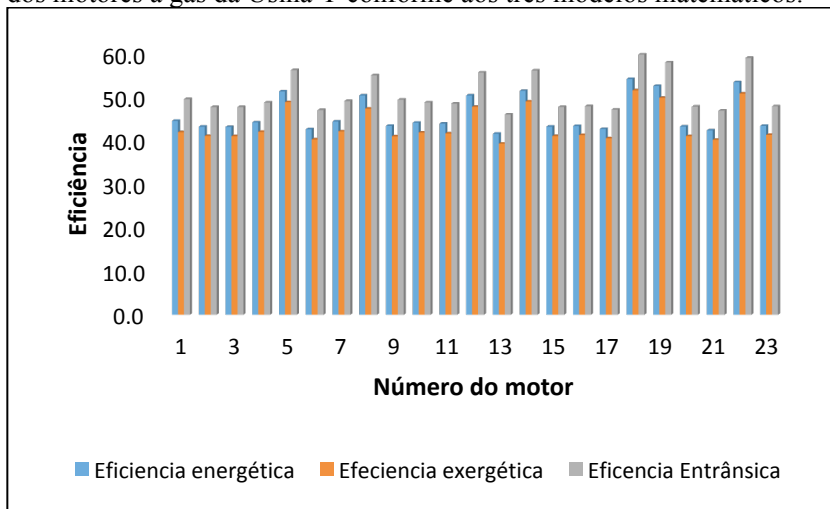
Na tabela 5.8 do Anexo 5 aparecem os dados das eficiências destes motores a HFO da Usina Y no momento da instalação.

5.4. EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS MOTORES DAS USINAS AVALIAÇÃO NOS MOMENTOS ATUAIS

5.4.1. Eficiência Energética, Exerérgica conforme a Entrância - Motores à Gás - Usina Y

Na Figura 5.15 se apresenta uma comparação entre os resultados do cálculo da eficiência dos motores à gás da Usina Y conforme os diferentes critérios de avaliação (energético, exerérgico e conforme a entrância).

Figura 5.15 - Comparação entre os resultados do cálculo da eficiência dos motores à gás da Usina Y conforme aos três modelos matemáticos.



Fonte: Construção própria.

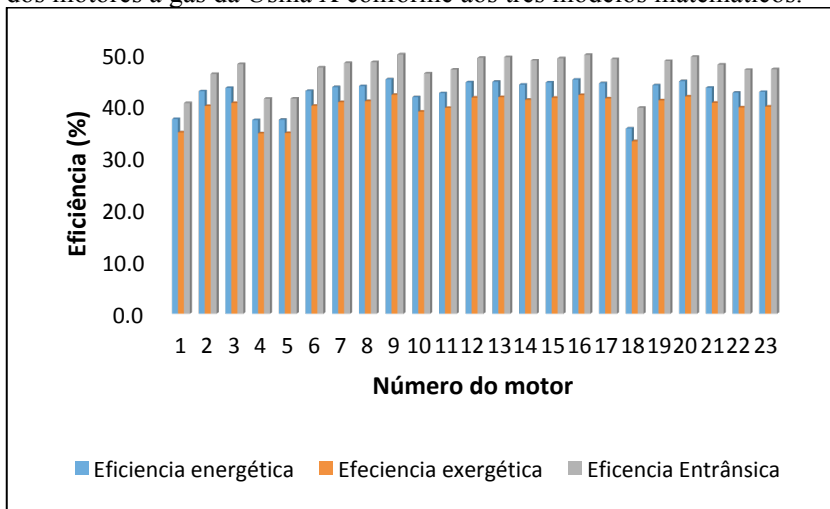
Da figura pode-se notar que os valores das eficiências dos três modelos desenvolvidos oferecem valores muito próximos entre si, o que demonstra a coerência do modelo desenvolvido conforme a teoria da entransia e sua aplicação para avaliar a eficiência dos motores de uma usina termelétrica.

Na tabela 5.11, do Anexo 8, são apresentados os dados da eficiência segundo os três procedimentos para todos os motores à gás da Usina Y no dias atuais.

5.4.2. Eficiência Energética, Exérgica conforme a Entransia - Motores à Gás - Usina X

Analogamente ao realizado para a Usina Y, na Figura 5.16 se apresenta uma comparação entre os resultados do cálculo da eficiência dos motores à gás da Usina X conforme os diferentes critérios de avaliação (energético, exérgico e conforme a entransia).

Figura 5.16 - Comparação entre os resultados do cálculo da eficiência dos motores à gás da Usina X conforme aos três modelos matemáticos.



Fonte: Construção própria

Da figura se pode verificar que, a exemplo do ocorrido na análise da Usina Y, os valores das eficiências dos três modelos desenvolvidos oferecem valores muito próximos entre eles, consolidando por repetitividade a validade do modelo desenvolvido conforme a teoria da entransia e sua aplicação para avaliar a eficiência dos motores de uma usina termelétrica.

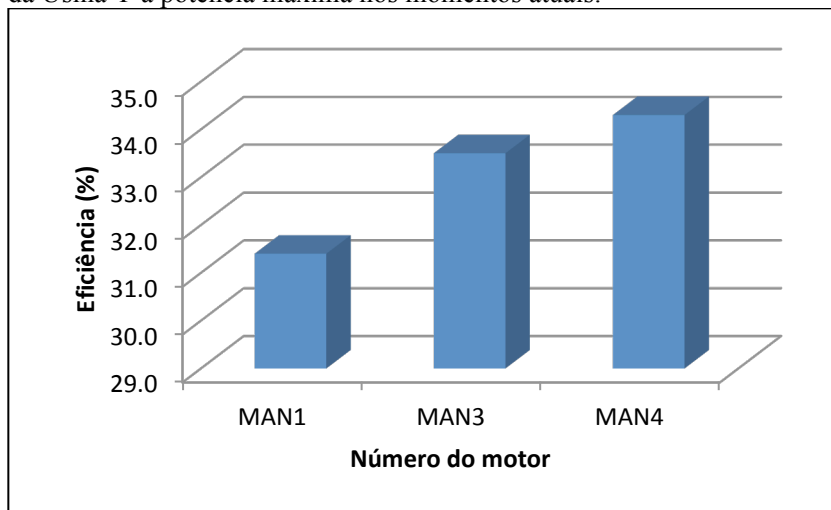
Na tabela 5.12 do Anexo 9 são apresentados os valores das eficiências para os 23 motores da usina.

5.4.3. Eficiência Energética e Exergética - Motores à HFO - Usina Y

O procedimento e as expressões de cálculo para determinar as eficiências dos motores nos momentos atuais foram os mesmos utilizados para com os dados obtidos da época dos testes de desempenho e aceitação dos equipamentos. Na tabela 5.13 do anexo 10 são mostrados os valores de eficiência energética e exergética para as diferentes potências de despacho/utilização de cada motor avaliado.

Na figura 5.17 é apresentada uma comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina Y nos momentos atuais a potência máxima.

Figura 5.17 - Comparação da eficiência energética dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima nos momentos atuais.

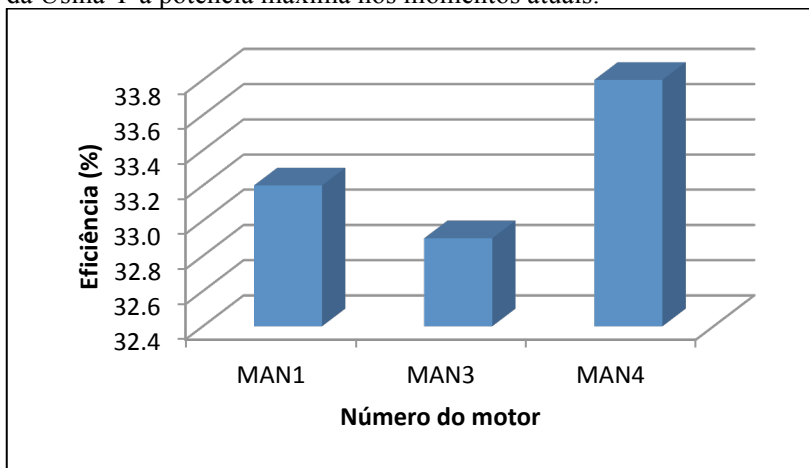


Fonte: Construção própria.

Como se pode observar no quadro anterior, não há grande diferença da eficiência dos motores no momento da instalação. A máquina de maior eficiência nesse momento era a Máquina 4, com eficiência perto a 35% e a de menor eficiência era a Máquina 1, com pouco mais de 34% de eficiência.

Na figura 5.18 é apresentada uma comparação da eficiência exérgica dos motores a HFO da Usina Y nos momentos atuais a potência máxima.

Figura 5.18 - Comparação da eficiência exergética dos motores a HFO da Usina Y a potência máxima nos momentos atuais.



Fonte: Construção própria.

Com a eficiência exergética acontece situação similar quando comparada a eficiência energética. O motor mais eficiente é o motor 4 e o menos eficiente é o motor 1, só que a diferença é perto de 2%.

Verifica-se que, como esperado, os motores sofreram uma degradação de performance com o tempo de utilização.

Com a degradação dos equipamentos por conta do desgaste mecânico e outros fatores, era de fato esperado se encontrar valores de eficiência menores em todas as análises.

A degradação dos equipamentos afeta tanto a eficiência do ponto de vista da primeira lei da termodinâmica (energética) quanto em consideração a segunda lei (exergética).

5.5. DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO ECOLÓGICA PELA FÓRMULA DE ANGULO-BROWN E A FÓRMULA DESENVOLVIDA NESTA TESE

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova "função ecológica" baseada na função de Angulo-Brown e tendo em conta os conceitos de Entrância de Guo e Liang (2007). Esta função foi aplicada à uma usina geradora de eletricidade com motores à combustão. Para comparar os resultados com as duas fórmulas, foram tomados como dados padrões os dados de um motor a gás natural Jenbacher 620 a diferentes valores da potência fornecida. Neste caso, o motor # 02 da usina avaliada (tabela 5.14 e Anexo 11).

Com os dados da tabela anterior, o valor do calor específico, as temperaturas e o fluxo dos gases de exaustão \dot{m}_{ex} que, segundo o catálogo do motor avaliado, é 17325 Kg/h e quando transformado para kg/s é igual a 4,8125 (kg/s), pode-se achar o fluxo de calor perdido nos gases de exaustão. Na tabela 5.15 do Anexo 12 são apresentados os valores do fluxo dos gases de exaustão, da energia dos gases de exaustão, a exergia específica dos gases de exaustão, da exergia dos gases de exaustão, da entrância dos gases de exaustão, da geração de entropia da Função ecológica de Ângulo-Brown e da Função ecológica proposta nesta tese.

O zero do eixo y, seria o ponto de equilíbrio a ser obtido em uma operação ideal. Na figura a seguir são observadas as funções de Angulo-Brown e a proposta nesta tese para os seguintes dados de funcionamento dos motores:

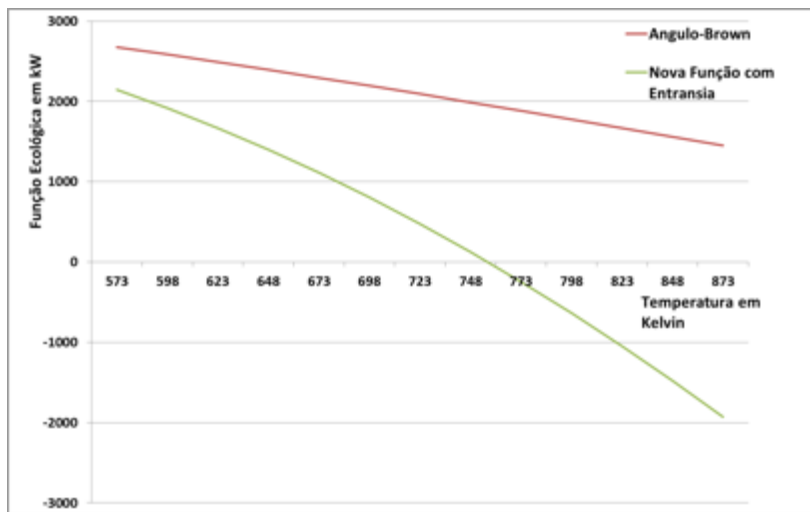
Potência fornecida: $P = 3293 \text{ kW}$

Taxa de fluxo da massa dos gases de exaustão $\dot{m}_{ex} 4,8125 \text{ (kg / s)}$

$T_{ex} = 857, 75^\circ\text{K}$

$T_{amb} = 312,19^\circ\text{K}$

Figura 5.19 - Comparação da função de Ângulo Brown e a função proposta nesta tese.



Fonte: Construção própria.

No eixo “x” ficam as temperaturas em K e no eixo “y” os valores da função ecológica em kW.

Do gráfico acima pode ser comprovado que para um dado motor, do ponto de vista ecológico e para uma determinada geração de potência, é importante que o fluxo dos gases de exaustão tenha a menor temperatura possível. Agora, em um processo de combustão que se deseja gerar o máximo de energia possível, percebe-se que estes dois aspectos são antagônicos.

O valor de E' negativo indica que o impacto ao meio ambiente é maior que a potência, ou energia fornecida. Na comparação das duas fórmulas se observa que a fórmula desenvolvida neste trabalho é mais restritiva e conservadora do que a originalmente existente.

Isto se deve ao fato da fórmula desenvolvida nesta tese considerar a dissipação de entropia e, por conseguinte, as temperaturas de entrada e saída dos gases no motor, dando maior relevância e impacto ao resultado a temperatura de saída e não dando ênfase a temperatura ambiente, como na fórmula proposta por Ângulo-Brown.

5.6. GESTÃO MULTIOBJETIVO DE UMA USINA GERADORA DE ELETRICIDADE CONSIDERANDO A DIMINUIÇÃO DO CUSTO E DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

A gestão de uma usina geradora de eletricidade é um assunto complexo e é uma das tarefas mais importantes em usinas produtoras de eletricidade. A gestão simples de usar os motores mais eficientes não pode ser considerada isolada devido a questões ambientais que surgem das emissões das usinas produtoras de eletricidade. O objetivo deste epígrafe é analisar uma nova solução de otimização EELD pela técnica do Non Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), incluindo desligar os geradores com maiores perdas. O método do custo incremental de combustível e perdas são utilizados para determinar os melhores parâmetros de potência ativa de cada unidade geradora, assegurando que a demanda e as perdas totais sejam iguais para a potência total gerada, mas minimizando o custo total do combustível e a emissão atmosférica. Para a solução deste problema foram usadas as equações do capítulo anterior. Para a apresentação foi usada uma bateria de 10 motores da Usina X, cujos dados aparecem na tabela 5.16.

Para realizar a gestão da usina se desenvolveu um procedimento computacional em MATLAB 2016, conforme todos os procedimentos e formulações desenvolvidas e apresentadas no capítulo 4. O procedimento computacional oferece ao gestor três possibilidades:

1. Fazer a gestão da usina conforme a eficiência dos motores e selecionar os motores mais eficientes para uma certa demanda de energia (gestão tradicional). Neste caso, pode-se usar a eficiência conforme a primeira, ou segunda lei da termodinâmica, inclusive usar a eficiência conforme os conceitos de entransia;
2. Fazer a gestão multiobjetivo da usina conforme os critérios de minimizar o custo e maximizar a Ecoeficiência (critérios antagônicos), ou;
3. Fazer a gestão multiobjetivo da usina conforme os critérios de minimizar o custo e minimizar as emissões totais (critérios antagônicos).

5.6.1. Gestão Termoecológica – custo e emissões atmosféricas

A otimização da variável custo conjuntamente com a variável emissões atmosféricas conduzem a uma das possibilidades de gestão termoecológica. Para poder minimizar o custo e, ao mesmo tempo, as emissões produzidas por uma usina geradora de eletricidade é

imprescindível ter uma serie de dados dos motores da usina. Entre eles a potência mínima e máxima de cada motor e os coeficientes de custo. Estes valores aparecem na tabela 5.16.

Para verificar a consistência dos resultados apresentados pelo procedimento computacional e as expressões nele contidas, foram selecionados os primeiros dez motores da Usina X e simulou-se uma demanda de energia (Potência) para estes 10 motores.

Tabela 5.16. Dados característicos dos geradores da usina avaliada.

<u>Gerador</u>	c_i (\$/MW ²)	b_i (\$/MW)	a_i (\$)	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)
PG1	0.007	7	240	0.66	3.35
PG2	0.0095	10	200	0.9	3.7
PG3	0.009	8.5	220	0.8	3.6
PG4	0.009	11	200	0.66	3.35
PG5	0.008	10.5	220	0.72	3.45
PG6	0.0075	12	120	0.66	2.97
PG7	0.0075	14	130	0.88	3.5
PG8	0.0075	14	130	0.754	3.33
PG9	0.0075	14	130	0.9	3.9
PG10	0.0075	14	130	0.56	2.35

Fonte: Construção própria.

Para determinar os coeficientes a_i , b_i e c_i , como foi dito no capítulo 3, foi realizado um experimento, onde se operou os motores da usina em diferentes faixas de operação, foram medidas as potências e o consumo de combustível.

Em seguida, foram traçadas as curvas de potência *versus* o custo de combustível e, por um método de regressão, foram obtidos os referidos coeficientes.

Outros dados necessários é a matriz de perda nos geradores. Na tabela 5.17, mostra-se a matriz de perdas dos 10 geradores (todos os valores devem se multiplicar por 1 e -2).

Tabela 5.17. Dados das perdas dos geradores da usina.

$$B_m = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.17 & 0.15 & 0.19 & 0.26 & 0.22 & 0.34 & 0.38 & 0.43 & 0.45 \\ 0.17 & 0.60 & 0.13 & 0.16 & 0.15 & 0.20 & 0.23 & 0.56 & 0.23 & 0.51 \\ 0.15 & 0.13 & 0.65 & 0.17 & 0.24 & 0.19 & 0.25 & 0.38 & 0.43 & 0.45 \\ 0.19 & 0.16 & 0.17 & 0.71 & 0.30 & 0.25 & 0.43 & 0.56 & 0.23 & 0.51 \\ 0.26 & 0.15 & 0.24 & 0.30 & 0.69 & 0.32 & 0.18 & 0.37 & 0.42 & 0.48 \\ 0.22 & 0.20 & 0.19 & 0.25 & 0.32 & 0.85 & 0.97 & 0.55 & 0.27 & 0.58 \\ 0.22 & 0.20 & 0.19 & 0.25 & 0.32 & 0.85 & 0.67 & 0.38 & 0.43 & 0.45 \\ 0.19 & 0.70 & 0.13 & 0.18 & 0.16 & 0.21 & 0.28 & 0.56 & 0.23 & 0.51 \\ 0.26 & 0.15 & 0.24 & 0.30 & 0.69 & 0.32 & 0.18 & 0.37 & 0.42 & 0.48 \\ 0.15 & 0.13 & 0.65 & 0.17 & 0.24 & 0.19 & 0.25 & 0.38 & 0.43 & 0.45 \end{bmatrix}$$

Fonte: Construção própria.

Na tabela 5.18 abaixo se observa os coeficientes “ f ”, “ e ” e “ d ” da equação de emissões a ser otimizada. Estes coeficientes foram obtidos do mesmo modo que os coeficientes “ a ”, “ b ” e “ c ” apresentados acima.

Tabela 5.18 Coeficientes f_i , e_i e d_i da equação de emissões a ser otimizada dos 10 geradores da usina termoeletrica.

Gerador	f_i (\$/MW ³)	e_i (\$/MW)	d_i (\$)
PG1	0.00419	1.32767	73.85932
PG2	0.00419	0.32767	13.85932
PG3	0.00683	-0.54551	40.2669
PG4	0.00683	-0.54551	40.2669
PG5	0.00461	-0.51116	42.89553
PG6	0.00461	-0.51116	42.8955
PG7	0.00461	-0.51116	42.8955
PG8	0.00461	-0.51116	42.8955
PG9	0.00061	-0.51116	10.8955
PG10	0.00461	-0.51116	42.8955

Fonte: Construção própria.

Para determinar os coeficientes f_i , e_i e d_i , foi realizado um experimento, onde se operou os motores da usina em diferentes faixas de operação e então medidas as temperaturas e vazões de gases de exaustão de cada motor. Em seguida, foram traçadas as curvas de emissões *versus* custo de combustível e, por um método de regressão, foram obtidos os referidos coeficientes. Na tabela 5.19 são apresentados os resultados finais depois de rodar o programa.

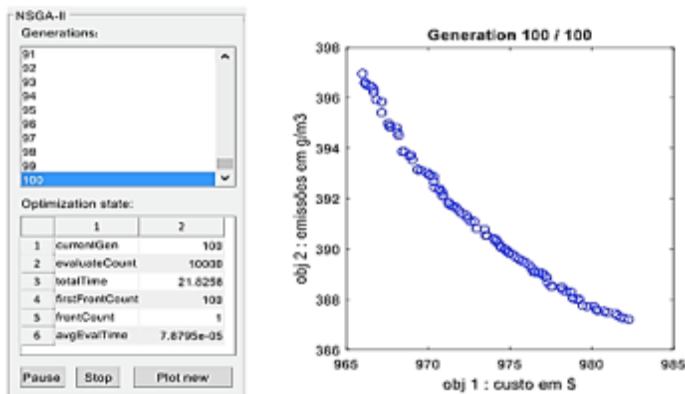
Tabela 5.19 Resultados da gestão econômica – ambiental.

Despacho Econômico Ambiental por NSGAII - SOLUÇÕES:											
Demanda de Potência: 20 MW											
Potência Mínima: 0.56 MW											
Potência Máxima: 3.9 MW											
Custo de Combustível: R\$ 974,12/ hora											
Potência de cada Motor em MW:											
Pm1	Pm2	Pm3	Pm4	Pm5	Pm6	Pm7	Pm8	Pm9	Pm10	P. Total	
2.63	1.57	2.49	1.86	1.60	1.83	1.60	2.29	2.34	1.85	20.06	
Emissões de cada Motor em g/m ³ :											
Em1	Em2	Em3	Em4	Em5	Em6	Em7	Em8	Em9	Em10	E. Total	
39.69	42.14	42.06	42.05	14.43	42.05	10.08	39.45	42.02	76.41	390.38	

Fonte: Construção própria.

Na figura 5.20 se observa graficamente os resultados da minimização do custo e das emissões e o caráter oposto de estas duas funções.

Figura 5.20 - Diagrama de Pareto com os resultados da minimização do custo e das emissões.

