



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DO  
DESPACHO ECONÔMICO AMBIENTAL DE USINAS TÉRMICAS USANDO O  
NSGA-II**

**TESE DE DOUTORADO**

**NADIME MUSTAFA MORAES**

**BELÉM, PARÁ**  
**2017**

**MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DO  
DESPACHO ECONÔMICO AMBIENTAL DE USINAS TÉRMICAS USANDO O  
NSGA-II**

**NADIME MUSTAFA MORAES**

Tese de Doutorado apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (UFPA) como parte dos requisitos finais para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Elétrica.

**PROF. Dr. UBIRATAN HOLANDA BEZERRA - UFPA**  
**Orientador**

**BELÉM, PARÁ**  
**2017**

---

Moraes, Nadime Mustafa, 1972-.

Modelo Matemático para Otimização Multiobjetivo do Despacho Econômico Ambiental de Usinas Térmicas usando o NSGA-II. / Nadime Mustafa Moraes; orientador Ubiratan Holanda Bezerra. -2017.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Usinas produtoras de vapor – poluição. 2. Usinas produtoras de vapor – aspectos econômicos. 3. Otimização matemática. 4. Recursos energéticos – aspectos econômicos. I. Título.

CDD 23 ed. 621.31243

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DO DESPACHO  
ECONÔMICO AMBIENTAL DE USINAS TÉRMICAS USANDO O NSGA-II”**

AUTOR: NADIME MUSTAFÁ MORAES

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

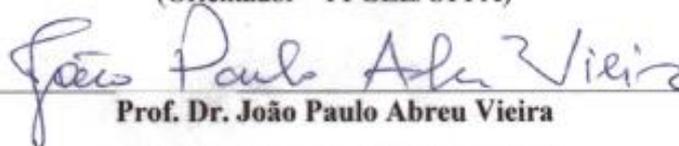
APROVADA EM: 14/07/2017

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Orientador – PPGEE/UFPA)



Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



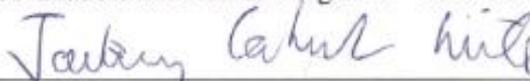
Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



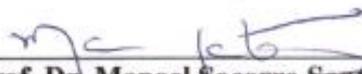
Prof.ª Dr.ª Ana Rosa Carriço de Lima Montenegro Duarte

(Avaliadora Externa ao Programa – ICEN/UFPA)



Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

(Avaliador Externo – ITEGAM)



Prof. Dr. Manoel Socorro Santos Azevedo

(Avaliador Externo – UEA)

VISTO:



Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, excelso supremo, arquiteto do Universo.

Aos meus pais, pelos princípios desenvolvidos ao longo da vida.

Aos meus queridos irmãos: Francisca, José, José Mamed, Elba, David Nasser, João, Emir (in memorian), Iraneide, Marcos e Maria da Penha pela estima e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra pela excelência na orientação, competência e habilidade à realização deste intento.

Aos Professores, Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite, Prof. Dr. Jorge Laureano Moya por todo apoio e colaboração.

Ao Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes pela competência na coordenação do curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do ITEC-UFPA.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do ITEC-UFPA, em especial Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros pelo apoio e convênio entre o ITEGAM e UFPA que possibilitou para a Manaus maiores oportunidades de estudos.

Aos colaboradores da secretaria do PPGEE-UFPA.

Aos colaboradores do ITEGAM que sempre apoiaram nesta jornada.

As coordenadoras profa. Alexandra Salerno Pinheiro e profa. Helisângela Ramos da Costa da Universidade do Estado do Amazonas que permitiram várias vezes minhas viagens à Belém para resolver as questões deste curso.

Ao Magnífico Reitor prof. Dr. Cleinaldo de Almeida Costa da Universidade do estado do Amazonas (UEA) pelo apoio e incentivo para conclusão do referido Curso de Doutorado.

A todos meus colegas de trabalho da UEA do colegiado do Curso de Matemática.

Aos amigos, Gerdson Tanaka Soares, Jorge de Almeida Brito Júnior, Ana Maria Reis, David Barbosa de Alencar, Carlos Alberto Oliveira de Freitas, Manoel Henrique Reis Nascimento e Milton Fonseca Júnior.