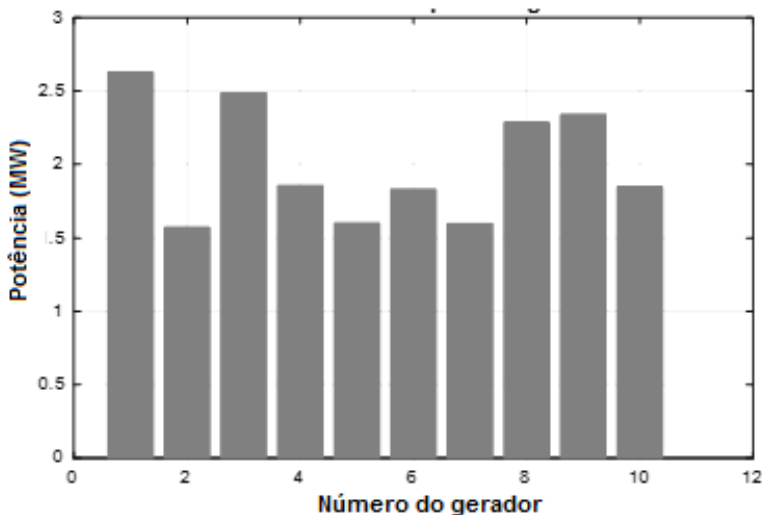


Fonte: Construção própria.

Da Figura 5.20 anterior, se observa que a diminuição das emissões implica em um aumento do custo considerável. O procedimento computacional providencia, além do gráfico da figura, os melhores resultados, como é mostrado nas figuras seguintes.

A Figura 5.21 apresenta graficamente as potências fornecidas por cada gerador e para ao despacho projetado (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.21 - Potências fornecidas por cada gerador para o despacho programado.

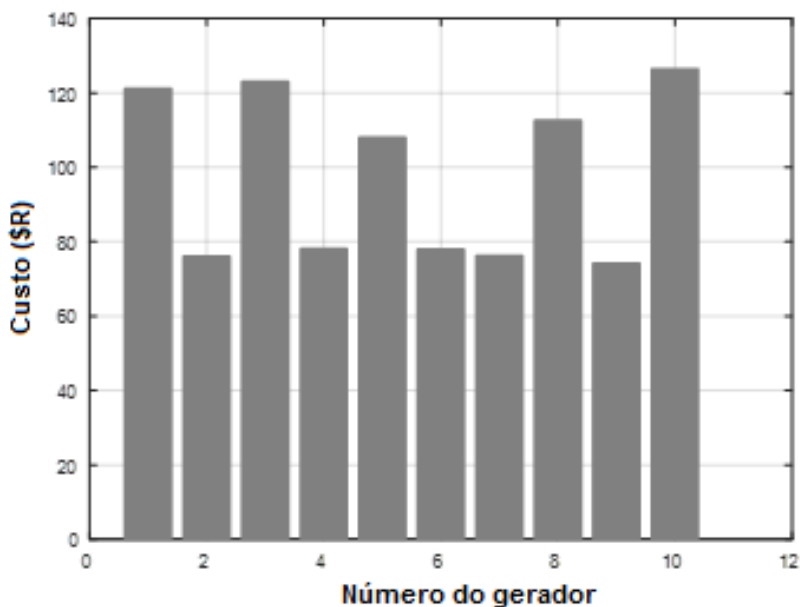


Fonte: MATLAB - Construção própria.

Como pode ser observado, o procedimento computacional informa a que potência cada motor deve ser operado para atingir o despacho programado, o que sem dúvidas é de grande utilidade para o gestor da usina.

Na Figura 5.22 a seguir se demonstra graficamente os custos que incorrem em cada gerador para satisfazer o despacho programado (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.22 - Custos que incorrem cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.

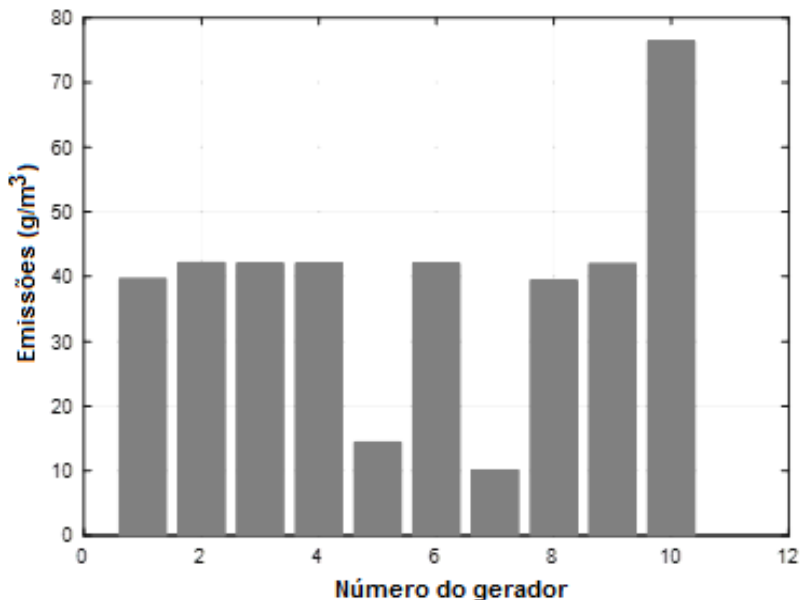


Fonte: MATLAB - Construção própria.

Como pode ser verificado no gráfico acima, o procedimento computacional, à partir dos dados de entrada e dos cálculos de eficiência e consumo de combustível, apresenta o custo de geração considerando apenas o custo de combustível para cada gerador.

Na Figura 5.23 se observa o resultado do ponto de vista ambiental e graficamente apresenta-se o índice de emissões totais provocadas por cada gerador para a demanda/despacho de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.23 - Emissões provocadas por cada gerador para a demanda de potência programada.



Fonte: MATLAB - Construção própria.

Neste exemplo, pode-se observar que existem motores que podem gerar muito mais emissões atmosféricas do que outros que, por conta de ajustes mecânicos, níveis de desgaste e condições de uso tem previsto um resultado de índice de emissões atmosféricas muito menor.

Ao se avaliar todos os resultados fornecidos conjuntamente, é possível verificar qual seria a melhor seleção de equipamentos para atender ao despacho solicitado.

Sabendo que o valor do prejuízo causado pelas emissões não está sendo mensurado, mas sabendo que são emissões consideradas nocivas e que devem ser reduzidas e evitadas, o gestor pode - com base nos volumes relativos ao índice de emissões em conjunto com o custo de geração associado ao consumo de combustível - optar por operar aqueles que possibilitam uma economia do ponto de vista financeiro, bem como aqueles que não exatamente maximizam as economias, mas

também encontram-se em um nível mais desejado de emissões, por exemplo os motores 06 e 09 dos exemplos apresentado acima. Lembrando que o índice de emissões tende a aumentar conforme maior a queima de combustível.

Outro fato relevante e benéfico ao gestor é que em se tratando de uma análise dentro de um mesmo tipo de tecnologia de geração, tais informações e valores servem como referência em planos e programação de manutenção e ajustes a serem realizados pela engenharia da usina.

5.7. MEDIÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA

As medições relativas da Ecoeficiência expressam as contribuições corporativas para a sustentabilidade como benefícios por unidade de impacto ambiental. Hoje, há dois usos diferentes do termo Ecoeficiência.

Como postulado, a Ecoeficiência se refere à redução, ou minimização, do impacto ambiental (DESIMONE; POPOFF, 2000; BENN *et al.*, 2014). O segundo conceito utiliza o termo Ecoeficiência para descrever a relação do valor criado entre o impacto ambiental adicionado e o valor monetário acrescido. Então, o valor mensurável da Ecoeficiência (EEf) pode ser calculado pela seguinte expressão (SCHALTEGGER; STURM, 1990):

$$Ecoeficiência = \frac{\text{Valor monetario adicionado}}{\text{Impacto ambiental adicionado}} \quad (5.1)$$

Aqui o valor agregado de uma empresa é definido como o valor residual que permanece após o volume de negócios ter sido reduzido pelo custo de bens e serviços adquiridos pela empresa.

O impacto ambiental adicionado representa a soma de todos os fluxos de energia e materiais em consideração, induzidos pela atividade econômica ponderada e pela sua nocividade em relação ao meio ambiente. Esta agregação é feita através da classificação de todas as emissões de acordo com as suas contribuições para diferentes problemas ambientais que são, então, ponderadas por sua nocividade relativa (HEIJUNGS *et al.*, 1992).

Para verificar a consistência dos resultados apresentados pelo procedimento computacional e Ecoeficiência com o procedimento desenvolvido, foram realizadas simulações utilizando 10 motores da

Usina X (tabela 5.13) e 10 motores de uma usina virtualmente criada (tabela 5.20).

Tabela 5.20. Dados característicos dos geradores da usina virtual.

Gerador	c_i (\$/MW ²)	b_i (\$/MW)	a_i (\$)	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)
PG1	0.15247	38.53	756.7	35	125
PG2	0.10587	46.15	451.3	35	125
PG3	0.02803	40.39	1049.9	35	125
PG4	0.03546	38.30	1243.11	35	125
PG5	0.02111	36.32	1658.55	35	125
PG6	0.01799	38.27	1356.65	35	125
PG7	0.02682	45.27	1260.65	35	125
PG8	0.02700	46.32	1266.65	35	125
PG9	0.02754	47.23	1287.6592	35	125
PG10	0.02799	48.17	1290.6592	35	125

Fonte: Construção própria.

Foram utilizados os algoritmos genéticos (NSGAI) para otimizar os custos e a ecoeficiência. A seguir os dados e os resultados da ecoeficiência:

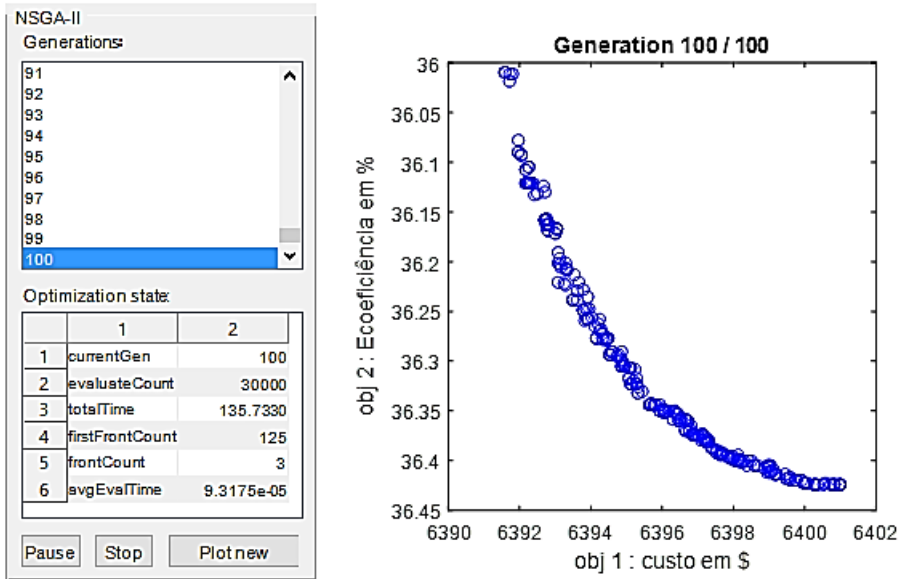
5.7.1. Gestão Termoecológica – custos e ecoeficiência

Foi utilizado o NSGAI implementado no MATLAB para fazer a otimização multicriterial de uma das possíveis formas de gestão termoecológica de uma usina termoelétrica. Neste item apresenta-se os resultados da otimização considerando as variáveis custos e ecoeficiência. Na ferramenta de otimização do MATLAB foi aplicado uma população de 100 indivíduos e 100 gerações.

A figura 5.24 do diagrama de Pareto representa os custos vs a geração. Da figura, pode-se observar um pequeno aumento na ecoeficiência de 0,45% e implica em um aumento do custo consideravelmente maior.

O procedimento computacional providencia, além do gráfico de correlação para a geração apresentado na figura 5.24 a seguir, os melhores resultados, como são apresentados nas figuras seguintes.

Figura 5.24 - Diagrama de Pareto com os resultados da minimização do custo e da ecoeficiência.

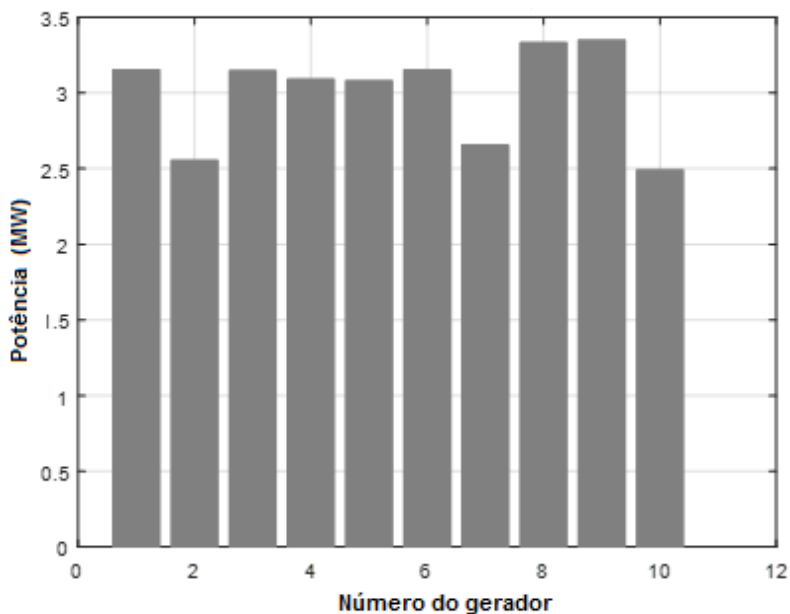


Fonte: MATLAB - Construção própria.

O programa mostra que ao se buscar aumentar a eco-eficiência, é esperado também um aumento no custo de geração. Isso pode claramente ser percebido ao avaliar o comportamento da curva da Figura 5.26 acima.

A Figura 5.25 apresenta, tal como no primeiro exemplo, graficamente as potências fornecidas por cada gerador e para ao despacho projetado (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.25 - Potências fornecidas por cada gerador para atender ao despacho programado.

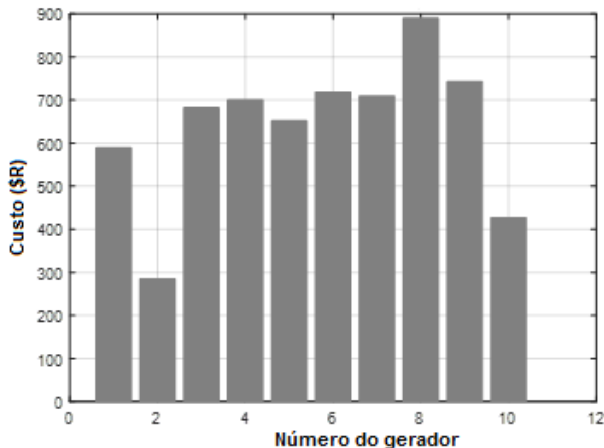


Fonte: MATLAB - Construção própria.

Este resultado de relação motor vs potência despachada, é a melhor solução apresentada pelo procedimento computacional para que o gestor da usina atenda a demanda de potência projetada com o foco otimizado e adoção de uma solução de compromisso entre o custo e a Ecoeficiência.

Tal como no exemplo anterior e mostrando a consistência das avaliações, a Figura 5.26 representa graficamente os custos que incorre a cada gerador para satisfazer o despacho programado (este gráfico também é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

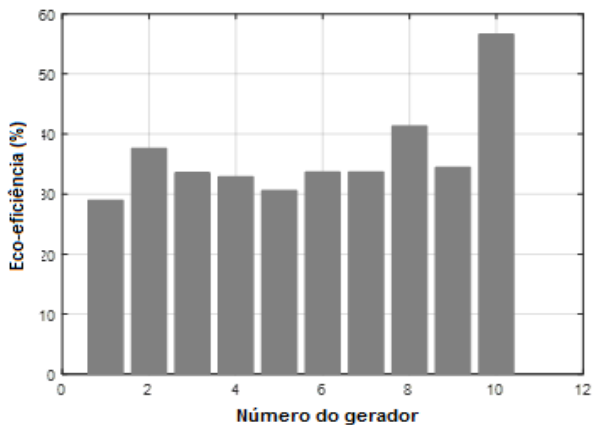
Figura 5.26 - Custos que incorrem cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.



Fonte: MATLAB - Construção própria.

Na figura 5.27 se demonstra graficamente os valores da Ecoeficiência de cada gerador para a demanda de potência solicitada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.27 - Valores da ecoeficiência de cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.



Fonte: MATLAB - Construção própria.

É importante destacar que a Ecoeficiência é um conceito mais importante e abrangente que o custo. Por exemplo, para este estudo, o motor 2 é o mais barato, mas não é o mais ecoeficiente. Esses resultados permitem ao usuário gestor da usina saber, em todo momento, o que está acontecendo na usina e como se está comportando cada motor. Na tabela 5.21 se observa os resultados finais depois de rodar o programa.

Tabela 5.21. Resultados de otimização multicriterial conforme os custos e a ecoeficiência.

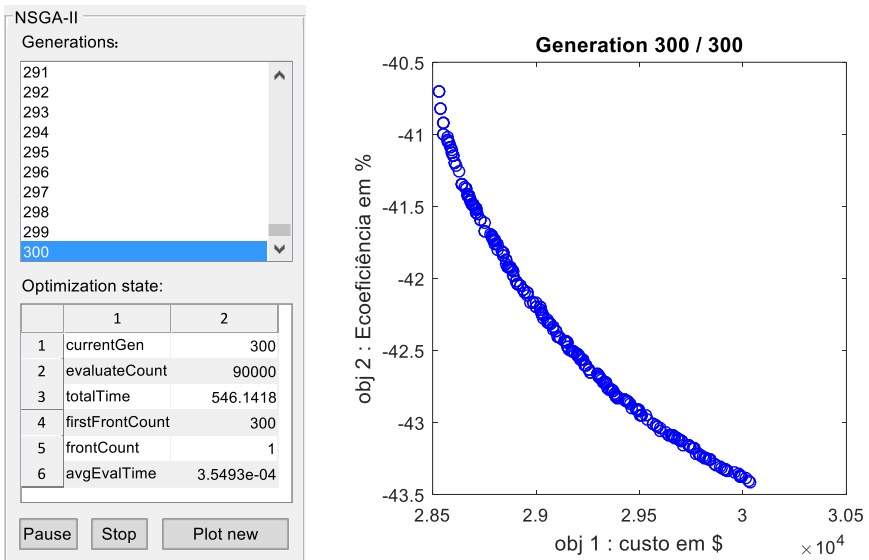
Despacho Econômico Ambiental (Eco-eficiência) por NSGAI - SOLUÇÕES:										
Demanda de Potência: 30 MW										
Potência Mínima: 0.8 MW										
Potência Máxima: 3.35 MW										
Custo de Combustível: 6395,33 reais cada hora										
Potência de cada Motor em MW:										
Pm1	Pm2	Pm3	Pm4	Pm5	Pm6	Pm7	Pm8	Pm9	Pm10	P Tot
3.15	2.55	3.15	3.09	3.08	3.15	2.65	3.33	3.35	2.49	30
Eco-eficiência de cada Motor em %										
Eco1	Eco 2	Eco 3	Eco 4	Eco 5	Eco 6	Eco 7	Eco 8	Eco 9	Eco 10	Eco. Tot
28.95	37.61	33.56	32.87	30.59	33.64	33.67	41.31	34.43	56.62	36.33

Fonte: MATLAB - Construção própria.

5.7.2. Gestão Termoecológica da usina virtual levando em conta a ecoeficiência e os custos

Foi utilizado o NSGAI implementado no MATLAB para fazer a otimização multicriterial da gestão da usina virtual. Neste caso, foi aplicado uma população de 300 indivíduos e 300 gerações. A figura 5.30 se observa o diagrama de Pareto dos custos vs a geração. Da figura, pode-se observar que um pequeno aumento na ecoeficiência de 3%, culminando em um considerável aumento do custo. O procedimento computacional providencia, além do gráfico da figura, os melhores resultados, como é mostrado nas figuras seguintes.

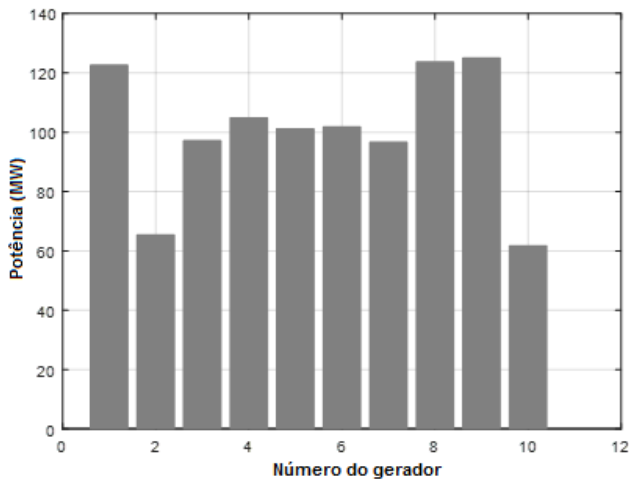
Figura 5.28 - Diagrama de Pareto com os resultados da minimização do custo e da ecoeficiência para a usina termelétrica virtual.



Fonte: MATLAB - Construção própria.

Na figura 5.29 se constata graficamente as potências fornecidas por cada gerador para satisfazer a demanda dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido). Estes resultados são a melhor solução apresentada pelo procedimento computacional e o gestor da planta colocar os motores a trabalhar para satisfazer a demanda de potência, sabendo que essa é a melhor solução de compromisso entre o custo e a ecoeficiência. Como se pode observar, os resultados são bastante diferentes do estudo anterior, já que o gerenciamento de uma usina termelétrica depende muito das características dos motores e da demanda de potência.

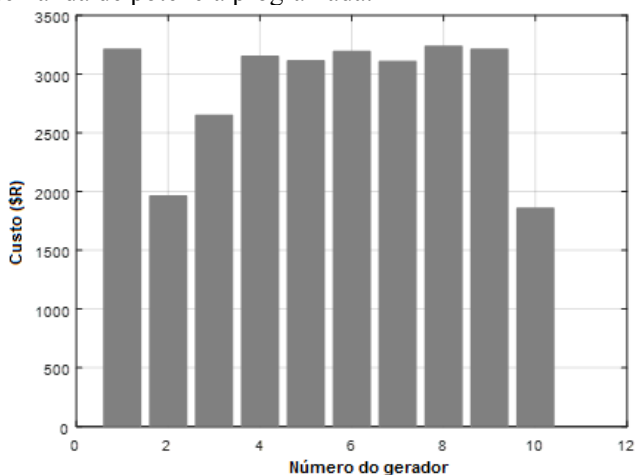
Figura 5.29 - Potencias fornecidas por cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.



Fonte: MATLAB - Construção própria.

Na figura 5.30 se representa graficamente os custos que incorre de cada gerador para satisfazer a demanda dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.30 - Custos que incorre de cada gerador para satisfazer a demanda de potência programada.

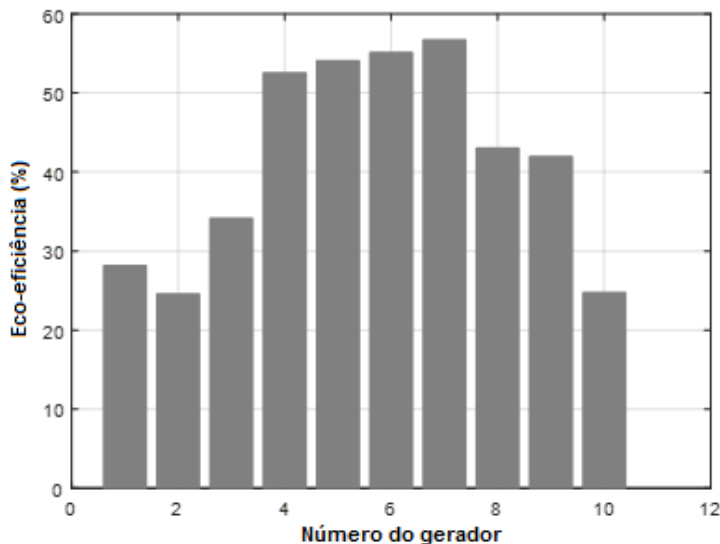


Fonte: MATLAB - Construção própria.

Na figura 5.31 se representa graficamente os valores da Ecoeficiência de cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido). Aqui se reitera que a eco-eficiencia é um conceito mais importante e englobador que o custo.

Por exemplo, para este caso o motor 2 é o mais barato, contudo não mais eco-eficiente. Esses resultados permitem ao usuário gestor da usina saber em todo momento o que está acontecendo na usina e como se está comportando cada motor.

Figura 5.31 - Valores da Ecoeficiência de cada gerador para a demanda de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).



Fonte: MATLAB - Construção própria.

Os valores da Ecoeficiência variam entre 25% e 58%, variando significativamente entre os motores da usina. Se o gestor da usina optar priorizar a melhor Ecoeficiência, não irá usar o gerador 7, caso a demanda de potência e disponibilidade de geração dos demais motores o permita.

Na tabela 5.22 se demonstra os resultados finais depois de rodar o programa para este caso.

Tabela 5.22. Resultados de otimização multicriterial da usina termoeétrica virtual conforme os custos e a ecoeficiência.

Despacho Econômico Ambiental (ecoefficiência) por NSGAI - SOLUÇÕES:										
Demanda de Potência: 1000 MW										
Potência Mínima: 35 MW										
Potência Máxima: 125 MW										
Custo de Combustível: 28695.64 reais cada hora										
Potência de cada Motor em MW:										
Pm1	Pm2	Pm3	Pm4	Pm5	Pm6	Pm7	Pm8	Pm9	Pm10	P. Total
122.60	65.43	97.14	104.89	101.19	101.81	96.63	123.66	125.00	61.73	1000
ecoefficiência de cada Motor em %										
Eco1	Eco 2	Eco 3	Eco 4	Eco 5	Eco 6	Eco 7	Eco 8	Eco 9	Eco10	Eco. Total
28.16	24.57	34.15	52.54	54.07	55.09	56.70	43.00	41.94	24.75	41.50

Fonte: Construção própria.

5.7.3. Gestão da usina Y com todos os motores, e considerando a possibilidade de desligar os motores menos eficientes

Na hora de realizar a gestão da usina, o gestor tem a possibilidade, se a demanda é menor que as possibilidades de geração, de colocar para funcionar apenas os motores mais eficientes.

Ele pode fazer uso dos cálculos desenvolvidos previamente em Excel e fazer a escolha conforme aos resultados da eficiência energética,

exergética ou entrânsica, mas também tem a possibilidade de usar o procedimento computacional desenvolvido em MATLAB, ou seja, o procedimento computacional desenvolvido baseado nos modelos matemáticos do capítulo 4 tem essa possibilidade.

A seguir se oferecem os resultados obtidos para uma demanda de 60 MW na usina de caso, sem desligar os motores menos eficientes e desligando eles. Neste caso foram consideradas duas funções objetivo, o custo e o índice de emissões, também foram considerados os 23 motores da usina.

5.7.3.1. Gestão da usina Y sem desligar os motores menos eficientes

Na tabela 5.23 se oferecem os resultados obtidos para uma demanda de potência de 60 MW sem desligar os motores da usina, ou seja, distribuindo a potência entre todos os motores.

Da tabela pode-se observar que o custo total de geração para essa demanda é de R\$4.116,49/h e as emissões totais são de 28.227,93 g/m³ por hora.

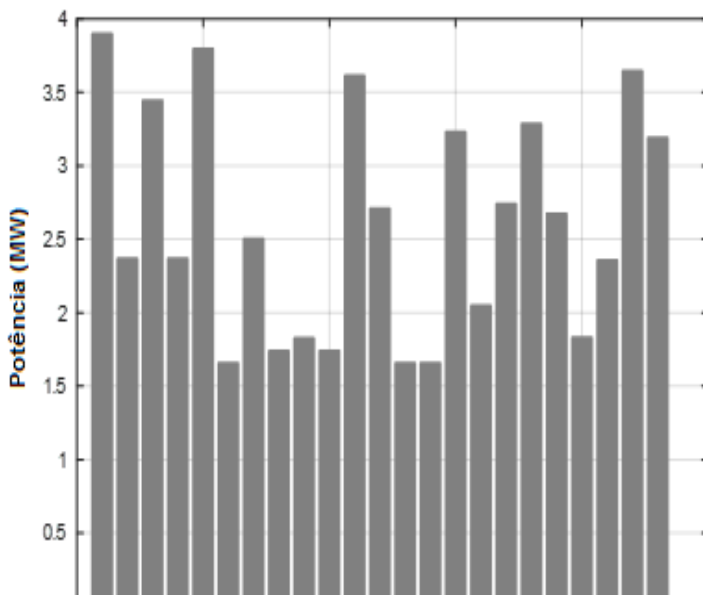
Tabela 5.23. Resultados da gestão econômica – ambiental de todos os motores da Usina Y sem desligar os motores menos eficientes

Despacho Econômico Ambiental por NSGAIL – SOLUÇÕES Sem desligar os motores menos eficientes:																						
Demanda de Potência: 60 mW																						
Potência Mínima: 1,66 mW																						
Potência Máxima: 3,93 mW																						
Custo Total de Combustível em reais cada hora = 4116,49																						
Emissões Totais em g/m ³ = 28227,93																						
Potência de cada Motor em mW:																						
Pm1	Pm2	Pm3	Pm4	Pm5	Pm6	Pm7	Pm8	Pm9	Pm10	Pm11	Pm12	Pm13	Pm14	Pm15	Pm16	Pm17	Pm18	Pm19	Pm20	Pm21		
3.90	2.37	3.45	2.37	3.80	1.66	2.51	1.74	1.83	1.74	3.61	2.71	1.66	1.66	3.23	2.05	2.74	3.29	2.68	1.83	2.36		
Emissões de cada Motor em g/m ³ :																						
Em1	Em2	Em3	Em4	Em5	Em6	Em7	Em8	Em9	Em10	Em11	Em12	Em13	Em14	Em15	Em16	Em17	Em18	Em19	Em20	Em21		
909.2	848.8	611.6	561.3	1203.6	1370.7	1151.2	1374.6	1343.4	1347.4	897.9	1392.3	1366.1	1366.1	1776.1	546.3	1758.3	1369.4	1345.8	1343.7	1367.5		

Fonte: MATLAB - Construção própria.

Na Figura 5.32 se oferecem os valores da potência fornecida por cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.32 - Valores da Potência fornecida por cada gerador para atender a demanda de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).



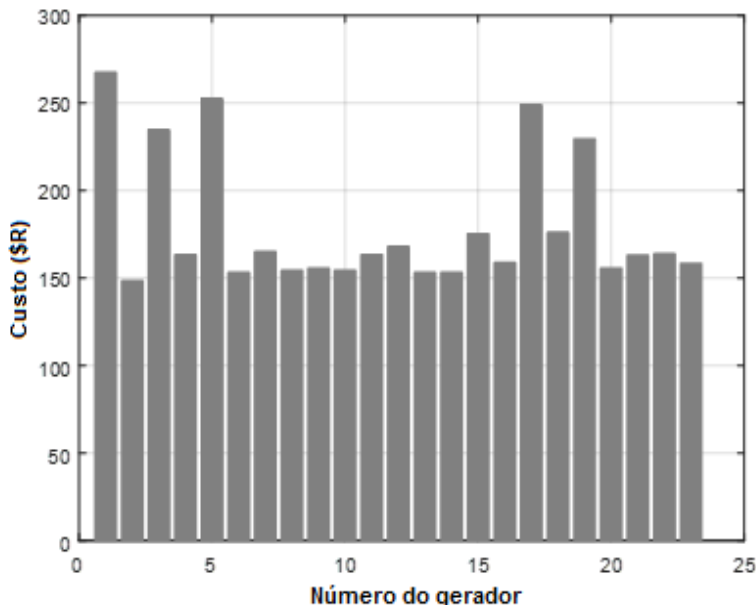
Fonte: MATLAB - Construção própria.

Da figura pode-se perceber que a potência é distribuída entre todos os geradores e existe um desbalanceamento entre eles.

Na figura 5.33 mostram-se os valores do custo de cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Com esses resultados o gestor pode saber onde estão os maiores custos da geração.

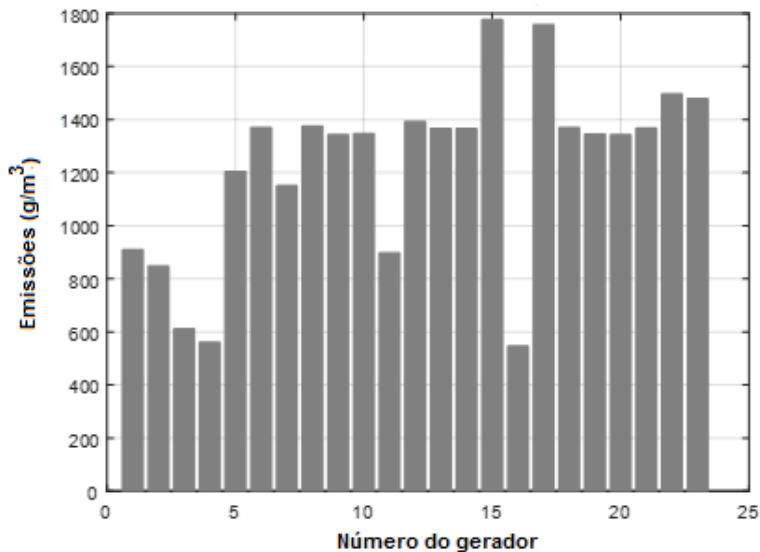
Figura 5.33 - Valores do custo de cada gerador para atender a demanda de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).



Fonte: MATLAB - Construção própria

Na figura 5.34, mostram-se os valores do Índice de Emissões de cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido). Esse gráfico permite ao gestor conhecer quais são os motores que mais estão poluindo na atmosfera.

Figura 5.34 - Valores do Índice de Emissões de cada gerador para a demanda de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).



Fonte: MATLAB - Construção própria

5.7.3.2. Gestão da usina Y desligando os motores menos eficientes

Na tabela 5.24 se oferecem os resultados obtidos para uma demanda de potência de 60 MW desligando os motores da usina, ou seja, distribuindo a potência entre os motores mais eficientes. Da tabela pode-se observar que o custo total de geração para essa demanda é de R\$3.092,15/h, e as emissões totais são de 18.966,8 g/m³ por hora. Se comparar estes resultados com os resultados sem desligar os motores, pode-se observar que se tem uma economia de R\$1.024,34/h (24,8%) e uma diminuição das emissões de 9.261,13 g/m³ por hora (32,8%), isto dá uma ideia dos ganhos termoecológicos da usina.

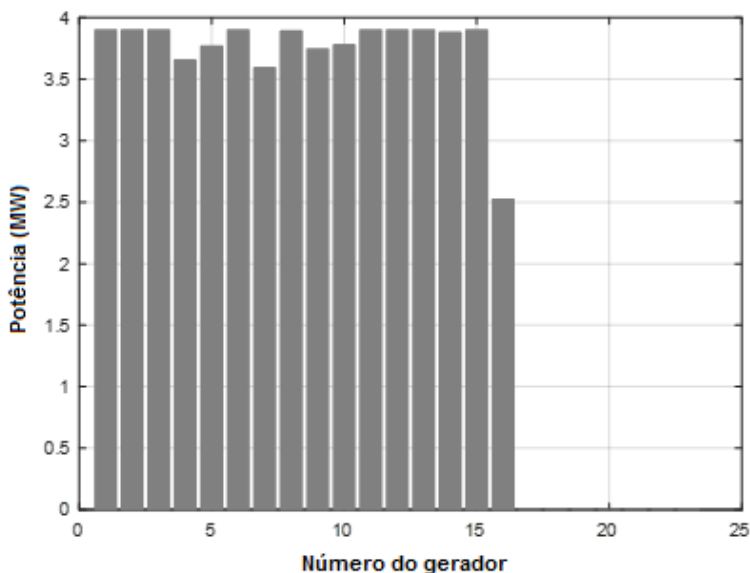
Tabela 5.24. Resultados da gestão econômica – ambiental de todos os motores da Usina desligando os motores menos eficientes.

Despacho Econômico Ambiental por NSGAIL – SOLUÇÕES Desligando os motores menos eficientes:																						
Demanda de Potência: 60 mW																						
Potência Mínima: 1,66 MW																						
Potência Máxima: 3,93 MW																						
Custo Total de Combustível em reais cada hora = 3092,15																						
Emissões Totais em $g/m^3 = 18966.82$																						
Potência de cada Motor em MW:																						
Pm1	Pm2	Pm3	Pm4	Pm5	Pm6	Pm7	Pm8	Pm9	Pm10	Pm11	Pm12	Pm13	Pm14	Pm15	Pm16	Pm17	Pm18	Pm19	Pm20	Pm21	Pm22	Pm23
3.90	3.90	3.90	3.65	3.77	3.90	3.59	3.89	3.74	3.78	3.90	3.90	3.90	3.88	3.90	2.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Emissões de cada Motor em g/m^3 :																						
Em1	Em2	Em3	Em4	Em5	Em6	Em7	Em8	Em9	Em10	Em11	Em12	Em13	Em14	Em15	Em16	Em17	Em18	Em19	Em20	Em21	Em22	Em23
909.29	632.90	1207.85	1436.23	1472.57	909.29	618.44	1207.41	1471.43	1432.00	909.29	1447.67	1472.28	1471.27	1800.52	568.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: MATLAB - Construção própria

Na Figura 5.35 se oferecem os valores da potência fornecida por cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

Figura 5.35 - Valores da Potência fornecida por cada gerador para atender a demanda de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).



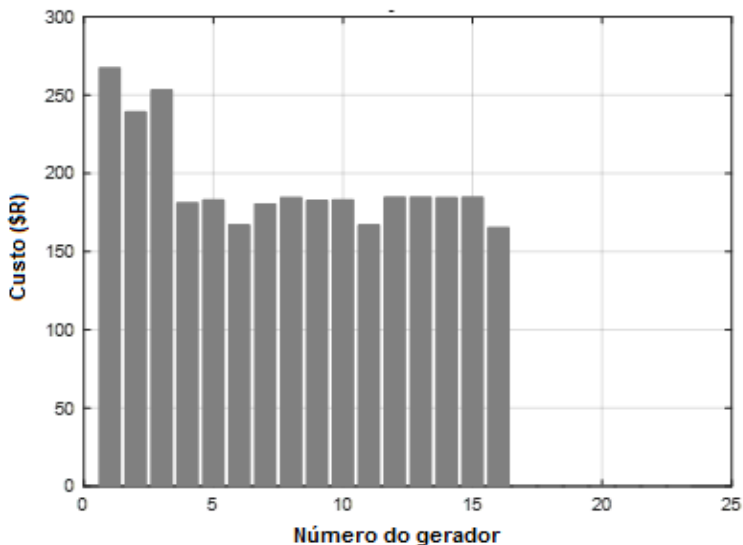
Fonte: MATLAB - Construção própria

Da figura pode-se perceber que a potência é distribuída entre 16 dos motores da usina e existe um bom equilíbrio da distribuição para atingir a demanda dada.

Na figura 5.36 mostram-se os valores do custo de cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).

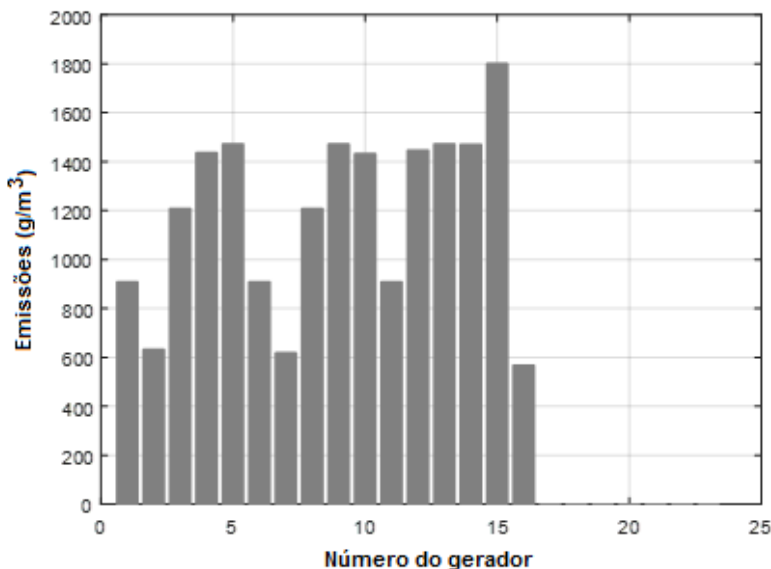
Com esses resultados o gestor pode saber onde estão os maiores custos da geração, neste caso o custo concentra-se nos primeiros três geradores e os outros 13 tem um custo bastante parecido.

Figura 5.36 - Valores do custo de cada gerador para atender a demanda de potência programada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido).



Fonte: MATLAB - Construção própria

Na figura 5.37 mostram-se os valores do Índice de Emissões de cada gerador para a demanda de potência dada (este gráfico é fornecido diretamente pelo procedimento computacional desenvolvido). Esse gráfico permite ao gestor conhecer quais são os motores que mais estão poluindo na atmosfera.

Figura 5.37 - Índice de Emissões Atmosféricas Totais.

Fonte: MATLAB - Construção própria

Os resultados deste capítulo demonstram a possibilidade dos gestores de termelétricas de com a aplicação do procedimento desenvolvido nesta tese obter informações e parâmetros para sua tomada de decisão operacional. Como foi notado, o gestor pode optar por uma geração mais econômica do ponto de vista financeiro, bem como achar um ponto de equilíbrio onde o resultado financeiro não é prejudicado pelos ganhos dos resultados ambientais. A análise da entransia dos gases de exaustão que foi aplicada neste trabalho, permite aos gestores, bem como os investidores avaliar as possibilidades de cogeração de energia com uma maior precisão.

O procedimento desenvolvido pode ser aplicado a qualquer usina termelétrica com motores a combustão. A seguir apresentaremos os avanços obtidos neste trabalho em comparação ao que existe na literatura atual, bem como as conclusões e limitações encontradas.

5.8. RESUMO DOS RESULTADOS

No ciclo de trabalho de um motor de combustão interna, a energia, em forma de entransia, é transformada em potência e, depois da reação química, volta a ser entransia nos gases de exaustão que, quando liberados para o meio ambiente, gera dissipação de entransia. No caso dos motores à combustão interna avaliados, o valor do calor perdido nos gases de exaustão para cada motor equivale a 41% do calor fornecido pelo combustível.

Existe uma redução significativa dos níveis de emissões para a atmosfera com a utilização de gás natural. Com o uso do gás natural se reduz o volume de dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, enxofre e partículas emitidos no meio. À partir dos resultados obtidos neste trabalho, é possível desenvolver estratégias que envolvam o aumento da eficiência de usinas de geração através da introdução de tecnologias de reaproveitamento do calor, de modo que os benefícios podem crescer significativamente.

O consumo de combustível dos motores à gás da Usina X oscila entre os 208 l/s para o motor 18 e os 173 l/s para o motor 9. O consumo de combustível dos motores à gás da Usina Y oscila entre os 183 l/s para o motor 14 e os 148 l/s para o motor 19. O consumo de combustível dos motores à gás das duas usinas é, de fato, bem diferenciado e não possui um comportamento uniforme. Alguns dados do consumo do combustível no momento do teste nas duas usinas têm erros de leituras que só foram identificados posteriormente na fase de análise de dados por conta de conduzirem a valores muito altos da eficiência energética.

Os valores exatos de eficiência estão maiores do que o previsto e esperado, contudo foram calculados com base em informações que visavam a aprovação e aceitação das garantias contratuais dos fabricantes em testes realizados pelos próprios fabricantes no campo e no momento das instalações. Considerando um percentual de erro de medições, correções de densidade e temperaturas e aferição de equipamentos, entende-se que tais valores “maiores” que o previsto não prejudicam o estudo e a validade do procedimento haja visto que o mesmo demonstrou consistência e valores coerentes em todas as avaliações.

No momento das análises e coletas de dados, a composição do gás natural da planta Usina Y foi diferente da composição do combustível da planta Usina X. O gás natural da planta Usina X, no momento de suas análises, possuía um número de metano maior e mais nitrogênio. Como a eficiência dos motores esta diretamente ligada a transformação da energia contida no combustível, estas variações

justificam um diferente poder calorífico e conseqüentemente a energia máxima possível de se obter no processo de combustão, justificando assim variações nos cálculos de eficiência.

A temperatura dos gases de exaustão das usinas a máxima potência é elevada e varia para os diferentes motores. Em muitas situações as temperaturas ultrapassam os valores previstos nos catálogos. Os gases de exaustão das duas usinas têm uma grande quantidade de energia térmica, que pode ser aproveitada em outros processos de cogeração.

As principais emissões dos motores à gás da Usina X nos momentos atuais são: material particulado, Dióxido de Nitrogênio, Oxigênio, Dióxido de Carbono e Monóxido de Carbono. Conforme a literatura analisada, os motores à gás não podem ter emissões de material particulado e, caso tenham, a mesma deve ser mínima.

Contudo, os motores à gás da Usina X têm emissões de material particulado em grandes quantidades. O motor que mais material particulado emite é o motor 15 com $106,5 \text{ mg/Nm}^3$ e o que menos emite é o motor 5 com $56,6 \text{ mg/Nm}^3$. Como pode-se observar, tem uma grande diferença entre o valor mínimo e o valor máximo. Além disso, a dispersão entre os valores é muito grande.

As emissões de material particulado são um índice do estado técnico dos motores e significa que os mesmos estão queimando óleo lubrificante.

As emissões de CO dos motores à gás da Usina X (que é um indicador da quantidade de combustível não queimado) são também muito diferentes. O motor a gás que mais CO emite é o motor 10 com 180 ppm e o motor que menos CO emite é o motor 15 com 150 ppm.

As emissões de CO₂ dos motores à gás da Usina X (que é outro indicador da quantidade de combustível queimado completamente) são também muito diferentes. O motor a gás que menos CO₂ emite é o motor 15 com 2,23% e o motor que mais CO₂ emite é o motor 6 com 6,27%.

As diferentes emissões dos motores à óleo combustível (HFO) da Usina X são muito parecidas e ficam nos padrões estabelecidos.

5.9. DISCUSSÕES

Este item discute o trabalho realizado do ponto de vista de gestão termoecológica, em relação ao que foi verificado na literatura existente. A seguir é apresentado um comparativo dos avanços obtidos e o impacto que estes avanços podem ocasionar na gestão de usinas termoelétricas.

O cálculo de eficiência dos motores de uma usina conforme a primeira lei da termodinâmica (energia) são conceitos amplamente conhecidos e difundidos ao longo dos anos e podem ser avaliados como visto em Ferguson e Kirkpatrick, (2015); Gossler e Deutschmann, (2015); Li *et al.* (2016); Rodrigues e Sumiوشي, 2010; Saidur *et al.*, (2012) e Çengel, (2005). Este fato se repete ao verificarmos o cálculo da eficiência conforme a segunda lei da termodinâmica (exergia) também amplamente discutido na literatura e apresentado por Çengel, (2005); Caliskan *et al.*, (2010); Caliskan *et al.*, (2009); Caton, (2000); Li *et al.*, (2016); Canakci, (2006) e Razmara *et al.*, (2016). Contudo, com o surgimento do conceito de entransia e o início da aplicação do conceito a processos como verificado em (Ahmadi *et al.*, (2016); Chen, (2013); Chen *et al.*, (2013); Cheng e Liang, (2015); Grazzini *et al.*, (2013); Guo *et al.*, (2007); Liu *et al.*, (2009) e Wu e Liang, (2008), nota-se o potencial que o novo conceito representa para o avanço da academia e avaliações práticas da eficiência. Desta forma, este trabalho buscou avançar no desenvolvimento de meios para calcular a eficiência conforme a segunda lei da termodinâmica, porém dando ênfase ao conceito de entransia.

Foi desenvolvido um procedimento para determinar a eficiência energética, exergética e a eficiência conforme os conceitos de Entransia e dissipação de Entransia para avaliar o comportamento dos diferentes motores à combustão interna. O procedimento foi aplicado aos motores à gás e a óleo pesado (HFO) das usinas Usina X e Usina Y no momento da instalação, e verificada a sua consistência com dados atuais, mas o mesmo pode ser aplicado a qualquer motor à combustão e a qualquer momento. Os valores da eficiência dos motores conforme os princípios da Entransia são maiores que os obtidos conforme os princípios de energia e exergia, isso porque o mesmo representa melhor o potencial de uso da energia térmica e capacidade remanescente de troca de calor dos gases de exaustão.

Do ponto de vista de calor, verificou-se que o calor perdido nos gases de exaustão da Usina X é 28% do calor fornecido e na Usina Y é de 30% do calor fornecido. Considerando o conceito de exergia,

verificou-se que a exergia perdida nos gases de exaustão da Usina X na máxima potência dos motores é 12,5% da exergia fornecida e na Usina Y é de 15,4 % da exergia fornecida. Por fim, verificou-se a quantidade de Entropia e a grande possibilidade de se transferir e aproveitar o calor. Se esse calor não é aproveitado em um processo de cogeração, por exemplo, gerando vapor, o mesmo é simplesmente dissipado no ambiente promove o aquecimento do ar e do meio ambiente.

Ao se considerar o “Índice de Emissões” como sendo a soma de todas as emissões atmosféricas, os resultados obtidos neste trabalho propôs um modelo matemático para se traduzir numericamente em um único índice os efeitos nocivos das emissões atmosféricas. Ou seja, o índice de emissões é uma soma ponderada de todas as emissões atmosféricas presentes e avaliadas nos gases de exaustão dos motores. A literatura atual sobre o gerenciamento de uma usina termelétrica segundo indicadores econômicos (custos) conforme apresentado por Coelho e Mariani, (2014); Huang *et al.*, (2016); Jeddi e Vahidinasab, (2014); Mandal *et al.*, (2014); Suman *et al.*,(2016); Wang e Li, (2013) não expressam este índice de maneira que possa ser matematicamente otimizável. Ao se obter este resultado na forma de um único índice, se foi possível utilizar sua função em uma otimização multicriterial permitindo verificar e simular os impactos nos custos e no índice de emissões ao se desligar os motores menos eficientes. Com isso surge uma proposta de Gestão Otimizada de Termoelétricas considerando duas variáveis antagônicas, que são o custo de geração por conta do consumo de combustível e consequentemente potência gerada e o índice de emissões atmosféricas que está associado ao volume e contaminação gerada pelos gases de exaustão.

Trabalhos semelhantes sobre o gerenciamento de usinas termelétricas segundo indicadores econômicos (custos) e alguns indicadores ambientais foram desenvolvidos por Bhattacharjee *et al.*,(2014); Dash *et al.*, (2014); Jiang *et al.*,(2014); Mondal *et al.*, (2013); Roy e Bhui, (2013), porém sem considerar as possibilidades de desligamento de motores.

Após avaliar as eficiências e o índice de emissões associado ao custo, buscou-se avaliar e desenvolver com base nos conceitos da entropia a Função ecológica de Ângulo-Brown. A função ecológica de Ângulo Brown (1991) foi desenvolvida baseada na geração de entropia e aparece sendo discutida em outros trabalhos como Barranco-Jimenez, (2013); Ribeiro *et al.*,(2007); Blair, (1999); Kopac e Kokturk, (2005); Parlak *et al.*,(2005). Este trabalho apresenta uma proposta de atualização da função ecológica com base no uso do conceito da dissipação de

entransia e, por conseguinte, as temperaturas de entrada e saída dos gases no motor, dando maior relevância e impacto aos resultado a temperatura de saída e não dando ênfase a temperatura ambiente, como na fórmula original proposta por Ângulo-Brown. Desta forma, a função ecológica atualizada passa a ser mais restritiva e conservadora do ponto de vista ambiental. Do ponto de vista termodinâmico e de engenharia, parece ser mais coerente o uso da nova expressão matemática onde os efeitos nocivos dos motores à combustão passam a possuir maior impacto ao meio ambiente quanto maior for a temperatura gerada em seus gases de exaustão.

O valor da função ecológica não deve ser negativo, pois significa que o impacto ao meio ambiente é maior que a potência, ou energia fornecida. Comparando a expressão desenvolvida pelo autor com a fórmula desenvolvida por Angulo-Brown, verifica-se que é obtido um equilíbrio entre a dissipação de entransia e a potência fornecida para uma temperatura dos gases de exaustão em torno dos 756K (483 °C) (critérios da fórmula desenvolvida neste trabalho) enquanto ao aplicar a fórmula de Angulo – Brown.

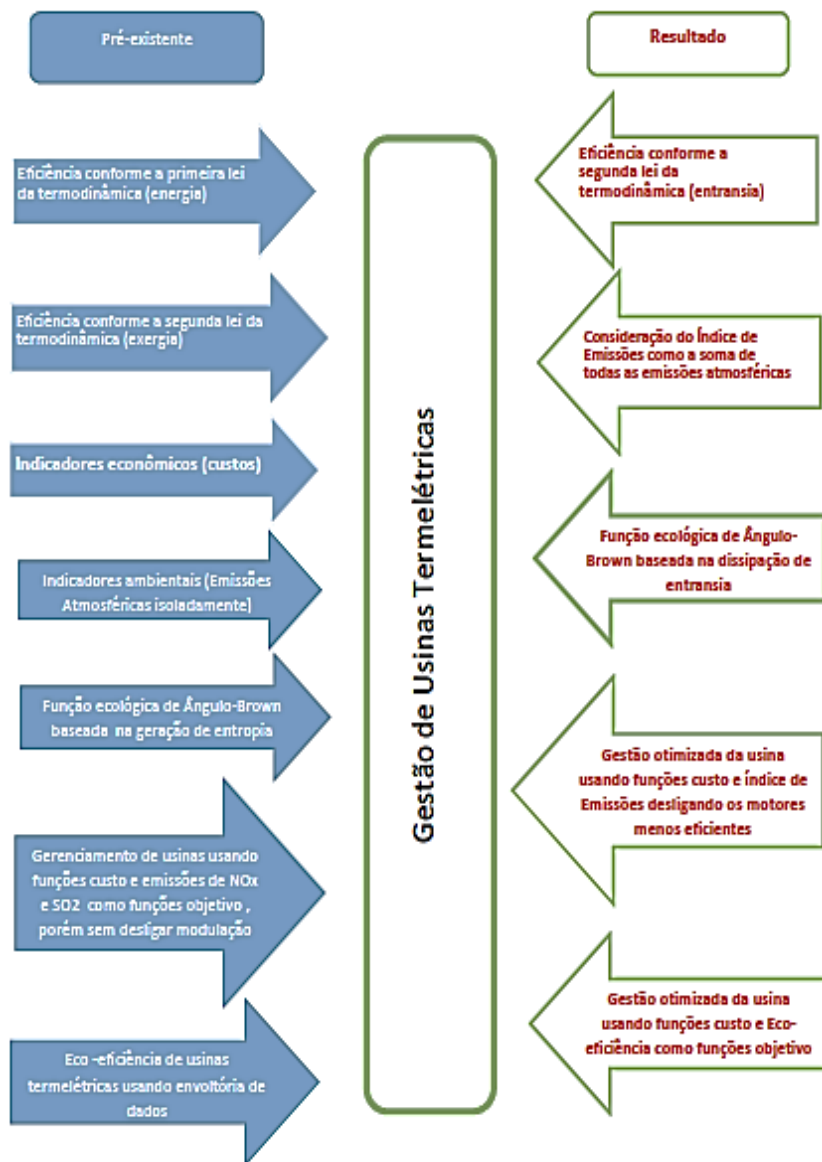
O ponto de equilíbrio no conceito original acontece aos 970 °C, o que mostra de uma forma numérica que os resultados das avaliações obtidos por meio da aplicação dos critérios e fórmula desenvolvida são mais conservadores do ponto de vista de preservação do meio ambiente.

Da comparação da expressão de Angulo-Brown com a desenvolvida pelo autor, pode-se observar que na função de Angulo - Brown está baseada no efeito da temperatura ambiente em que o equipamento está inserido, enquanto na expressão desenvolvida pelo autor o peso maior do impacto ambiental causado pelo equipamento está associado à temperatura dos gases de exaustão, o que aparenta ser mais lógico e racional.

A expressão desenvolvida tem a vantagem de levar em consideração a Entransia dos gases de exaustão, que é a capacidade de transferência de calor à partir desses gases. Esta capacidade, quando não utilizada no reaproveitamento do calor, contribui para o aquecimento do meio ambiente através de sua dissipação.

A Figura 6.1 a seguir visa apresentar de forma gráfica as diferenças entre as análises e alternativas atuais de gestão e avaliação de termoeletricas frente ao procedimento e ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho.

Figura 5.38 - Contribuições na Gestão Termoecológica de Usinas Termoeletricas com Motores de Combustão Interna.



Fonte:- Construção própria

No campo do objeto de estudo (usinas termoelétricas), foram avaliados os avanços obtidos na aplicação dos conceitos de Ecoeficiência. Estes avanços aprimoraram o uso da envoltória de dados e outros procedimentos como pode ser observado em Arabi et al.(2016); Munisamy et al., (2016); DeSimone e Popoff, (2000); Korhonen e Luptacik, (2004); Sarica e Or, (2007); Vukadinović et al., (2016). Contudo, este trabalho buscou associar a otimização da entrega de potência minimizando o custo e maximizando a Ecoeficiência com o uso de um procedimento computacional desenvolvido para tais propósitos. Para se aumentar a Ecoeficiência não necessariamente tem que se incorrer em grandes custos com modificações tecnológicas.

A utilização da variável Ecoeficiência resulta na função objetivo mais conveniente para a otimização do processo de aplicação de medidas de Eficiência Energética das Usinas. A maioria das medidas de acréscimo da Ecoeficiência tem a característica que, sendo apenas organizativas, requerem moderados, ou, até, nenhum investimento.

Os valores obtidos da Ecoeficiência ficam perto dos valores da eficiência energética e exergetica. Contudo, também consideram dentro do cálculo como parâmetro de avaliação o impacto das emissões, assim sendo, os seus valores de resultados são menores.

6. CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões obtidas . Ao final são apresentadas ainda as sugestões para trabalhos futuros baseadas nas limitações encontradas ao se desenvolver este trabalho.

Ao se concluir este trabalho surge um procedimento de gestão termoecológica das usinas envolvendo variáveis técnicas, econômicas e ambientais. O procedimento desenvolvido apresenta aos gestores 03 (três) diferentes formas de gestão para atendimento do despacho de carga. Ressalta-se que de uma maneira geral o despacho de carga é o termo utilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro para solicitar a potência de cada um dos empreendimentos de geração presentes no sistema, ou em menor escala, a potência necessária para atender ao cliente consumidor de energia. Na figura do gestor de usinas termoeletricas o atendimento a esta demanda de energia solicitada pelo despacho de carga se restringe a distribuição de potência entre os equipamentos disponíveis para geração de energia.

A primeira forma de gestão a ser avaliada pelos gestores é a “Gestão Tradicional” com foco nas eficiências energética, exergética e após este trabalho com a visão do uso dos conceitos da entransia. Esta forma é muito útil e interessante aos gestores do ponto de vista econômico. Os conceitos de eficiência energética e exergética focam diretamente na redução do consumo de combustíveis, custo este que representa 90% dos gastos de geração. E a eficiência conforme a entransia melhor se adequa ao aproveitamento do calor remanescente dos equipamentos para projetos de cogeração, contudo passa a ser também avaliada em comparação as demais promovendo uma visão mais abrangente dos resultados possíveis de serem obtidos.

A segunda forma de gestão a ser observada, tem foco no ponto de vista termoecológico. Essa forma de gestão otimizada correlaciona os resultados de Ecoeficiência com o consumo de combustível. O benefício obtido por esta possibilidade de gestão permite ao gestor não apenas focar na redução do custo de combustíveis, mas já associando a estes ganhos a possibilidade de redução dos danos ao meio ambiente por meio da melhor Ecoeficiência, conforme já apresentados anteriormente no capítulo 6.

Por fim, apresenta-se a terceira forma de gestão termoecológica. A gestão otimizada com foco na redução das emissões atmosféricas e redução do consumo de combustível. Essa forma de gestão necessariamente precisa estar associada a uma das outras duas formas apresentadas para garantir um resultado satisfatório. O motivo desta necessidade de associação tem relação com a essência de se construir e

operar uma termoelétrica movida a óleo combustível. É fato que, para se reduzir ao máximo o consumo de combustível e as emissões atmosféricas, bastaria se desligar completamente a usina termoelétrica. Contudo, o objetivo desta terceira entrega do trabalho é possibilitar aos gestores optarem dentro de seu parque de geração, quais seriam os motores que de acordo com o desempenho mapeado e coletado na entrada dos dados possui menor impacto ambiental no que tange as emissões atmosféricas e consumo de combustíveis fósseis. Cabe ressaltar aqui que entende-se como negativo o impacto ambiental aqui mencionado.

O desenvolvimento dos modelos matemáticos ocorreu utilizando as expressões desenvolvidas no capítulo 4 e a aplicação das mesmas no MATLAB 6, como meio de permitir que o programa realiza-se as inúmeras interações necessárias até a convergência dos objetivos. Observou-se que existe um ponto de maior eficiência térmica para operação dos motores, porém este não é o ponto de maior Ecoeficiência ou com o menor índice de emissões, por outro lado, a ferramenta computacional permite avaliar os resultados nas três variáveis consideradas (técnicas, ambientais e econômicas) ao se simular o desligamento dos equipamentos com melhor ou pior desempenho técnico.

Ao possibilitar estas simulações, a ferramenta desenvolvida neste trabalho fornece uma proposta de gestão diferenciada aos gestores de termoelétricas onde o mesmo passa a ser capaz de não apenas verificar a potência despachada versus o consumo de combustível como nos moldes atuais, mas também os impactos ambientais que sua seleção de equipamentos e potencia despachada estão ocasionando. Isso se torna muito relevante quando o despacho de carga não requer a potência máxima das instalações e o gestor se vê livre para escolher quais equipamentos devem ser mantidos operando e a que potencia para entregar a energia demandada pelo sistema elétrico ao qual esta conectado.

Um benefício indireto obtido por meio das ferramentas desenvolvidas é a otimização do planejamento de manutenção dos equipamentos. A gestão da manutenção dos equipamentos, passa a poder analisar e compreender quais equipamentos apresentam pior desempenho e maiores custos operacionais.

Sendo a redução de custo obtida pela economia no volume de combustível consumido e possuindo este um alto custo de aquisição e impacto ambiental crescente, os efeitos econômicos líquidos destas economias são elevados, as razões custo/benefício extremamente

atrativas e os retornos dos investimentos muito frequentemente são da ordem de menos de um ano.

A análise das eficiências fornecem uma gama de informações relevantes aos gestores de termoelétricas, dentre elas os efeitos e resultados de manutenções realizadas, o grau de degradação dos equipamentos, impactos causados por falhas de operação e manutenção e outros. Assim sendo, se bem explorada a ferramenta pode aumentar não apenas os resultados financeiros obtidos pelas economias mediante a escolha adequada de equipamentos a serem operados, como também a confiabilidade do empreendimento por conta da possibilidade de avaliação das tendências e antecipação aos problemas operacionais ligados ao desempenho dos motores. Utilizar índices de controle como o OEE que associa disponibilidade ao desempenho e a qualidade a estas avaliações pode gerar um enorme ganho em termos de gestão de O&M;

6.1. LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Para o funcionamento adequado do procedimento computacional é necessário realizar primeiramente um mapeamento completo do comportamento dos equipamentos em termos de temperaturas, consumos e emissões. Uma limitação do procedimento é que estas condições operacionais mudam com o tempo de acordo com a degradação dos equipamentos ou mesmo após revisões de manutenções. Assim sendo, para obter o melhor benefício do procedimento a coleta e atualização de dados deve ser feita de maneira rotineira em periodicidade a ser estabelecida. Respeitando a frequência de atualização de dados com base no estado de manutenção dos motores assegura-se que o procedimento otimizado de gestão termoecológica forneça ao gestores informações atualizadas e compatíveis com a realidade técnica dos empreendimentos.

A componente custo utilizada se baseou apenas no consumo de combustível, pelo fato deste por inúmeras vezes em vários empreendimentos de geração de energia ser equivalente a quase 90% dos custos de geração. Essa limitação distorce o resultado do ponto de vista econômico uma vez que outros custos diretamente relacionados a operação e manutenção dos motores não foram considerados, tais como: Consumo de óleo lubrificante, aditivos, água, manutenções e outros.

Trabalhou-se com gás natural e óleo combustível em motores à combustão interna por estes representarem o maior percentual de equipamentos de geração instalados no local onde o trabalho de pesquisa foi desenvolvido. Contudo, a teoria e procedimentos podem ser

facilmente adaptados e utilizados em outras tecnologias de geração de energia, com outros equipamentos e outros combustíveis..

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão de aprimoramento deste trabalho e resolução do inconveniente da necessidade de se coletar dados técnicos dos equipamentos de geração de energia para atualização da base de dados necessária a gestão termoecológica das usinas é associar o sistema supervisor da usina onde boa parte dos dados necessários são armazenados à rotina computacional que executa os modelos de otimização multicriterial. Essa inovação poderia ser implementada por meio de um programa computacional passível de ser patenteado;

Como sugestão de aprimoramento do estudo e melhor detalhamento da componente custo avaliada nas otimizações, fica como sugestão a inclusão dos outros custos significativos que podem ser explorados como forma de aprimorar os resultados das análises, dentre eles pode-se citar o consumo de óleo lubrificante e o custo de grandes intervenções de manutenção face as horas de funcionamento dos motores;

Este trabalho focou em motores à combustão interna movidos à gás natural e óleo combustível em por estes representarem o maior percentual de equipamentos de geração na região onde a pesquisa foi realizada, contudo fica a sugestão para o uso e aprimoramento da ferramenta para utilização em usinas com turbinas a gás e usinas de ciclo combinado.

Aplicar e adequar o conteúdo deste trabalho para otimização e busca de melhores métodos de gestão em outros setores e não apenas o de geração de energia.

REFERÊNCIAS

- ABIDO, M. A. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective environmental/economic dispatch. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 25 p. 97–105, 2003.
- ABUKHADER, S. M. Eco-efficiency in the era of electronic commerce—should ‘eco-effectiveness’ approach be adopted? *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 7, p. 801-808, 2008.
- ABUŞOĞLU, A.; KANOĞLU, M. Emission characteristics analysis of diesel engine powered cogeneration. *J. of Thermal Science & Technology*, v. 29, n. 1, p. 45-53, 2009.
- AFGAN, N. H.; DA GRAÇA CARVALHO, M. Energy system assessment with sustainability indicators. In: (Ed.). **Sustainable assessment method for energy systems**: Springer, 2000. p.83-125.
- AHMADI, M. H.; AHMADI, M. A.; MELLIT, A.; POURFAYAZ, F.; FEIDT, M. Thermodynamic analysis and multi objective optimization of performance of solar dish stirling engine by the centrality of entransy and entropy generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 78, p. 88-95, 2016.
- AKASH, B. A. Effect of heat transfer on the performance of an air-standard diesel cycle. *Int. Comm. In Heat and Mass Transfer*, v. 28, n. 1, p. 87-95, 2001.
- ALCARAZ, J.; RAMÓN, N.; RUIZ, J. L.; SIRVENT, I. Ranking ranges in cross-efficiency evaluations. *European Journal of Operational Research*, v. 226, n. 3, p. 516-521, 2013.
- ALLCOTT, H.; GREENSTONE, M. Is there an energy efficiency gap? *The Journal of Economic Perspectives*, v. 26, n. 1, p. 3-28, 2012.
- ANG, F.; VAN PASSEL, S. The sustainable value approach: A clarifying and constructive comment. *Ecological Economics*, v. 69, n. 12, p. 2303-2306, 2010.
- ANGULO-BROWN, F. An ecological optimization criterion for finite time heat engines. *Journal of Applied Physics*, v. 69, n. 11, p. 7465-7469, 1991.
- ARABI, B.; DORAISAMY, S. M.; EMROUZNEJAD, A.; KHOSHROO, A. Eco-efficiency measurement and material balance principle: An application in power plants malmquist luenberger index. *Annals of Operations Research*, p. 1-19, 2016.
- ARABI, B.; MUNISAMY, S.; EMROUZNEJAD, A.; TOLOO, M.; GHAZIZADEH, M. S. Eco-efficiency considering the issue of heterogeneity among power plants. *Energy*, v. 111, p. 722-735, 2016.

ARAGON-GONZALEZ, G.; CANALES-PALMA, A.; LEON-GALICIA, A.; MORALES-GOMEZ, J. Maximum power, ecological function and efficiency of an irreversible carnot cycle: A cost and effectiveness optimization. **Brazilian Journal of Physics**, v. 38, n. 4, p. 543-550, 2008.

AYRES, R. U. Sustainability economics: Where do we stand? **Ecological economics**, v. 67, n. 2, p. 281-310, 2008.

AZOUMAH, Y.; BLIN, J.; DAHO, T. Exergy efficiency applied for the performance optimization of a direct injection compression ignition (ci) engine using biofuels **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1494–1500, 2009.

BARRANCO-JIMENEZ, M. A.; ANGULO-BROWN, F. Thermo-economic optimisation of novikov power plant model under maximum ecological conditions. **Journal of the Energy Institute**, v. 80, n. 2, p. 96-104, 2007.

BASU, M. Fuel constrained economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-ii. **Energy**, v. 78, n. 0, p. 649-664, 12/15/ 2014.
Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421401202X>>.

BASU M. A simulated annealing-based goal-attainment method for economic emission load dispatch of fixed head hydrothermal power systems. . **Int J Electr Power Energy Syst** v. 27, n. 2, p. 147–153., 2005.

BAUMGÄRTNER, S.; QUAAS, M. What is sustainability economics? **Ecological Economics**, v. 69, n. 3, p. 445-450, 2010.

BEJAN, A. Second law analysis in heat transfer. **Energy**, v. 5, p. 721–732, 1980.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 2.^a ed. Nueva York: John Wiley & Sons, 1989. 394.

BEJAN, A. Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. **International Journal of Energy Research**, v. 26, p. 545-565, 2002.

BENN, S.; DUNPHY, D.; GRIFFITHS, A. **Organizational change for corporate sustainability**. Routledge, 2014.

BENNETT, M.; JAMES, P. The green bottom line: Current practice and future trends in environmental management accounting. **Sheffield: Greenleaf Publishing**, 1998.

BERGLES, A. E. Heat transfer enhancement – the maturing of second-generation heat transfer technology **Heat Transfer Eng.**, v. 18 n. 1, p. 47–55, 1997.

BERGLES, A. E. Some perspectives on enhanced heat transfer – 2nd-generation heat transfer technology. **J. Heat Transfer** v. 110 n. 4B, p. 1082-1096, 1998.

BHADURI, S. N.; SELARKA, E. Corporate social responsibility around the world—an overview of theoretical framework, and evolution. In: (Ed.). **Corporate governance and corporate social responsibility of indian companies**: Springer, 2016. p.11-32.

BHATTACHARJEE, K.; BHATTACHARYA, A.; NEE DEY, S. H. Solution of economic emission load dispatch problems of power systems by real coded chemical reaction algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 59, p. 176-187, 2014.

BHUSHAN, B.; SINGH, R. A review on methodology of artificial roughness used in duct of solar air heaters **Energy** v. 35 n. 1, p. 202–212., 2010.

BI, G.-B.; SONG, W.; ZHOU, P.; LIANG, L. Does environmental regulation affect energy efficiency in china's thermal power generation? Empirical evidence from a slacks-based dea model. **Energy Policy**, v. 66, p. 537-546, 2014.

BIGLIARDI, B.; BERTOLINI, M.; KLEWITZ, J.; ZEYEN, A.; HANSEN, E. G. Intermediaries driving eco-innovation in smes: A qualitative investigation. **European Journal of Innovation Management**, v. 15, n. 4, p. 442-467, 2012.

BLAIR, G. P. Design and simulation of four-stroke engines. **Training**, v. 2013, p. 10-18, 1999.

BLEISCHWITZ, R. Cognitive and institutional perspectives of eco-efficiency. **Ecological Economics**, v. 46, n. 3, p. 453-467, 2003.

BLEISCHWITZ, R.; HENNICKE, P. **Eco-efficiency, regulation, and sustainable business: Towards a governance structure for sustainable development**. Edward Elgar Publishing, 2004.

BOURHIS, G.; LEDUC, P. Energy and exergy balances for modern diesel and gasoline engines. **Oil & Gas Science and Technology–Revue de l'Institut Français du Pétrole**, v. 65, n. 1, p. 39-46, 2010.

BORLA, A. Recovery of electrical energy and water from exhaust gas: **Google Patents** 2016.

BRADY, K.; HENSON, P.; FAVA, J. A. Sustainability, eco-efficiency, life-cycle management, and business strategy. **Environmental Quality Management**, v. 8, n. 3, p. 33-41, 1999.

BREMBERGER, C.; BREMBERGER, F.; LUPTACIK, M.; SCHMITT, S. Regulatory impact of environmental standards on the eco-efficiency of firms. **Journal of the Operational Research Society**, v. 66, n. 3, p. 421-433, 2014.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, n. 5, p. 1133-1140, 2011.

BRONZATTI, F. L.; IAROZINSKI NETO, A. **Matrizes energéticas no brasil: Cenário 2010-2030**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 28: 1-15 p. 2008.

BROUN, R.; MENZIES, G. F. Life cycle energy and environmental analysis of partition wall systems in the uk. **Procedia Engineering**, v. 21, n. 1, p. 864-873, // 2011. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811049228> >.

BRUNDTLAND, C. **Our common future: Report of the world commission on environment and development**. UN Documents Gatheringa Body of Global Agreements 1987.

BURRITT, R.; SCHALTEGGER, S. Eco-efficiency in corporate budgeting. **Environmental Management and Health**, v. 12, n. 2, p. 158-174, 2001.

BURRITT, R. L. Challenges for environmental management accounting. In: (Ed.). **Implementing environmental management accounting: Status and challenges**: Springer, 2005. p.19-44.

BURRITT, R. L.; HAHN, T.; SCHALTEGGER, S. Towards a comprehensive framework for environmental management accounting—links between business actors and environmental management accounting tools. **Australian Accounting Review**, v. 12, n. 27, p. 39-50, 2002.

BURRITT, R. L.; SAKA, C. Environmental management accounting applications and eco-efficiency: Case studies from japan. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 14, p. 1262-1275, 2006.

C. CHRISTOBER ASIR RAJAN. A solution to the economic dispatch using ep based sa algorithm on large scale power system. . **Electrical Power and Energy Systems**, v. 32, p. 583–591, 2010.

CABEZAS-GÓMEZ, L.; NAVARRO, H. A.; HANRIOT, S. D. M.; MAIA, C. B.; SÁIZ-JABARDO., J. M. Analysis of a new cross flow heat exchanger flow arrangement – extension to several rows. . **International Journal of Thermal Sciences** v. 55, p. 122-132, 2012.

CALISKAN, H.; TAT, M. E.; HEPBASLI, A. Performance assessment of an internal combustion engine at varying dead (reference) state temperatures **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 16, p. 3431–3436, 2009.

CALISKAN, H.; TAT, M. E.; HEPBASLI, A. A review on exergetic analysis and assessment of various types of engines. **International Journal of Exergy**, v. 7, n. 3, p. 287-310, 2010.

CALISKAN, H.; TAT, M. E.; HEPBASLI, A.; VAN GERPEN, J. H. Exergy analysis of engines fuelled with biodiesel from high oleic soybeans based on experimental values. **International Journal of Exergy**, v. 7, n. 1, p. 20-36, 2009.

CALLENS, I.; TYTECA, D. Towards indicators of sustainable development for firms: A productive efficiency perspective. **Ecological Economics**, v. 28, n. 1, p. 41-53, 1999.

CAMPOS, J. C.; QUISPE, E.; CAICEDO, O. **Herramientas para el análisis de la caracterización de la eficiencia energética**. Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, p.1-35. 2007

CANAKCI, M.; HOŞÖZ, M. Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels. **Energy Sources, Part B**, v. 1, n. 4, p. 379–394, 2006.

CATON, J. A. On the destruction of availability (exergy) due to combustion processes—with specific application to internal-combustion engines. **Energy**, v. 25, n. 11, p. 1097-1117, 2000.

CE, L.; GL., V. Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions.. **IEEE Trans Power Apparatus Syst** v. 103, n. 6 p. 1170–1175, 1984.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics an engineering approach**. 5th. new York: McGraw-Hill, Inc, 2005.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics an engineering approach**. 8th Edt. New York: McGraw-Hill, Inc., 2014. 1024.

CHA, K.; LIM, S.; HUR, T. Eco-efficiency approach for global warming in the context of kyoto mechanism. **Ecological Economics**, v. 67, n. 2, p. 274-280, 2008.

CHAN, H. R., FELL, H., LANGE, I., & LI, S. Efficiency and environmental impacts of electricity restructuring on coal-fired power plants. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 81, p. 1-18, 2017.

CHASIN, F. Sustainability: Are we all talking about the same thing? **Proceedings of the ICT for Sustainability**, p. 342-351, 2014.

CHATZIMOURATIDIS, A. I.; PILAVACHI, P. A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the analytic hierarchy process.

Energy policy, v. 37, n. 3, p. 778-787, 2009.

CHEN, Q. Entropy dissipation-based thermal resistance method for heat exchanger performance design and optimization. . **International Journal of Heat and Mass Transfer.**, v. 60, n. 156-162, 2013.

CHEN, Q.; LIANG, X.-G.; GUO, Z.-Y. Entropy theory for the optimization of heat transfer—a review and update. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 63, p. 65-81, 2013.

CHEN, Q.; LIANG, X.-G.; GUO, Z.-Y. Entropy theory for the optimization of heat transfer – a review and update. **International Journal of Heat and Mass Transfer** v. 63, p. 65–81, 2013.

CHENG, X.; CHEN, Q.; HU, G.; LIANG, X. Entropy balance for the closed system undergoing thermodynamic processes. . **International Journal of Heat and Mass Transfer** . v. 60, p. 180–187, 2013.

CHENG, X.; LIANG, X. Entropy variation associated with work. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 167-170, 2015.

CHENG, X.; LIANG, X. Computation of effectiveness of two-stream heat exchanger networks based on concepts of entropy generation, entropy dissipation and entropy-dissipation-based thermal resistance. . **Energy Conversion and Management** v. 58, p. 163–170, 2012.

CHENG, X.; XU, X.; LIANG, X. Application of entropy to optimization design of parallel thermal network of thermal control system in spacecraft. **Science China Technological Sciences**, v. 54, n. 4, p. 964-971, 2011.

CHONG P, C; YOUNG, D; JIN, Y.J; GANG, C.Y.; JIN, S. NO_x reduction and N₂O emissions in a diesel engine exhaust using Fe-zeolite and vanadium based SCR catalysts. **Applied Thermal Engineering**, v. 110, p. 18-24, 2017.

CL, C.; WANG CL. Branch-and-bound scheduling for thermal generating units. . **IEEE Trans Energy Convers** v. 8, n. 2, p. 184–189, 1993.

COELHO, L. D. S.; MARIANI, V. C. An improved harmony search algorithm for power economic load dispatch. . **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 2522–2526, 2009.

CONAMA. Padroes_de_qualidade_do_ar., Brasil, 2012. Disponível em: < http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/conama_03_90_padroes_de_qualidade_do_ar.pdf >. Acesso em: Abril 2014.

CRAMER, J. How can we substantially increase eco-efficiency? **IND. ENVIRON.**, v. 20, n. 3, p. 58-62, 1997.

CRIFO, P.; FORGET, V. D. The economics of corporate social responsibility: A firm-level perspective survey. **Journal of Economic Surveys**, v. 29, n. 1, p. 112-130, 2015.

D., K.; I, P. **Modern thermodynamics-from heat engines to dissipative structures**. . Chichester England: John Wiley & Sons, 1998.

DALKILIC, A. S.; WONGWISES, S. Intensive literature review of condensation inside smooth and enhanced tubes **Int. J. Heat Mass Transfer** v. 52, n. 15-16, p. 3409-3426, 2009.

DAMOUSIS, I. G.; BAKIRTZIS, A. G.; S. DOKOPOULOS. Network-constrained economic dispatch using real-coded genetic algorithm, . **IEEE Trans. Power Syst.** , v. 18, n. 1, p. 198-205, 2003.

DAS, D. B.; PATVARDHAN, C. Solution of economic load dispatch using real coded hybrid stochastic search. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 21, n. 3, p. 165-170, 1999.

DASH, S.; MOHANTY, S.; PADHI, A. Multi-objective economic emission load dispatch with nonlinear fuel cost and non-inferior emission level functions for a 30-bus ieee test case system. **International Journal of Analytical, Experimental and Finite Element Analysis (IJAEFEA)**, v. 1, n. 3, p. 33-37, 2014.

DA SILVA CYRNE, C. C.; STÜLP, S. Da escolha entre fontes de energia renováveis versus não renováveis: Uma dicotomia falaciosa. **Revista ESPACIOS| Vol. 37 (Nº 26) Año 2016**, 2016.

DAUB, C. H. Assessing the quality of sustainability reporting: An alternative methodological approach. . **Journal of Cleaner Production**, v. v. 15, p. 75-85, 2007. Disponível em: <
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652605001915> Acesso em: 29/3/2014. >.

DAVÉ, A.; SALONITIS, K.; BALL, P.; ADAMS, M.; MORGAN, D. Factory eco-efficiency modelling: Framework application and analysis. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 214-219, 2016.

DEB, K.; PRATAP, A.; AGARWAL, S.; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **IEEE transactions on evolutionary computation**, v. 6, n. 2, p. 182-197, 2002.

DELMAS, M. A.; ETZION, D.; NAIRN-BIRCH, N. Triangulating environmental performance: What do corporate social responsibility ratings really capture? **The Academy of Management Perspectives**, v. 27, n. 3, p. 255-267, 2013.

DESIMONE, L. D.; POPOFF, F. **Eco-efficiency: The business link to sustainable development**. MIT press, 2000.

DESPEISSE, M.; DAVÉ, A.; LITOS, L.; ROBERTS, S.; BALL, P.; EVANS, S. A collection of tools for factory eco-efficiency. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 542-546, 2016.

DEWAN, A.; MAHANTA, P.; RAJU, K. S.; KUMAR, P. S. Review of passive heat transfer augmentation techniques **Proc. Inst. Mech. Eng. Part A – J. Power Energy**, v. 218, n. A7, p. 509–527, 2004.

DHILLON, J.; JAIN, S. K. Multi-objective generation and emission dispatch using nsga-ii. **IACSIT International Journal of Engineering and Technology**, v. 3, n. 5, p. 460-466, 2011.

DHILLON, J. S.; PARTI, S. C.; D.P.KOTHARI. Multiobjective optimal thermal power dispatch, . **Electrical Power Energy Syst.** , v. 16, n. 6, p. 383–389, 1994.

DILLON, T. S.; EDWIN, K. W.; KOCHS, H. D.; TAUD, R. J. Integer programming commitment with probabilistic reserve determination. **IEEE Trans. Power Apparatus Syst.** , v. 97, n. 6, p. 2154–2166, 1978.

DOMINGUES, A. **Avaliação do potencial de aproveitamento de energia contida nos gases de escape de veículos automóveis**. 2011. (Mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

DOS SANTOS COELHO, L.; BORA, T. C.; MARIANI, V. C. Differential evolution based on truncated lévy-type flights and population diversity measure to solve economic load dispatch problems. **International journal of electrical power & energy systems**, v. 57, p. 178-188, 2014.

DOVERS, S.R.; HANDMER, J.W. Uncertainty, sustainability and change. *Global Environmental Change*, v.2, n.4, p.262-276, 1992.

DRESCH, A. ; P. A. CAUCHICK MIGUEL. "Análise dos principais métodos de pesquisa empregados para a condução de estudos que abordam a inovação no brasil." **Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias** 5(4): 2480-2494, 2015.

DU, J.; COOK, W. D.; LIANG, L.; ZHU, J. Fixed cost and resource allocation based on dea cross-efficiency. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 1, p. 206-214, 2014.

- DYCKHOFF, H.; ALLEN, K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (dea). **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 2, p. 312-325, 2001.
- DYLLICK, T.; HOCKERTS, K. Beyond the business case for corporate sustainability. **Business strategy and the environment**, v. 11, n. 2, p. 130-141, 2002.
- EFFATNEJAD, R.; REZAPOUR, K. Energy criterion for vegetable oil industry in iran. **International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering”** v. 2, n. 1, p. 15-23, 2010.
- EHRENFELD, J. R. Eco-efficiency. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 6-8, 2005.
- EIK, A. **Eco-efficiency—state of the art**. NTNU’s Industrial Ecology Programme (IndEcol). Norway, p.1-10. 1998
- ELECTROBRÁS, P. I., CNI. “**Eficiência energética na indústria**”. Brasília: Roberto Simonsen 2009. Disponível em: <
<http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/FF808081234E24EA0123627A07156F8E/Eficiencia.pdf>>.
- ELKINGTON, J. Enter the triple bottom line. **The triple bottom line: Does it all add up**, v. 11, n. 12, p. 1-16, 2004.
- ELKINGTON, J. Governance for sustainability. . **Corporate Governance**, v. v. 14, n. 6, p., n. 6, p. 522–529,, 2006. Disponível em: <
<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8683.2006.00527.x>>. Acesso em: 11/3/2014. >.
- ELKINGTON, J.; HAILES, J. **The green consumer guide**. Penguin, 1989.
- EPA, E. Poluição do ar. 2012. Disponível em: <
http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos/poluicao_do_ar.pdf>. Acesso em: Abril de 2013.
- ERDURANLI, P. **Exergy analysis for a power plant**. 1997. MSc Thesis, Dept of Mech. Eng., Dept of Mech. Eng, ZKU Graduate School of Natural&Applied Sciences Zonguldak.
- ERTESVAG, I. S. Sensitivity of chemical exergy for atmospheric gases and gaseous fuels to variations in ambient conditions. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 7, p. 1983–1995, 2007.
- FÄRE, R.; GROSSKOPF, S.; LOVELL, C. K.; PASURKA, C. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: A nonparametric approach. **The review of Economics and Statistics**, p. 90-98, 1989.

FEIDT, M.; COSTEA, M. Energy and exergy analysis and optimization of combined heat and power systems. Comparison of various systems. **Energies** v. 5, n. 9, p. 3701-3722, 2012.

FEIL, A. A.; STRASBURG, V. J.; SCHREIBER, D. Análise dos eventos históricos para a concepção dos termos sustentabilidade e desenvolvimento sustentável//\\ analysis of historical events for conception of sustainability and sustainable development terms. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n. 1, 2016.

FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. **Internal combustion engines: Applied thermosciences**. John Wiley & Sons, 2015.

FERRÁNDEZ-GARCÍA, A.; IBÁÑEZ-FORÉS, V.; BOVEA, M. D. Eco-efficiency analysis of the life cycle of interior partition walls: A comparison of alternative solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 649-665, 2016.

FET, A. M.; MATHIASSEN, E.; BRATTEBØ, H.; STØREN, S. **P2005-industriell økologi: Sluttrapport**. Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Industrial Ecology Programme (IndEcol). Norway, p.80. 2006.

FIGGE, F.; HAHN, T. Sustainable value added—measuring corporate contributions to sustainability beyond eco-efficiency. **Ecological economics**, v. 48, n. 2, p. 173-187, 2004.

FIGGE, F.; HAHN, T. Not measuring sustainable value at all: A response to kuosmanen and kuosmanen. **Ecological Economics**, v. 69, n. 2, p. 244-249, 2009.

FLEURY, A. **Planejamento do projeto de pesquisa e definição do modelo teórico**. In: **Cauchick miguel, p. A. (org). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª. Edição. São Paulo: Ed. Campos, 2011.

FRITZ, M.; KOCH, M. Potentials for prosperity without growth: Ecological sustainability, social inclusion and the quality of life in 38 countries. **Ecological Economics**, v. 108, p. 191-199, 2014.

Frota, Willamy M.; Frota, Whylker M.; Sá, José A. S.; Almeida, Arthur C.; Rocha, Brígida R. P; Pissolato, I. Avaliação Econômica da Inserção do Gás Natural da Amazônia na Matriz Elétrica da Cidade de Manaus, Estado do Amazonas. **IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Goiânia: UFG, 2012. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/anais04.html>>. Acesso: novembro 2017

FUAMBA, M. **Transient flows modelling in drainage systems networks**. 1997. (Ph.D). Modelling, Ph. D. dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium), Belgium.

FUSSIER, C.; JAMES, P. **A break through discipline for innovation and sustainability**. London, UK: Pitman Publishing, 1996.

GERMANI, M.; MANDOLINI, M.; MARCONI, M.; MARILUNGO, E. A method for the estimation of the economic and ecological sustainability of production lines. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 147-152, 2014.

GHAURI, P. N.; GRØNHAUG., K. **Research methods in business studies: A practical guide**. USA: Financial Times Prentice Hall, 2005. 257 páginas.

GHOLAMI, R.; SULAIMAN, A. B.; RAMAYAH, T.; MOLLA, A. Senior managers' perception on green information systems (is) adoption and environmental performance: Results from a field survey. **Information & Management**, v. 50, n. 7, p. 431-438, 2013.

GLAUSER, M.; MÜLLER, P. Eco-efficiency: A prerequisite for future success. **CHIMIA International Journal for Chemistry**, v. 51, n. 5, p. 201-206, 1997.

GOSSLER, H.; DEUTSCHMANN, O. Numerical optimization and reaction flow analysis of syngas production via partial oxidation of natural gas in internal combustion engines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 34, p. 11046-11058, 2015.

GOVINDAN, K.; SARKIS, J.; CHIAPPETTA JABBOUR, C. J.; ZHU, Q.; GENG, Y. Eco-efficiency based green supply chain management: Current status and opportunities. **European Journal of Operational Research**, p. 293-298, 2014.

GRAEDEL, T. E.; ALLENBY., B. R. **T industrial ecology**. USA: AT&T, 1995.

GRAFF RG; REISKIN ED; ALK, W. **Snapshots of environmental cost accounting. A report to us epa environmental accounting project**. Boston, USA: Tellus Institute, 1998.

GRANT, D.; JORGENSON, A. K.; LONGHOFER, W. How organizational and global factors condition the effects of energy efficiency on co 2 emission rebounds among the world's power plants. **Energy Policy**, v. 94, p. 89-93, 2016.

GRAVES, R. **Stretch efficiency in combustion engines with implications of new combustion regimes**. Oak Ridge National Laboratory. Wisconsin . USA. 2004

GRAY, R. Corporate environmental accounting. **Accounting and Business Research**, v. 28, n. 1, p. 83-84, 1997.

GRAZZINI, G.; BORCHIPELLINI, R.; LUCIA, U. Entropy versus entransy. **Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics**, v. 38, n. 3, p. 259-271, 2013.

GUO, Z.-Y.; ZHU, H.-Y.; LIANG, X.-G. Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 13, p. 2545-2556, 2007.

GUVENC, U.; DUMAN, S.; DOSOGLU, M. K.; KAHRAMAN, H. T.; SONMEZ, Y.; YILMAZ, C. Application of symbiotic organisms search algorithm to solve various economic load dispatch problems. **INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)**, 2016 International Symposium on, 2016, IEEE. p.1-7.

HALL, T. J. The triple bottom line: What is it and how does it work? **Indiana business review**, v. 86, n. 1, p. 4-8, 2011.

HANINGTON, B.; MARTIN, B. **Universal methods of design: 100 ways to research complex problems, develop innovative ideas, and design effective solutions** USA: Amazon, 2012.

HARDIA, K.; MAITHIL, N.; SHAH, M. Particle swarm optimization applied to economic load dispatch problem. **International Journal of Research**, v. 2, n. 9, p. 834-843, 2015.

HAUSCHILD, M. Z. Better—but is it good enough? On the need to consider both eco-efficiency and eco-effectiveness to gauge industrial sustainability. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 1-7, 2015.

HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B.; HUPPES, G.; LANKREIJER, R. M.; UDO DE HAES, H. A.; WEGENER SLEESWIJK, A.; ANSEMS, A.; EGGELS, P.; DUIN, R. V.; DE GOEDE, H. **Environmental life cycle assessment of products: Guide and backgrounds (part 1)**. National Reuse of Waste Research Programme. Netherlands, p.1-92. 1992

HOANG, V.-N.; ALAUDDIN, M. Input-orientated data envelopment analysis framework for measuring and decomposing economic, environmental and ecological efficiency: An application to oecd agriculture. **Environmental and Resource Economics**, v. 51, n. 3, p. 431-452, 2012.

HÖFER, R. History of the sustainability concept—renaissance of renewable resources. In: HOFER, R. (Ed.). **Sustainable solutions for modern economies**. Germany: Royal Society of Chemistry, 2009. p.1-497.

HOPFENBECK, W. **The green management revolution: Lessons in environmental excellence**. New York: Prentice Hall, 1993.

HUANG, C. M.; HUANG, Y. C. Anovel approach to real-time economic emission power dispatch., **IEEE Trans. Power Systems** v. 18, n. 1, p. 288–294., 2003.

HUANG, Y.; WANG, J.-R.; GUO, F. Economic load dispatch using improved gravitational search algorithm. 2015 ISPRS International Conference on Computer

- Vision in Remote Sensing, 2016, International Society for Optics and Photonics. p.990114-990116.
- HUPPES, G.; ISHIKAWA, M. Eco-efficiency guiding micro-level actions towards sustainability: Ten basic steps for analysis. **Ecological Economics**, v. 68, n. 6, p. 1687-1700, 2009.
- İ. SEZER; BILGIN, A. Exergy analysis of si engines. **Int. J. Exergy**, v. 5, n. 2, p. 204-217, 2008.
- İ. SEZER; BILGIN, A. Mathematical analysis of spark ignition engine operation via the combination of the first and second laws of thermodynamics. **Proc. R. Soc. A**, v. 464, p. 3107–3128, 2009.
- IBRAHIM DINCER, M. A. R. **Exergy: Energy, environment and sustainable development**. Elsevier, 2007. 472.
- J, H. G.; Y, G. Z. The efficiency of heat transfer process. **Journal Eng Thermophys**, v. 32, p. 1005-1008, 2011.
- J.E. HESSELGREAves. Rationalisation of second law analysis of heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, p. 4189–4204, 2000.
- J.F. BARD. Short-term scheduling of thermal-electric generators using lagrangian relaxation,. **Operations Res.**, v. 36 n. 5, p. 756–766, 1988.
- JAMES, P. **Urban sustainability in theory and practice: Circles of sustainability**. London: Routledge, 2014. .
- JEDDI, B.; VAHIDINASAB, V. A modified harmony search method for environmental/economic load dispatch of real-world power systems. **Energy Conversion and Management**, v. 78, p. 661-675, 2014.
- JIANG, S.; JI, Z.; SHEN, Y. A novel hybrid particle swarm optimization and gravitational search algorithm for solving economic emission load dispatch problems with various practical constraints. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 55, p. 628-644, 2014.
- JØRGENSEN, A.; HAUSCHILD, M. Eco-efficiency. In: HEIDELBERG (Ed.). **Cirp encyclopedia of production engineering**. Berlin: Springer, 2014. p.437-438.
- K.P.WANG; C.C. FUNG. Simulated annealing based economic dispatch algorithm, . **IEE. Proc. C** v. 140, n. 6, p. 507–513., 1993.

KANOĞLU, M.; İŞİK, S. K.; ABUŞOĞLU, A. Performance characteristics of a diesel engine power plant **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. (11-12), p. 1692–1702, 2005.

KIM, K. H.; KIM, K. Comparative analyses of energy–exergy–entransy for the optimization of heat-work conversion in power generation systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 84, n. 0, p. 80-90, 5// 2015. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931015000071> >.

KING, R. T. F. A.; H.C.S. RUGHOOPUTH. Elitist multiobjective evolutionary algorithm for environmental/economic dispatch, . In: IEEE, IEEE Congress on Evolutionary Computation 2003, Canberra, Australia IEEE p.1108–1114.

KING, T. D.; EL-HAWARY, M.; EL-HAWARY, F. Optimal environmental dispatching of electric power systems via an improved hopfield neural network model. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 3, p. 1559-1565, 1995.

KOPAC, M.; KOKTURK, L. Determination of optimum speed of an internal combustion engine by exergy analysis. **Int. Journal Exergy**, v. 2, n. 1, p. 40-54., 2005.

KORHONEN, J.; SNÄKIN, J.-P. Quantifying the relationship of resilience and eco-efficiency in complex adaptive energy systems. **Ecological Economics**, v. 120, p. 83-92, 2015.

KORHONEN, P. J.; LUPTACIK, M. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis. **European journal of operational research**, v. 154, n. 2, p. 437-446, 2004.

KOSKELA, M. Measuring eco-efficiency in the finnish forest industry using public data. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 316-327, 2015.

KOSKELA, M.; VEHMAS, J. Defining eco-efficiency: A case study on the finnish forest industry. **Business strategy and the environment**, v. 21, n. 8, p. 546-566, 2012.

KOTAS, T. **The exergy method of thermal plant analysis**. Florida E.U: Krieger Publishing Company: Malabar, FL., 1995.

KREUZE, J. G.; NEWELL, G. E. Abc and life-cycle costing for environmental expenditures. **Strategic Finance**, v. 75, n. 8, p. 38-38, 1994.

KUOSMANEN, T.; KORTELAJINEN, M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 59-72, 2005.

KUOSMANEN, T.; KUOSMANEN, N. How not to measure sustainable value (and how one might). **Ecological Economics**, v. 69, n. 2, p. 235-243, 2009.

L, C.; F, S.; W., C. The ecological figures of merit for thermodynamic cycles. . **J Eng Thermal Energy Pow.** , v. 9, n. 6, p. 374- 376, 1994.

L.L. GARVER. Power generation scheduling by integer programming—development of theory. **IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS** v. 82, n. 3, p. 730-735, 1963.

LAOHALERTDECHA, S.; NAPHON, P.; WONGWISES, S. A review of electrohydrodynamic enhancement of heat transfer. **Renew. Sust. Energy Rev.**, v. 11, n. 5, p. 858–876, 2007.

LEE, K.-H.; FARZIPOOR SAEN, R. Measuring corporate sustainability management: A data envelopment analysis approach. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 219-226, 11// 2012.. Disponivel em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527311003781> >.

LEE, K. Y.; SODE-YOME, A.; PARK, J. H. Adaptive hopfield neural networks for economic load dispatch, . **IEEE Trans. Power Syst.** , v. 13, n. 2, p. 519–526, 1998.

LEHNI, M. **State-of-play report. Wbcsd project on eco-efficiency metrics & reporting**. Geneva. 1998

LEONIDOU, L. C.; CHRISTODOULIDES, P.; THWAITES, D. External determinants and financial outcomes of an eco-friendly orientation in smaller manufacturing firms. **Journal of Small Business Management**, v. 54, n. 1, p. 5-25, 2016.

LI, W.; WINTER, M.; KARA, S.; HERRMANN, C. Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 59-62, 2012.

LI, Y.; JIA, M.; CHANG, Y.; KOKJOHN, S. L.; REITZ, R. D. Thermodynamic energy and exergy analysis of three different engine combustion regimes. **Applied Energy**, v. 180, p. 849-858, 2016.

LIN, W.-M.; CHENG, F.-S.; TSAY, M.-T. Nonconvex economic dispatch by integrated artificial intelligence. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 16, n. 2, p. 307-311, 2001.

LIRA-BARRAGÁN, L. F.; GUTIÉRREZ-ARRIAGA, C. G.; BAMUFLEH, H. S.; ABDELHADY, F.; PONCE-ORTEGA, J. M.; SERNA-GONZÁLEZ, M.; EL-HALWAGI, M. M. Reduction of greenhouse gas emissions from steam power plants

through optimal integration with algae and cogeneration systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, n. 8, p. 2401-2415, 2015.

LIU, F.; BEIRLE, S.; ZHANG, Q., DÖRNER, S.; HE, K.; WAGNER, T. NO_x lifetimes and emissions of cities and power plants in polluted background estimated by satellite observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 8, p. 5283-5298, 2016.

LIU, W.; LIU, Z.; JIA, H.; FAN, A.; NAKAYAMA, A. Entransy expression of the second law of thermodynamics and its application to optimization in heat transfer process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 13, p. 3049-3059, 2011.

LIU, W.; LIU, Z. C.; JIA, H.; FAN, A. W.; NAKAYAMA, A. Entransy expression of the second law of thermodynamics and its application to optimization in heat transfer process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 13-14, p. 3049-3059, 6// 2011. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931011000974>>.

LIU, X.; MENG, J.; GUO, Z. Entropy generation extremum and entransy dissipation extremum for heat exchanger optimization. **Chinese Science Bulletin**, v. 54, n. 6, p. 943-947, 2009.

LORENZO-TOJA, Y.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; AMORES, M. J.; TERMES-RIFÉ, M.; MARÍN-NAVARRO, D.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective. **Science of The Total Environment**, v. 566, p. 468-479, 2016.

LORENZO-TOJA, Y.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; CHENEL, S.; MARÍN-NAVARRO, D.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Eco-efficiency analysis of spanish wwtps using the lca+ dea method. **water research**, v. 68, p. 651-666, 2015.

LOWE, E. A.; EVANS, L. K. Industrial ecology and industrial ecosystems. **Journal of cleaner production**, v. 3, n. 1, p. 47-53, 1995.

LOWERY, P. G. Generating unit commitment by dynamic programming **IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS**, v. 85, n. 5, p. 422-426, 1996.

M. MUSLU. Economic dispatch with environmental considerations: Tradeoff curves and emission reduction rates, . **Electric Power Syst. Res.** , v. 71, n. 2, p. 153-158. , 2004.

M.J. MORAN; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. New York: Wiley & Sons, 2000.

MADARIAGA, F. J. G. **Ecoeficiencia: Propuesta de diseño para el mejoramiento ambiental**. Mexico: Editorial Universitaria-Libros UDG, 2013. 86.

MANDAL, B.; ROY, P. K.; MANDAL, S. Economic load dispatch using krill herd algorithm. **International journal of electrical power & energy systems**, v. 57, p. 1-10, 2014.

MARTINS, R. A. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª. Edição, 2011. São Paulo: Ed. Campos, 2011.

MASUDA, K. Measuring eco-efficiency of wheat production in japan: A combined application of life cycle assessment and data envelopment analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 373-381, 2016

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: Remaking the way we make things**. New York: MacMillan, 2010. 208.

METTI, G. Global environmental factors and eco-efficiency. **Beverage World**, v. 1999, p. 82-83, 1999.

MIGUEL, P. A. C.; SOUSA, R. O método do estudo de caso na engenharia de produção. In: CHAPTERS, F.-L. E. P. D. L. B. A. (Ed.). **Feg - livros e partes de livros / books and chapters**. 2a. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. cap. 6, p.131-148.

MILNE, M. J.; GRAY, R. W (h) ither ecology? The triple bottom line, the global reporting initiative, and corporate sustainability reporting. **Journal of business ethics**, v. 118, n. 1, p. 13-29, 2013.

MINGTIAN, X. The thermodynamics basis of entransy and entransy dissipation. **Energy**, v. 36, p. 4272 -4277, 2011.

MISTRY, K. H.; LIENHARD, J. H.; ZUBAIR, S. M. Effect of entropy generation on the performance of humidification-dehumidification desalination cycles. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, n. 9, p. 1837-1847, 2010.

MONDAL, S.; BHATTACHARYA, A.; NEE DEY, S. H. Multi-objective economic emission load dispatch solution using gravitational search algorithm and considering wind power penetration. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 44, n. 1, p. 282-292, 2013.

MORABITO NETO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**, v. 2, p. 169-198, 2012.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentos de termodinâmica técnica**. Barcelona. España: Reverte, 2004.

MÜLLER, K.; HOLMES, A.; DEURER, M.; CLOTHIER, B. E. Eco-efficiency as a sustainability measure for kiwifruit production in new zealand. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 333-342, 2015.

MUNISAMY, S.; ARABI, B. Eco-efficiency change in power plants: Using a slacks-based measure for the meta-frontier malmquist–luenberger productivity index. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 218-232, 2015.

MURSHED, S. M. S.; CASTRO, C. A. N. D.; LOURENCO, M. J. V.; M.L.M. LOPES; ., F. J. V. S. A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids **Renew. Sust. Energy Rev.** , v. 15 n. 5, p. 2342–2354, 2011.

MYAT, A.; THU, K.; NG, K.; KIM, Y. An entropy generation and genetic algorithm optimization of two-bed adsorption cooling cycle. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 226, n. 2, p. 142-156, 2012.

NAPHON, P.; WONGWISES, S. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes. **Renew. Sust. Energy Rev**, v. 10, n. 5, p. 463–490, 2006.

NETO, J. Q. F.; WALTHER, G.; BLOEMHOF, J.; VAN NUNEN, J.; SPENGLER, T. A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks. **European Journal of Operational Research**, v. 193, n. 3, p. 670-682, 2009.

NIERO, M.; BOAS, S. H.; OLSEN, S. I. Sustainable packaging: From eco-efficiency to eco-effectiveness. In: DENMARK, T. U. O., Abstract Book-Dtu Sustain Conference 2014, 2014, Denmark Technical University of Denmark.

O'DONOVAN, G. Environmental disclosures in the annual report: Extending the applicability and predictive power of legitimacy theory. **Accounting, Auditing & Accountability Journal**, v. 15, n. 3, p. 344-371, 2002.

OLADE, U. “Unasur: Un espacio que consolida la integración energética”. Quito - Ecuador, 2012. Disponível em: < <http://www.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2012/10228.pdf> >. Acesso em: Junho 2014.

OSMANA, M. S.; ABO-SINNAB, M. A.; MOUSAB., A. A. An ϵ -dominance-based multi objetivo genetic algorithm for economic emission load dispatch optimization problem. . **Electric Power Systems Research**, v. 79, p. 1561–1567., 2009.

OTT, M.; WINTER, G.; HOFFMANN, F. J. **Guide to cradle to cradle inspired business sites**. McDonough Braungart Design Chemistry, LLC (MBDC). 2014

ÖZKAN, M. A comparative study on energy and exergy analyses of a ci engine performed with different multiple injection strategies at part load: Effect of injection pressure. **Entropy**, v. 17, p. 244-263, 2015.

- PALANICHAMY, C.; BABU, N. S. Day-night weather-based economic power dispatch. . **IEEE Trans. Power Syst.** **17 (no. 2) (May 2002)** . v. 17, n. 2, p. 469–475, 2002.
- PALANICHAMY, C.; N. SUNDAR BABU. Analytical solution for combined economic and emissions dispatch. . **Electric Power Systems Research**, v. 78 p. 1129–1137, 2008.
- PALANICHAMY, C.; SRIKRISHNA, K. Economic thermal power dispatch with emission constraint. **Journal of the Institution of Engineers (India)**, v. 72, n. April, p. 11-18, 1991.
- PARK, H.-S.; BEHERA, S. K. Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 478-485, 2014.
- PARLAK, A.; YASAR, H.; ELDOGAN, O. The effect of thermal barrier coating on a turbo-charged diesel engine performance and exergy potential of the exhaust gas. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 3, p. 489-499, 2005.
- PASSETTI, E.; TENUCCI, A. Eco-efficiency measurement and the influence of organisational factors: Evidence from large italian companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 122, p. 228-239, 2016.
- PATTERSON, M. G. What is energy efficiency?: Concepts, indicators and methodological issues. **Energy policy**, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.
- PDE DE ENERGIA, P. D. D. E. **2021/ministério de minas e energia**. 2012
- PETERS, T. J.; WATERMAN, R. H.; JONES, I. In search of excellence: Lessons from america's best-run companies. **Yönetim (administration)**, v. 7, n. 24, p. 53-56, 1996.
- POHEKAR, S.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 8, n. 4, p. 365-381, 2004.
- PRADHAN, M.; ROY, P. K.; PAL, T. Grey wolf optimization applied to economic load dispatch problems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 83, p. 325-334, 2016.
- PS, K.; AG, K.; DP, K. Combined economic and emission dispatch using improved back propagation neural network. **Int J Electr Mach Power Syst**, v. 28, p. 31–44, 2000.
- PURKAYASTHA, B.; SINHA, N. Optimal combined economic and emission load dispatch using modified nsga-ii with adaptive crowding distance. **International**

Journal of Information Technology and Knowledge Management, v. 2, No. 2, p. 553-559, 2010.

R.A., F.; GALLOPOULOS, N. E. "Strategies for manufacturing" **Scientific American** v. 261 n. 3, p. 144–152, 1989.

RAKOPOULOS, C. D.; GIAKOUMIS, E. G. Second-law analyses applied to int. Comb.Engines operation. **Progress in Energy&Comb. Science** v. 32, n. 1, p. 2–47, 2006.

RAKOPOULOS, C. D.; MICHOS, C. N. Generation of combustion irreversibilities in a spark ignition engine under biogas–hydrogen mixtures fueling. **Int. J. Hydrogen Energy** v. 34, n. 10, p. 4422-4437, 2009.

RAMOS, T. C.; SOBRINHO, M. F.; DOS SANTOS, W. L. P. Concepções de inter-relações ciência-tecnologia-sociedade na temática matriz energética: Um estudo com licenciandos em física. 2016a.

RAMOS, T. C.; SOBRINHO, M. F.; DOS SANTOS, W. L. P. Concepções de inter-relações ciência-tecnologia-sociedade na temática matriz energética: Um estudo com licenciandos em física [doi] 10.5216/rir. V11i2. 38070. **Itinerarius Reflectionis**, v. 11, n. 2, p. 1-13, 2016b.

RASHIDI, K.; SAEN, R. F. Measuring eco-efficiency based on green indicators and potentials in energy saving and undesirable output abatement. **Energy Economics**, v. 50, p. 18-26, 2015.

RAZMARA, M.; BIDARVATAN, M.; SHAHBAKHTI, M.; ROBINETT, R. Optimal exergy-based control of internal combustion engines. **Applied Energy**, v. 183, p. 1389-1403, 2016.

REITH, C. C.; GUIDRY, M. J. Eco-efficiency analysis of an agricultural research complex. **Journal of Environmental Management**, v. 68, n. 3, p. 219-229, 2003.

RIBEIRO, B. S.; MARTINS, J.; NUNES, A. Generation of entropy in spark ignition engines. **Int. J. of Thermodynamics**, v. Vol. 10, n. 2, p. pp. 53-60, 2007.

RODRIGUES, F. A.; SUMIOSHI, S. S. **Análise de eficiência energética em motores à combustão interna**. Centro Universitario FEI. Brasil, p.1. 2010

RODRIGUES, L.; BACCHI, M. R. P. **Políticas públicas e a demanda energética por combustíveis leves no Brasil, 2003 a 2013**. ANPEC-Associação Nacional dos Centros de Pósgraduação em Economia [Brazilian Association of Graduate Programs in Economics]. 2016

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Exergy–cost–energy–mass analysis of thermal systems and processes. **Energy Conv.& Management** v. 44, n. 10, p. 1633–1651, 2003.

ROY, P. K.; BHUI, S. Multi-objective quasi-oppositional teaching learning based optimization for economic emission load dispatch problem. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 53, p. 937-948, 2013.

SACHS, Ignacy. **Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente**. São Paulo: Nobel, 1993.

SAHIN, Z. **The research for increasing exergy efficiency of energy plants with gas-solid fuels**. 2006. MSc Thesis Dept of Mech. Eng, ZKU Graduate School of Natural&Applied Sciences, Zonguldak.

SAIDUR, R.; REZAEI, M.; MUZAMMIL, W.; HASSAN, M.; PARIA, S.; HASANUZZAMAN, M. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5649-5659, 2012.

SAKA, M., TEZCAN, S. S., EKE, I., & TAPLAMACIOGLU, M. C . Economic load dispatch using vortex search algorithm. In: **Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017 4th International Conference on**. IEEE, 2017. p. 77-81.

SALGA, S.; VANESSA, L.; CACERES, M.; ANDRES, F. **Diseño termo-hidráulico de una caldera para recuperar la energía de los gases de escape de una turbina de gas**. 2010. 204 Graduación (Graduación). Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Diseño termo-hidráulico de una caldera para recuperar la energía de los gases de escape de una turbina de gas, Guayaquil- Ecuador.

SALGADO, V. G. **Proposta de indicadores de ecoeficiencia para o transporte de gás natural**. 2004. 248 (Mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

SANTAMARÍA, A. F. A.; CARO, I. D. B.; SANTAMARÍA, J. R. A. Análisis exergético de un motor de automoción operando con gas natural: Efecto de la configuración del kit de conversión y del sistema de encendido. **Revista Facultad de Ingeniería** v. 38 p. 40-52., 2006.

SARICA, K.; OR, I. Efficiency assessment of turkish power plants using data envelopment analysis. **Energy**, v. 32, n. 8, p. 1484-1499, 2007.

SARKIS, J.; CORDEIRO, J. J. Ecological modernization in the electrical utility industry: An application of a bads-goods dea model of ecological and technical efficiency. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 2, p. 386-395, 2012.

SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L. Sustainability and sustainable development: A taxonomy in the field of literature. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 1, p. 01-22, 2014.

SAVITZ, A. **The triple bottom line: How today's best-run companies are achieving economic, social and environmental success--and how you can too.** San Francisco California: John Wiley & Sons, 2012.

SAYIN, C.; HOSOZ, M.; CANAKCI, M.; KILICASLAN, I. Energy and exergy analyses of a gasoline engine. **Int. J Energy Research**, v. 31, n. 3, p. 259-273, 2007.

SCHALTEGGER, S.; BURRITT, R. **Contemporary environmental accounting: Issues, concepts and practice.** England: Greenleaf 2000. 462.

SCHALTEGGER, S.; MÜLLER, K.; HINDRICHSEN, H. **Corporate environmental accounting.** New York: Wiley Chichester, 1996. 306.

SCHALTEGGER, S.; STURM, A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten. **die Unternehmung**, p. 273-290, 1990.

SCHALTEGGER, S.; STURM, A. **Environmentally oriented decisions in companies.** Germany: Bern/Stuttgart: Haupt, 1992. 435.

SCHALTEGGER, S.; SYNNESTVEDT, T. The link between 'green' and economic success: Environmental management as the crucial trigger between environmental and economic performance. **Journal of environmental management**, v. 65, n. 4, p. 339-346, 2002.

SCHMIDHEINY, S. **Changing course: A global business perspective on development and the environment.** Cambridge, Massachusetts: MIT press, 1992. 374.

SCHUTZE, A. M. **A demanda de energia elétrica no brasil.** 2015. 120 Doutorado (Doutorado). Economia, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

SEIDEL, S.; SZÉKELY, N.; VOM BROCKE, J. **Green is: Are we still thinking in mere economic imperatives or are we striving for eco-effectiveness?** Twenty-first Americas Conference on Information Systems, Puerto Rico, 2015. ECO-GOALS, G. I. A. Puerto rico: Green IS and Eco-Goals: 1-12 p. 2015.

SELVA KUMAR, A.; DHANUSHKODI, K.; JAYA KUMAR, J.; KUMAR, C.; CHARLIE, P. Particle swarm optimization solution to emission and economic dispatch problem, . In: IEEE, IEEE Conference Tencon, 2003. p.paper ID-075.

SENTHIL, K.; MANIKANDAN, K. Economic thermal power dispatch with emission constraint and valve point effect loading using improved tabu search algorithm. **International Journal of Computer Applications**, v. 3, n. 9, p. 6-11, 2010.

SHAMEER, P. M.; RAMESH, K. Experimental evaluation on performance, combustion behavior and influence of in-cylinder temperature on nox emission in a di diesel engine using thermal imager for various alternate fuel blends. **Energy**, v. 118, p. 1334-1344, 2017.

SHAOJUN XIA; LINGEN CHEN; SUN., F. Optimal paths for minimizing entransy dissipation during heat transfer processes with generalized radiative heat transfer law. . **Applied Mathematical Modelling** . v. 34, p. 2242–2255, 2010.

SHENOY, M. Industrial ecology in developing countries. In: (Ed.). **Taking stock of industrial ecology**: Springer, 2016. p.229-245.

SHERRATT, A. Cradle to cradle. In: SPRINGER (Ed.). **Encyclopedia of corporate social responsibility**. Berlin: Springer, 2013. p.630-638..

SINKIN, C.; WRIGHT, C. J.; BURNETT, R. D. Eco-efficiency and firm value. **Journal of Accounting and Public Policy**, v. 27, n. 2, p. 167-176, 2008.

SNYDER, W. L.; POWEL, H. D.; RAYBURN, J. C. Dynamic programming approach to unit commitment,. **IEEE Trans. Power Syst.**, v. 2, n. 2, p. 339–350, 1987.

SU, C.-T.; CHIEN-TUNG LIN. New approach with a hopfield modeling framework to economic dispatch, . **IEEE Trans. Power Syst.** , v. 15, n. 2, p. 541–545, 2000.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Dea radial measurement for environmental assessment and planning: Desirable procedures to evaluate fossil fuel power plants. **Energy Policy**, v. 41, p. 422-432, 2012a.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Efficiency-based rank assessment for electric power industry: A combined use of data envelopment analysis (dea) and dea-discriminant analysis (da). **Energy Economics**, v. 34, n. 3, p. 634-644, 2012b.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; SNELL, M. A. Dea environmental assessment: Measurement of damages to scale with unified efficiency under managerial disposability or environmental efficiency. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 12, p. 7300-7314, 2013.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M.; SUGIYAMA, M. Dea window analysis for environmental assessment in a dynamic time shift: Performance assessment of us coal-fired power plants. **Energy Economics**, v. 40, p. 845-857, 2013

SUMAN, M.; RAO, M. V. G.; HANUMAIAH, A.; RAJESH, K. Solution of economic load dispatch problem in power system using lambda iteration and back propagation neural network methods. **International Journal on Electrical Engineering and Informatics**, v. 8, n. 2, p. 347, 2016.

SWARUP KS; KUMAR PR. A new evolutionary computation technique for economic dispatch with security constraints. . **Electr Power Energy Syst**, v. 28, n. 4, p. 273–283, 2006.

SZARGUT, J. International progress in second law analysis. . **Energy**, v. 5, p. 709-718., 1980.

SZARGUT., J. **Exergy method: Technical and ecological applications**. . WIT, 2005. 164 pages.

SZEKELY, F.; KNIRSCH, M. Responsible leadership and corporate social responsibility:: Metrics for sustainable performance. **European Management Journal**, v. 23, n. 6, p. 628-647, 2005.

TALATI, S.; ZHAI, H.; MORGAN, M. G. Viability of carbon capture and sequestration retrofits for existing coal-fired power plants under an emission trading scheme. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 23, p. 12567-12574, 2016.

TD, K.; ME, E.-H.; F, E.-H. Optimal environmental dispatching of electric power systems via an improved hopfield neural network model. **IEEE Trans Power Systems**, v. 10, n. 3, p. 1559–1565., 1995.

TINKER, T.; GRAY, R. Beyond a critique of pure reason: From policy to politics to praxis in environmental and social research. **Accounting, Auditing & Accountability Journal**, v. 16, n. 5, p. 727-761, 2003.

TOXOPEUS, M.; DE KOEIJER, B.; MEIJ, A. Cradle to cradle: Effective vision vs. Efficient practice? **Procedia CIRP**, v. 29, p. 384-389, 2015.

TYTECA, D. On the measurement of the environmental performance of firms—a literature review and a productive efficiency perspective. **Journal of environmental management**, v. 46, n. 3, p. 281-308, 1996.

VALERO, A.; USÓN, S.; TORRES, C.; VALERO., A. Application of thermoeconomics to industrial ecology. **Entropy** v. 12 p. 591-612, 2010.

VAN CAMPENHOUDT, L.; QUIVY, R. **Manuel de recherche en sciences sociales**. 4e edition. Paris: Dunod, 2011. 272.

VAN DEN BERGH, J. C. Externality or sustainability economics? **Ecological Economics**, v. 69, n. 11, p. 2047-2052, 2010.

VELLANI, C. L.; DE SOUZA RIBEIRO, M. Sustentabilidade e contabilidade. **Revista Contemporânea de Contabilidade**, v. 6, n. 11, p. 187-206, 2010.

VERKHIVKER, G. P.; KOSOY, B. V. On the exergy analysis of power plants. **Energy Conversion and Management**, v. 42, p. 2053 – 2059 2001.

VIANA, G.; SILVA, A. L. M. Um modelo para projeções para demanda por energia elétrica, 2009–2017 para o setor residencial no brasil. **Rev. Bras. Energy**, v. 20, p. 107-126, 2014.

VILLA, A.; CAMPOS, R.; DUTRA, J.; RECARTE, J.; GUERRERO, H. Numerical analysis of energetic, exergetic and ecological efficiency by using natural gas and biogas in cogeneration system. **International Journal of Mechanical Engineering and Automation**, v. 1, n. 1, p. 31-40, 2014.

VUKADINOVIĆ, B.; POPOVIĆ, I.; DUNJIĆ, B.; JOVOVIĆ, A.; VLAJIĆ, M.; STANKOVIĆ, D.; BAJIĆ, Z.; KIJEVČANIN, M. Correlation between eco-efficiency measures and resource and impact decoupling for thermal power plants in serbia. **Journal of Cleaner Production**, v. 138, p. 264-274, 2016.

WAEEL, I.A; ABDO, M; BEDAIR, G; HASSANEEN A. E. Thermal performance of a diffusion absorption refrigeration system driven by waste heat from diesel engine exhaust gases. **Applied Thermal Engineering**, v. 114, p. 621-630, 2017.

WANG, L.; LI, L.-P. An effective differential harmony search algorithm for the solving non-convex economic load dispatch problems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 44, n. 1, p. 832-843, 2013.

WANG, L.; SINGH, C. Environmental/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm. **Electric Power Systems Research**, v. 77, n. 12, p. 1654-1664, 10// 2007. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779606002859>
http://ac.els-cdn.com/S0378779606002859/1-s2.0-S0378779606002859-main.pdf?_tid=9dea0210-cce4-11e4-aa87-00000aacb35d&acdnat=1426624480_378a4297c0fd67420a157aa134874b02>.

WANG, W.; CHENG, X.; LIANG, X. Entropy and entransy analyses and optimizations of the rankine cycle. **Energy Conversion and Management** v. 68, p. 82–88, 2013.

WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. Heat transfer characteristics of nanofluids: A review, 46 (1) **Int. J. Therm. Sci.**, v. 46, n. 1, p. 1–19., 2007.

WCED, U. G. H. B. Our common future. In: TOLBA, M. K. (Ed.). **Earth and us: Population, resources, environment, development**. Oxford Great Britain: Butterworth - Heinemann, v.1, 1987. p.115.

WEBB, R.; BERGIES, A. Heat transfer enhancement: Second generation technology. **Mech. Eng.**, v. 106, n. 6, p. 60–67, 1983.

WEIGAND, B.; SPRING, S. Multiple jet impingement – a review **Heat Transfer Res**, v. 42, n. 2, p. 101–142, 2011.

WELFORD, R. **Hijacking environmentalism: Corporate responses to sustainable development**. 1. Oxford Great Britain: Routledge, 2013.

WHITING, K.; CARMONA, L. G.; SOUSA, T. A review of the use of exergy to evaluate the sustainability of fossil fuels and non-fuel mineral depletion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 202–211, 2017.

WON, S. H.; HAAS, F. M.; DOOLEY, S.; EDWARDS, T.; DRYER, F. L. Reconstruction of chemical structure of real fuel by surrogate formulation based upon combustion property targets. **Combustion and Flame**, v. 183, p. 39–49, 2017.

WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. **Power generation, operation, and control**. Third. USA: John Wiley & Sons, 2014. 656.

WU, J.; LIANG, X. Application of entransy dissipation extremum principle in radiative heat transfer optimization. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v. 51, n. 8, p. 1306–1314, 2008.

XIA, S.; CHEN, L.; SUN, F. Entransy dissipation minimization for one-way isothermal mass transfer processes with a generalized mass transfer law. **Scientia Iranica C** v. 19, n. 6, p. 1616–1625., 2012.

XU, G.; JIA, M.; LI, Y.; XIE, M.; SU, W. Multi-objective optimization of the combustion of a heavy-duty diesel engine with low temperature combustion (LTC) under a wide load range:(ii) detailed parametric, energy, and exergy analysis. **Energy**, v. 139, p. 247–261, 2017.

XU, Y.-C.; CHEN, Q. An entransy dissipation-based method for global optimization of district heating networks. **Energy and Buildings** . v. 48, p. 50–60, 2012.

XUETAO CHENG; LIANG., X. Entransy flux of thermal radiation and its application to enclosures with opaque surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer** . v. 54, p. 269–278, 2011.

XUETAO CHENG; LIANG., X. Entransy loss in thermodynamic processes and its application. **Energy** v. 44, p. 964–972, 2012.

XUETAO CHENG; LIANG., X. Discussion on the entransy expressions of the thermodynamic laws and their applications. **Energy**, v. 56, p. 46–51, 2013a.

XUETAO CHENG; LIANG., X. From thermomass to entransy. . **International Journal of Heat and Mass Transfer** v. 62 p. 174–177, 2013b.

XUETAO CHENG; QINZHAO ZHANG; LIANG., X. Analyses of entransy dissipation, entropy generation and entransy- dissipation-based thermal resistance on heat exchanger optimization. . **Applied Thermal Engineering** v. 38, p. 31-39, 2012.

Y. UST; B. SAHIN; A. KODAL. Optimization of a dual cycle cogeneration system based on a new exergetic performance criterion, app. En., 84(11), 1079–1091,2007. **App. Energy** , , v. 84 n. 11, p. 1079–1091, 2007.

YALCINOZ, T.; ALTUN, H. Environmentally constrained economic dispatch via a genetic algorithm with arithmetic crossover. Africon Conference in Africa, 2002. IEEE AFRICON. 6th, 2002, IEEE. p.923-928.

YALCINOZ, T.; KSOY, O. K. A multiobjective optimization method to environmental economic dispatch. . **Electrical Power and Energy Systems**, v. 29, n. 42–50, 2007.

YAN X, Q. V. An efficient predictor-corrector interior point algorithm for security-constrained economic dispatch. . **IEEE Trans Power Syst** v. 12, n. 2, p. 803–810, 1997.

YAN, Z. Comment on ‘an ecological optimization criterion for finitetime heat engines’ **J. Appl. Phys.**, v. 73, p. 35-83, 1993.

YEO, Z.; LOW, J. S. C.; NG, R.; TAN, H. X. Planning for environmental sustainability improvements—a concept based on eco-efficiency improvement. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 526-531, 2016.

YH, H.; LJ, L.; XY, X.; YW., W. Economic dispatch of power systems based on the modified particle swarm optimization algorithm. . In: IEEE, Proceedings of IEEE/PES transmission and distribution conference and exhibition: Asia and Pacific Dalian, China., 2005, China. IEEE. p.1-6.

YIN, R. K. **Case study research: Design and methods, revised edition**. 5. London: Sage Publications Inc., 2014.

YOLLES, M.; FINK, G. The sustainability of sustainability. **Business Systems Review**, v. 3, n. 2, p. 1-32, 2014.

YOUN, S.; YANG, M. G. M.; HONG, P.; PARK, K. Strategic supply chain partnership, environmental supply chain management practices, and performance outcomes: An empirical study of korean firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 56, p. 121-130, 2013.

YOUNG, W.; HWANG, K.; MCDONALD, S.; OATES, C. J. Sustainable consumption: Green consumer behaviour when purchasing products. **Sustainable development**, v. 18, n. 1, p. 20-31, 2010.

YUAN X; L, W.; T, Y.; Y, Z.; B, C.; BA, Y. A modified differential evolution approach for dynamic economic dispatch with valve-point effects. . **Energy Convers Manage**, v. 49, n. 12, p. 3447–3453, 2008.

ZHANG, B.; BI, J.; FAN, Z.; YUAN, Z.; GE, J. Eco-efficiency analysis of industrial system in china: A data envelopment analysis approach. **Ecological economics**, v. 68, n. 1, p. 306-316, 2008.

ZHANG, L.; LIU, X.; JIANG., Y. Application of entransy in the analysis of hvac systems in buildings . . **Energy** v. 53, p. 332-342, 2013.

ZHANG, R.; ZHOU, J.; MO, L.; OUYANG, S.; LIAO, X. Economic environmental dispatch using an enhanced multi-objective cultural algorithm. **Electric Power Systems Research**, v. 99, p. 18-29, 2013

ZX, L.; GLOVER JD. A zoom feature for a programming solution to economic dispatch including transmission losses. . **IEEE Trans Power Syst**, v. 7, n. 3, p. 544–550, 1992.

*Anexo 1***Tabela 5.3. Composição do gás natural da Usina X.**

Composição do combustível em %	
Nitrogênio	13,86
Metano (CH ₄)	75,2
n-Hexano (C ₆ H ₁₄)	0,0076
CO ₂	0,19
Etano (C ₂ H ₆)	10,84
Propano (C ₃ H ₈)	0,09
i-Butano (C ₄ H ₁₀)	0,0674
n- Butano (C ₄ H ₁₀)	0,0681
i - Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,0139
n- Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,0105

Tabela 5. 4. Composição do gás natural da Usina Y.

Composição do combustível em %	
Nitrogênio	0,8189
Metano (CH ₄)	95,93
n Hexano (C ₆ H ₁₄)	0,0096
CO ₂	0,4219
Etano (C ₂ H ₆)	2.0932
Propano (C ₃ H ₈)	0,5322
i-Butano (C ₄ H ₁₀)	0,0800
n-Butano (C ₄ H ₁₀)	0,0801
i-Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,0166
n-Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,0128

*Anexo 2.****Tabela 5.5. Principais dados dos motores à gás da Usina X na hora da instalação para potência máxima.***

Motor	UGG1	UGG2	UGG3	UGG4	UGG5
Consumo de combustível (m ³ /h)	271	648,9	641,2	724,35	723,35
Consumo de combustível (l/s)	75,28	180,25	178,11	201,21	200,93
Potência fornecida pelo motor (kW)	3433	3438	3438	3434,5	3433,5
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	398	404	407	401	408
Motor	UGG6	UGG7	UGG8	UGG9	UGG10
Consumo de combustível (m ³ /h)	647,4	639,05	636,05	623,09	662,2
Consumo de combustível (l/s)	179,83	177,51	176,68	173,08	183,94
Potência fornecida pelo motor (kW)	3434	3436,5	3432,5	3444	3432,5
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	408	404	406	405,5	400
Motor	UGG 11	UGG 12	UGG 13	UGG 14	UGG 15
Consumo de combustível (m ³ /h)	654,85	628,4	627,1	633,9	630,65
Consumo de combustível (l/s)	181,90	174,56	174,19	176,08	175,18
Potência fornecida pelo motor (kW)	3445	3437,5	3436	3438	3447,5
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	407	405	406	404	403

Motor	UGG 16	UGG 17	UGG 18	UGG 19	UGG 20
Consumo de combustível (m ³ /h)	623,55	629,5	750,2	634,5	625,4
Consumo de combustível (l/s)	173,21	174,86	208,39	176,25	173,72
Potência fornecida pelo motor (kW)	3443	3432,5	3436	3434,5	3434,5
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	403,5	409	404	402	406
Motor	UGG 21	UGG 22	UGG 23		
Consumo de combustível (m ³ /h)	640,4	652,35	649,8		
Consumo de combustível (l/s)	177,89	181,21	180,50		
Potência fornecida pelo motor (kW)	3436	3438	3434,5		
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	412,5	411	410		

Anexo 3**Tabela 5.6. Eficiência energética dos motores à gás da Usina X no momento da instalação.**

Motor	UGG1	UGG2	UGG3	UGG4	UGG5
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,1	10,1	10,1	10,1	10,09
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,743	0,743	0,743	0,743	0,741
Valor calorífico inferior (kJ/kg)	48936,7	48936,7	48936,7	48936,7	49020,2
Fluxo de combustível (m ³ /h)	721	648,9	641,2	724,35	723,35
Fluxo de combustível (l/s)	200,28	180,25	178,11	201,21	200,93
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1488	0,1339	0,1323	0,1495	0,1489
Potencia fornecida (kW)	3433	3438	3438	3434,5	3433,5
Potencia elétrica (kW)	3347	3353	3358	3349	3348
Fluxo de calor - Q (kJ/s)	7282,1	6553,8	6476,1	7315,9	7298,6
Eficiência do motor	47,14	52,45	53,08	46,95	47,04
Eficiência do motor-gerador	45,96	51,16	51,85	45,78	45,87
Motor	UGG6	UGG7	UGG8	UGG9	UGG10
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,1	10,1	10,1	10,09	10,09
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,743	0,743	0,743	0,74	0,74
Valor calorífico inferior (kJ/kg)	48936,7	48936,7	48936,7	49086,4	49086,4
Fluxo de combustível (m ³ /h)	647,4	639,05	636,05	623,095	662,2
Fluxo de combustível (l/s)	179,83	177,51	176,68	173,08	183,94
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1336	0,1319	0,1313	0,1281	0,1361
Potencia fornecida (kW)	3434	3436,5	3432,5	3444	3432,5
Potencia elétrica (kW)	3347	3350	3345	3338	3346
Fluxo de calor - Q (kJ/s)	6538,7	6454,4	6424,1	6287,0	6681,5
Eficiência do motor	52,51	53,24	53,43	54,77	51,37
Eficiência do motor-gerador	51,18	51,90	52,07	53,09	50,08

Motor	UGG11	UGG12	UGG13	UGG14	UGG15
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,09	10,1	10,09	10,1	10,11
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,74	0,742	0,741	0,742	0,744
Valor calorífico inferior (kJ/kg)	49086,4	49002,7	49020,2	49002,7	48919,3
Fluxo de combustível (m ³ /h)	654,85	628,4	627,1	633,9	630,65
Fluxo de combustível (l/s)	181,90	174,56	174,19	176,08	175,18
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1346	0,1295	0,1291	0,1307	0,1303
Potencia fornecida (kW)	3445	3437,5	3436	3438	3447,5
Potencia elétrica (kW)	3340	3332	3350	3349	3342
Fluxo de calor - Q (kJ/s)	6607,4	6346,8	6327,4	6402,3	6375,8
Eficiência do motor	52,13	54,16	54,30	53,69	54,07
Eficiência do motor-gerador	50,54	52,49	52,94	52,30	52,41
Motor	UGG16	UGG17	UGG18	UGG19	UGG20
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,1	10,1	10,09	10,1	10,1
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,741	0,742	0,741	0,743	0,743
Valor calorífico inferior (kJ/kg)	49068,8	49002,7	49020,2	48936,7	48936,7
Fluxo de combustível (m ³ /h)	623,55	629,5	750,2	634,5	625,4
Fluxo de combustível (l/s)	173,21	174,86	208,39	176,25	173,72
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1283	0,1297	0,1544	0,1310	0,1291
Potencia fornecida (kW)	3443	3432,5	3436	3434,5	3434,5
Potencia elétrica (kW)	3338	3347	3350	3349	3349
Fluxo de calor - Q (kJ/s)	6297,8	6357,9	7569,5	6408,4	6316,5
Eficiência do motor	54,66	53,98	45,39	53,59	54,37
Eficiência do motor-gerador	53	52,64	44,25	52,25	53,02

Motor	UGG21	UGG22	UGG23
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,11	10,11	10,12
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,74	0,741	0,74
Valor calorífico inferior (kJ/kg)	49183,78	49117,41	49232,43
Fluxo de combustível (m ³ /h)	640,4	652,35	649,8
Fluxo de combustível (l/s)	177,89	181,21	180,50
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1316	0,1343	0,1336
Potencia fornecida (kW)	3436	3438	3434,5
Potencia elétrica (kW)	3349	3352	3349
Fluxo de calor - Q (kJ/s)	6474,44	6595,25	6575,97
Eficiência do motor	53,07	52,12	52,22
Eficiência do motor-gerador	51,72	50,82	50,92

Anexo 4

Tabela 5.7: Eficiência energética e exergetica dos motores à gás da Usina Y no momento da instalação.

Motor	UGG2	UGG 3	UGG 4	UGG 5	UGG 6	UGG 7
Consumo de combustível (m ³ /h)	624,4	640,55	641,6	628,75	556,4	650,4
Consumo de combustível (l/s)	173,44	177,93	178,22	174,65	154,56	180,67
Potência de saída (kW)	3439	3432	3434	3430,5	3433,5	3435
Temperatura dos gases de exaustão °C	383	410	406	408	433	410
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,16	10,13	10,13	10,13	10,13	10,1
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,75	0,742	0,742	0,742	0,742	0,743
Número de Metano	88,5	89,72	89,72	89,72	89,74	90
Temperatura do combustível	60	59	60	60	59	59
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	51200	51200	51200	51200	51200	51200
Fluxo de combustível (kg/s)	0,130	0,132	0,132	0,129	0,114	0,134
Exergia do combustível (kJ/s)	6660,2	6759,6	6770,7	6635,1	5871,6	6872,8
Eficiência exergetica	51,63	50,77	50,72	51,70	58,48	49,98
LHV (kJ/kg)	48768	49148	49148	49148	49148	48936
Fluxo de calor Q(kJ/s)	6343,9	6488,7	6499,4	6369,2	5636,3	6569,0
Eficiência energética	54,21	52,89	52,84	53,86	60,92	52,29
Motor	UGG 8	UGG9	UGG 10	UGG 11	UGG 12	UGG 13
Consumo de combustível (m ³ /h)	629,25	562,9	639,4	632,2	635,4	564,2
Consumo de combustível (l/s)	174,79	156,36	177,61	175,61	176,50	156,72
Potência de saída (kW)	3435	3431,5	3434	3434	3438	3432,5
Temperatura dos gases de exaustão °C	402	450	411,5	402	408	399
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,1	10,16	10,12	10,1	10,1	10,14

Densidade do gás (Kg/m ³)	0,741	0,752	0,745	0,741	0,741	0,745
Número de Metano	90,4	88,3	89,7	90,4	90,3	89,3
Temperatura do combustível	59,5	60	59	59	59	59
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	51200	51200	51200	51200	51200	51200
Fluxo de combustível (kg/s)	0,129	0,1175	0,1323	0,1301	0,1307	0,11678
Exergia do combustível (kJ/s)	6631,4	6020,2	6774,7	6662,5	6696,2	5978,0
Eficiência exergetica	51,80	57,00	50,69	51,54	51,34	57,42
LHV (kJ/kg)	49068	48638	48902	49068	49068	48998
Fluxo de calor Q(kJ/s)	6355,4	5719,0	6470,7	6385,2	6417,5	5720,9
Eficiência energética	54,05	60,00	53,07	53,78	53,57	60,00
Motor	UGG 14	UGG 15	UGG 16	UGGN 17	UGG 18	UGG 19
Consumo de combustível (m ³ /h)	660,95	555,8	645,25	642,4	650,35	533,1
Consumo de combustível (l/s)	183,60	154,39	179,24	178,44	180,65	148,08
Potência de saída (kW)	3432	3434	3442,5	3437	3439	3432,5
Temperatura dos gases de exaustão °C	405	452	407	407	411	396
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,13	10,12	10,09	10,09	10,1	10,1
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,745	0,741	0,739	0,738	0,74	0,74
Número de Metano	89,4	90,1	90,8	91	90,5	90,4
Temperatura do combustível	60	59	60	59	60	60
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	51200	51200	51200	51200	51200	51200
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1367	0,1144	0,1324	0,1316	0,13366	0,1095
Exergia do combustível (kJ/s)	7003,1	5857,3	6781,7	6742,6	6844,5	5610,5
Eficiência exergetica	49,01	58,63	50,76	50,97	50,24	61,18
LHV (kJ/kg)	48950	49165	49152	49219	49135	49135
Fluxo de calor Q(kJ/s)	6695,4	5624,7	6510,5	6481,8	6568,5	5384,3
Eficiência energética	51,26	61,05	52,88	53,03	52,36	63,75

Motor	UGG 20	UGG 21	UGG 22	UGG 23	UGG 24
Consumo de combustível (m ³ /h)	546,1	643,25	654,25	539,4	639,05
Consumo de combustível (l/s)	151,69	178,68	181,74	149,83	177,51
Potência de saída (kW)	3432	3434,5	3435,5	3431	3431,5
Temperatura dos gases de exaustão °C	401	403	403	399	412
Valor calorífico inferior (kWh/m ³)	10,11	10,09	10,09	10,09	10,12
Densidade do gás (Kg/m ³)	0,743	0,74	0,74	0,74	0,74
Número de Metano	90,1	90,8	90,8	90,8	90,2
Temperatura do combustível	59	59	60	59	60
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	51200	51200	51200	51200	51200
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1127	0,1322	0,1344	0,1108	0,1313
Exergia do combustível (kJ/s)	5770,6	6769,8	6885,6	5676,8	6725,6
Eficiência exergetica	59,47	50,73	49,89	60,44	51,02
LHV (kJ/kg)	48985	49086	49086	49086	49232
Fluxo de calor Q(kJ/s)	5521,0	6490,3	6601,3	5442,5	6467,1
Eficiência energética	62,16	52,92	52,04	63,04	53,06

Anexo 5**Tabela 5.8. Principais dados dos motores a HFO da Usina X e cálculos das eficiências na hora da instalação para diferentes valores de potência.**

MAN 01	Usina X no TESTE				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	100%	100%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	1477,0	1471,0	1114,0	773,0	439,0
Potência de saída (kW)	7694	7688	5764	3843	1912
Temperatura ambiente (°C)	21,50	22,80	26,60	26,60	27,20
Temperatura ambiente (K)	294,65	295,95	299,75	299,75	300,35
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	384,00	382,00	353,00	343,00	365,00
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	657,15	655,15	626,15	616,15	638,15
Pressão ambiente (bar)	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Pressão na câmara de combustão (bar)	23,90	23,90	17,90	11,90	5,90
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	41964	41964	41964	41964	41964
Fluxo de combustível (kg/s)	0,41	0,41	0,31	0,21	0,12
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	17216,	17146,	12985,	9010,6	5117,3
Exergia do combustível (kJ/s)	16821	16753	12687	8803,6	4999,7
Densidade do HFO (kg/m ³)	930,00	930,00	930,00	930,00	930,00
Eficiência energética	44,69	44,84	44,39	42,65	37,36
Eficiência exergetica	45,74	45,89	45,43	43,65	38,24
Eficiência segundo Entransia	47,34	47,68	48,01	46,24	40,37

MAN02	Usina X no TESTE				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	100%	94%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	3593,0	3413,0	2724,0	1920,0	1110,0
Potência de saída (kW)	18920	17820	14170	9536	4915
Temperatura ambiente (°C)	37,50	44,90	44,00	47,10	48,00
Temperatura ambiente (K)	310,65	318,05	317,15	320,25	321,15
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	393,00	403,00	387,00	390,00	383,00
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	666,15	676,15	660,15	663,15	656,15
Pressão ambiente (bar)	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Pressão na câmara de combustão (bar)	22,60	21,30	16,90	11,40	5,90
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	42245	42245	42245	42245	42245
Fluxo de combustível (kg/s)	1,00	0,95	0,76	0,53	0,31
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	42162	40050	31965	22530	13025
Exergia do combustível (kJ/s)	40920	38870	31023	21866	12641
Densidade do HFO (kg/m ³)	930,00	930,00	930,00	930,00	930,00
Eficiência energética	44,87	44,49	44,33	42,32	37,73
Eficiência exergética	46,24	45,84	45,68	43,61	38,88
Eficiência segundo Entransia	49,61	50,07	50,02	48,14	43,14

MAN 03	Usina X no TESTE				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	100%	110%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	3578,0	4020,0	2744,0	1928,0	1059,0
Potência de saída (kW)	18910	20800	14190	9464	4763
Temperatura ambiente (°C)	19,90	22,50	22,80	24,40	24,00
Temperatura ambiente (K)	293,05	295,65	295,95	297,55	297,15
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	383,00	419,00	369,00	370,00	366,00
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	656,15	692,15	642,15	643,15	639,15
Pressão ambiente (bar)	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Pressão na câmara de combustão (bar)	22,60	24,80	16,90	11,30	5,70
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	41908	41908	41908	41908	41908
Fluxo de combustível (kg/s)	0,99	1,12	0,76	0,54	0,29
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	41651	46797	31943	22444	12327
Exergia do combustível (kJ/s)	40749	45783	31251	21957	12060
Densidade do HFO (kg/m ³)	930,00	930,00	930,00	930,00	930,00
Eficiência energética	45,40	44,45	44,42	42,17	38,64
Eficiência exergetica	46,41	45,43	45,41	43,10	39,49
Eficiência segundo Entransia	47,89	46,97	47,35	45,14	41,35

*Anexo 6****Tabela 5.9. Principais dados do motor Bicombustível da Usina X e cálculo das eficiências na hora da instalação.***

MAN 05	Usina X no TESTE	
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência	
	ÓLEO	GAS
VARIÁVEIS	100%	100%
Consumo de combustível (kg/h)	3.591	4.141
Potência de saída (kW)	17.920	17.904
Temperatura ambiente (°C)	35	35
Temperatura ambiente (K)	308,15	308,15
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	394	395
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	667,15	668,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	140	143
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	39341
LHV (kJ/kg)	40.928	39.078
Fluxo de combustível (kg/s)	0,9975	1,15043
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	40825,68	44956,85
Exergia do combustível (kJ/s)	40897,5	45259,41
Eficiência energética	43,89	39,82
Eficiência exérgica	43,81	39,55
Eficiência segundo Entransia	48,17	43,69

*Anexo 7***Tabela 5.10. Principais dados dos motores a HFO da Usina Y no teste para diferentes valores de potência.**

MAN 01	Usina Y no Teste				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	110%	100%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	1665,0	1470,0	1130	790,0	447,0
Potência de saída (kW)	8.446	7.697	5.798	3.881	1.939
Temperatura ambiente (°C)	25,15	21,75	21,6	24,1	25,55
Temperatura ambiente (K)	298,3	294,9	294,7	297,25	298,7
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	418,065	379,38	342,0	337,44	361
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	691,215	652,53	615,2	610,59	634,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	26,2	23,8	18	12	6
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	42700	42700	42700	42700	42700
Fluxo de combustível (kg/s)	0,4625	0,4083	0,313	0,2194	0,1241
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	19748,8	17435,8	13403	9370	5301
Exergia do combustível (kJ/s)	18962,5	16741,6	12869	8997,2	5090,8
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930
Eficiência energética	42,76	44,14	43,25	41,41	36,57
Eficiência exergetica	44,54	45,97	45,05	43,13	38,08
Eficiência segundo Entransia	45,50	46,82	46,17	44,60	39,35

MAN 03	Usina Y no TESTE				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	110%	100%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	3970,0	3546,0	2685,0	1876,0	1034,0
Potência de saída (kW)	20.850	18.890	14.340	9.427	4.835
Temperatura ambiente (°C)	37,95	36,25	37,5	35,2	35,1
Temperatura ambiente (K)	311,1	309,4	310,65	308,35	308,25
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	410,78	386,78	368,05	367,83	352,55
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	683,93	659,93	641,205	640,98 5	625,7
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	24,8	22,5	17,1	11,2	5,8
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	42700	42700	42700	42700	42700
Fluxo de combustível (kg/s)	1,10277	0,985	0,74583	0,5211	0,2872
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	47088	42059	31847	22251	12264
Exergia do combustível (kJ/s)	45213	40385	30579	21365	11776
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930
Eficiência energética	44,278	44,912	45,027	42,365	39,423
Eficiência exergetica	46,114	46,774	46,894	44,122	41,057
Eficiência segundo Entransia	48,785	49,557	50,135	46,849	43,782

MAN 04	Usina Y no TESTE				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	110%	101%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	3928,0	3586,0	2649,0	1886,0	1041,0
Potência de saída (kW)	20.770	19.090	14.160	9.503	4.785
Temperatura ambiente (°C)	37,3	36,9	34,25	27,65	29,95
Temperatura ambiente (K)	310,45	310,05	307,4	300,8	303,1
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	405	391	354	355	587
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	678,15	664,15	627,15	628,15	860,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	24,6	22,7	16,9	11,4	5,7
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	42700	42700	42700	42700	42700
Fluxo de combustível (kg/s)	1,0911	0,9961	0,7358	0,5238	0,2891
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	46590	42533	31420	22370	12347
Exergia do combustível (kJ/s)	44735	40840	30169	21479	11855
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930
Eficiência energética	44,579	44,881	45,066	42,480	38,753
Eficiência exergetica	46,422	46,742	46,935	44,242	40,359
Eficiência segundo Entransia	49,102	49,558	49,894	46,069	40,836

MAN 05	Usina Y no TESTE				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	110%	100%	75%	50%	25%
Consumo de combustível (kg/h)	4007,0	3620,0	2701,0	1914,0	1083,0
Potência de saída (kW)	20.820	18.980	14.270	9.606	4.798
Temperatura ambiente (°C)	43,65	42,85	41,25	44,4	45,15
Temperatura ambiente (K)	316,8	316	314,4	317,55	318,3
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	424	393	368	370	362
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	697,15	666,15	641,15	643,15	635,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	24,8	22,6	17	11,5	5,7
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	42700	42700	42700	42700	42700
Fluxo de combustível (kg/s)	1,113	1,005	0,750	0,531	0,3008
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	47527	42937	32036	22702	12845
Exergia do combustível (kJ/s)	45635,277	41227,777	30761,388	21798,333	12334,166
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930
Eficiência energética	43,806	44,204	44,542	42,313	37,351
Eficiência exergetica	45,622	46,036	46,389	44,067	38,900
Eficiência segundo Entransia	48,833	49,613	50,165	48,083	42,673

Anexo 8**Tabela 5.11. Valores da Eficiência dos motores à gás da Usina Y na atualidade**

Eficiência segundo Entransia	Eficiência exergetica	Eficiência energética	Número do Motor
40,15	39,29	39,34	Motor 2
40,43	39,42	39,47	Motor 3
40,10	40,05	40,10	Motor 4
41,84	40,95	41,00	Motor 5
41,00	40,18	40,23	Motor 6
40,16	38,94	38,99	Motor 7
40,45	38,25	38,30	Motor 8
40,72	38,84	38,89	Motor 9
41,54	40,92	40,97	Motor 10
39,70	37,71	37,76	Motor 11
40,21	39,36	39,41	Motor 12
40,55	38,67	38,72	Motor 13
40,68	39,16	39,21	Motor 14
41,80	40,22	40,28	Motor 15
41,64	40,07	40,12	Motor 16
41,04	40,99	41,04	Motor 17
41,30	40,17	40,22	Motor 18
41,69	40,38	40,43	Motor 19
40,11	39,88	39,93	Motor 20
41,32	40,36	40,41	Motor 21
43,50	42,43	42,48	Motor 22
40,42	39,36	39,41	Motor 23
39,10	39,05	39,10	Motor 24

Anexo 9

Tabela 5.12. Valores da Eficiência dos motores à gás da Usina X na atualidade

Número do motor	Eficiência energética	Eficiência exergetica	Eficiência Segundo a Entransia
1	41,6	39,4	41,8
2	37,2	35,2	37,6
3	40,7	38,5	41,0
4	41,9	39,6	42,0
5	41,0	38,8	41,1
6	40,2	38,6	40,3
7	41,8	39,5	41,9
8	41,6	39,3	41,8
9	41,8	39,6	42,0
10	41,7	39,5	42,0
11	41,2	39,0	41,9
12	40,8	38,6	41,0
13	40,9	39,2	41,1
14	41,8	39,6	42,0
15	41,2	38,9	41,4
16	41,7	39,4	41,8
17	42,0	39,7	42,6
18	41,2	38,7	41,4
19	41,1	38,8	41,7
20	41,4	39,1	41,8
21	41,6	39,1	41,7
22	41,6	39,4	41,9
23	42,1	39,8	42,4

Anexo 10**Tabela 5.13. Principais dados dos motores a HFO da Usina Y na atualidade para diferentes valores de potência.**

MAN 01	Usina Y atual					
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência					
VARIÁVEIS	90%	80%	70%	60%	50%	40%
Consumo de combustível (kg/h)	1364,0	1247,0	1103,0	922,0	753,0	632,0
Potência de saída (kW)	6.713	5.896	5.406	4.436	3.628	2.964
Temperatura ambiente (°C)	33,8	34,3	34,6	33,9	34,3	34,5
Temperatura ambiente (K)	306,95	307,45	307,75	307,05	307,45	307,65
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	556	523	516	508	496	487
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	829,15	796,15	789,15	781,15	769,15	760,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	23,8	20	17,2	15	12	10,3
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	42700	42700	42700	42700	42700	42700
Fluxo de combustível (kg/s)	0,3788	0,3463	0,3063	0,2561	0,2091	0,1755
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	16178	14790	13082	10935	8931,4	7496,2
Exergia do combustível (kJ/s)	15534	14201	12561	10500	8575,8	7197,7
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930	930
Eficiência energética	41,493	39,862	41,321	40,563	40,620	39,539
Eficiência exérgica	43,213	41,515	43,034	42,245	42,304	41,179
Eficiência segundo Entransia	44,178	42,660	44,291	43,463	43,638	42,554

MAN 03	Usina Y atual					
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência					
VARIÁVEIS	90%	80%	70%	50%	40%	20%
Consumo de combustível (kg/h)	3390,0	3005,0	2680,0	2201,0	1809,0	1038,0
Potência de saída (kW)	16.596	14.849	12.959	9.299	7.361	3.774
Temperatura ambiente (°C)	32,9	33,7	34,2	34,2	33,9	33,9
Temperatura ambiente (K)	306,05	306,85	307,35	307,35	307,05	307,05
Temperatura média gases de exaustão (°C)	530	518	511	508	511	463
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	803,15	791,15	784,15	781,15	784,15	736,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	20,2	18,1	16,0	11,5	9,8	5,2
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	40500	40500	40500	40500	40500	40500
Fluxo de combustível (kg/s)	0,9416	0,8347	0,7444	0,6113	0,5025	0,2883
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	38137	33806	30150	24761	20351	11677
Exergia do combustível (kJ/s)	38608	34223	30522	25066	20602	11821
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930	930
Eficiência energética	43,51	43,92	42,98	37,55	36,16	32,31
Eficiência exergetica	42,98	43,38	42,45	37,09	35,72	31,92
Eficiência segundo Entransia	46,39	46,98	46,06	40,26	38,73	34,87

MAN 04	Usina Y atual				
CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS DE CADA MOTOR	% da Potência				
VARIÁVEIS	90%	80%	70%	50%	30%
Consumo de combustível (kg/h)	3284,0	3006,0	2670,0	2038,0	1357,0
Potência de saída (kW)	16.391	14.758	12.928	8.953	5.560
Temperatura ambiente (°C)	32,4	32,3	33,1	32,9	33,1
Temperatura ambiente (K)	305,55	305,45	306,25	306,05	306,25
Temperatura média dos gases de exaustão (°C)	513	505	502	499	487
Temperatura média dos gases de exaustão (K)	786,15	778,15	775,15	772,15	760,15
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	23	22,1	21,8	16,8	12,8
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	41000	41000	41000	41000	41000
LHV (kJ/kg)	40500	40500	40500	40500	40500
Fluxo de combustível (kg/s)	0,9122	0,835	0,7416	0,5661	0,3769
Fluxo de Calor Q (kJ/s)	36945	33817	30037	22927	15266
Exergia do combustível (kJ/s)	37401	34235	30408	23210	15454
Densidade do HFO (kg/m ³)	930	930	930	930	930
Eficiência energética	44,36	43,64	43,03	39,04	36,42
Eficiência exergetica	43,82	43,10	42,51	38,57	35,97
Eficiência segundo Entransia	47,35	46,62	46,07	41,80	39,07

*Anexo 11**Tabela 5.14. Dados do motor a diferentes potências.*

CONSUMOS REAIS E EFICIÊNCIAS - Motor #02	% da Potência				
	100%	80%	60%	40%	20%
VARIÁVEIS					
Consumo de combustível (l/s)	214,7	173,10	133,80	94,00	60,50
Potência de saída do motor (kW)	3.293	2.640	1.980	1.320	660
Pressão da mistura (bar)	4,63	3,68	2,74	1,86	1,05
Temperatura da mistura(°C)	60,4	60	57,5	53	48,4
Temperatura ambiente(°C)	38,8	39,1	39,1	39,1	39,1
Temperatura ambiente(K)	311,95	312,25	312,25	312,25	312,25
Temperatura Média dos gases de exaustão (°C)	582	580	580	581	600
Temperatura dos gases de exaustão (K)	855,15	853,15	853,15	854,15	873,15
Lambda	1,944	1,847	1,740	1,645	1,440
Pressão ambiente (bar)	1,013	1,013	1,013	1,013	1,013
Pressão na câmara de combustão (bar)	20	20	20	20	20
Exergia específica do combustível (kJ/kg)	50050	50050	50050	50050	50050
LHV (kJ/kg)	49985	49985	49985	49985	49985
Fluxo de combustível (kg/s)	0,1674	0,1350	0,1043	0,0733	0,0471
Fluxo de Calor (kJ/s)	8370,9	6748,9	5216,7	3664,9	2358,82
Exergia do combustível (kJ/s)	8381,7	6757,7	5223,4	3669,7	2361,89

Anexo 12**Tabela 5.15. Resultados da aplicação da Função Ecológica.**

CONSUMO REAL E EFICIÊNCIAS	% da Potência				
	100%	80%	60%	40%	20%
VARIÁVEIS	100%	80%	60%	40%	20%
Consumo de combustível (l/s)	214,7	173,10	133,80	94,00	60,50
Temperatura ambiente (K)	311,95	312,25	312,25	312,25	312,25
Temperatura dos gases de exaustão (K)	855,15	853,15	853,15	854,15	873,15
Eficiência energética	39,33	39,11	37,95	36,01	27,98
Eficiência exergetica	39,28	39,06	37,90	35,97	27,94
Eficiência segundo Entransia	42,14	41,94	40,69	38,61	29,93
Calor específico dos gases de exaustão (kJ/kg·K)	1,0488	1,0486	1,0486	1,0487	1,0504
Fluxo dos gases de exaustão (kg/s)	4,811	6,812	8,810	10,814	11,813
Energia dos gases de exaustão (kJ/kg)	2741,7	3864,0	4998,4	6144,7	6959,9
Exergia específica dos gases de exaustão (kJ/kg)	276,17	275,28	275,24	275,68	284,15
Exergia dos gases de exaustão (kJ/kg)	1329,0	1875,1	2425,6	2980,8	3356,5
Entransia dos gases de exaustão	1489305	2090055	2703649	3329813	3903841
Geração de Entropia	17,045	13,703	10,592	7,446	4,852
Função ecológica Angulo-Brown	-2024	-1639	-1327	-1005	-855
Função ecológica dos autores	-1481,1	-4053,53	-6678,60	-9343,93	-11842,2

Anexo 13

Exemplo de curva de consumo de combustível versus potência obtida no software Curve Expert ®

CurveExpert Professional 2.6.3*
 File Edit Data Calculate Tools Window Help

Results
 Name: Kind: Score: 995
 Polynomial Regression (L) Regression

Graph and Data
 Data Notes Data Plot Top Results
 More Curves in Graph

Top Results

Legend:
 ● Data
 — Polynomial Regression (degree=2)

Result Preview

Messages
 Run time : 0.0010 seconds
 Autoclassing graph Top Results...
 Autoclassing graph Top Results...
 Autoclassing graph Top Results...
 Distributing the calculation over 4 cores...
 Final Result (Linear Regression/Polynomial Regression (degree=2)):
 Equation : $y = b \cdot x + c \cdot x^2 + \dots$
 a = 2.66327089352148940
 b = 4.88826395815088E-02
 c = 2.13973004162154E-06
 Standard Error : 1.36016576672684E-06
 Correlation Coefficient : 5.993511827600473E-01

Done: 31.2