*Epígrafe*

*“Deus, único em sabedoria que supera todas as ciências.”*

*Nadime Mustafa Moraes*

***Dedicatória***

Aos meus filhos Gabriel, Ester e Débora.  
Ao meu esposo Glacimar Silva de Moraes em especial

## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Contextualização Inicial.....	15
1.2 Problema de Pesquisa.....	16
1.3 Objetivos .....	16
1.3.1 Objetivo Geral.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 Justificativa da Proposta de Tese .....	17
1.5 Ineditismo.....	18
1.6 Relevância da Pesquisa .....	18
1.7 Delimitação da Pesquisa.....	18
1.8 Estrutura da Tese.....	18
<b>CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1 Importância do Despacho Econômico Ambiental (DEA).....	20
2.2 O Despacho Econômico .....	20
2.3 O DEA usando um único objetivo .....	33
2.4 Despacho Econômico Ambiental Multiobjetivo .....	35
2.5 Despacho Econômico Ambiental de sistemas de potência com energias renováveis .....	42
2.6 Conclusão.....	48
<b>CAPÍTULO III - OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO USANDO NSGA- II.....</b>	<b>49</b>
3.1 Técnicas de Otimização Heurísticas.....	49
3.2. Os Algoritmos Genéticos .....	50
3.3 O Algoritmo NSGA-II. ....	52
3.3.1. Processo de Seleção, Cruzamento e Mutação. ....	53
3.3.2 Operador de empilhamento .....	53
3.3.3 Seleção por torneio segundo o operador de empilhamento.....	54
3.3.4. Determinação do Conjunto Descendente Final .....	54
3.3.5 Pseudocódigo para o NSGA-II.....	55
<b>CAPÍTULO IV - O ÍNDICE DE EMISSÕES COMO PARÂMETRO PARA AVALIAR A CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL DE USINAS TÉRMICAS.....</b>	<b>56</b>
4.1 Introdução .....	56
4.2 Resolução do CONAMA .....	59
4.3 Índice de emissões dos motores a gás .....	61
4.4 Índice de emissões dos motores a HFO.....	63
4.5 Contaminação provocada pela usina.....	64
4.6 Índice Específico de Emissões .....	66
4.7 Valores Permissíveis do Índice de Emissões. ....	68
4.8 Obtenção dos dados primários. ....	68
4.9 Preço das Emissões de Carbono.....	69
4.10 Conclusões .....	71
<b>CAPÍTULO V - MODELO MATEMÁTICO PARA A OTIMIZAÇÃO DO DEA CONSIDERANDO O ÍNDICE DE EMISSÕES.....</b>	<b>72</b>
5.1 Introdução .....	72
5.2 Modelo Matemático para o Despacho Econômico Ambiental.....	73
5.2.1 Minimização dos custos .....	73
5.2.2 Minimização do impacto ambiental .....	74
5.2.3 Restrições do despacho de carga considerando as emissões .....	77
5.2.4 Função Objetivo Econômico usada na tese.....	79
5.2.5 Função Objetivo Ambiental usada na tese .....	79

5.3 Métodos para resolver o problema do despacho econômico de geração.....	79
5.3.1 O Método de Iteração Lambda.....	80
5.4 Uso do Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) para Resolver o Problema do DEA. .....	82
5.4.1 Inicialização .....	83
5.4.2 Seleção Não Dominada .....	83
5.4.3 Distância de aglomeração.....	86
5.4.4 Seleção .....	87
5.4.5 Cruzamento e Mutação.....	88
5.5 Melhor Solução de Compromisso .....	90
<b>CAPÍTULO VI - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>91</b>
6.1 Despacho de Carga Econômico Ambiental: Estudos de casos.....	91
6.1.1 Formulação do problema.....	91
6.1.2 Análise e discussão de resultados.....	94
<b>CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>102</b>
7.1 Conclusões .....	102
7.2 Recomendações.....	103
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 3.1:</b> MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO GLOBAL.....	49
<b>FIGURA 3.2:</b> DETERMINAÇÃO DA NOVA POPULAÇÃO.....	54
<b>FIGURA 4.1:</b> MOSTRA O ÍNDICE DE EMISSÕES DOS MOTORES A GÁS DA USINA. ....	65
<b>FIGURA 4.2:</b> MOSTRA O ÍNDICE DE EMISSÕES DOS MOTORES A HFO DA USINA. ....	66
<b>FIGURA 4.3:</b> O GRÁFICO MOSTRA O ÍNDICE ESPECÍFICO DE EMISSÕES PARA CADA TIPO DE POLUENTE. ....	67
<b>FIGURA 5.1:</b> CUSTO DE COMBUSTÍVEL VERSUS POTÊNCIA DE SAÍDA.....	74
<b>FIGURA 5.2:</b> ALGORITMO PARA O PROCESSO DE ITERAÇÃO $\lambda$ PARA RESOLVER O PROBLEMA DO DESPACHO ECONÔMICO DE GERAÇÃO.....	80
<b>FIGURA 5.3:</b> SELEÇÃO NÃO-DOMINADA E DISTÂNCIA DE AGLOMERAÇÃO. ....	85
<b>FIGURA 5.4:</b> OPERAÇÕES DE CRUZAMENTO E MUTAÇÃO.....	88
<b>FIGURA 6.1:</b> MATRIZ SIMÉTRICA APRESENTA OS COEFICIENTES DE PERDAS DE TRANSMISSÃO.....	92
<b>FIGURA 6.2:</b> TRADE OFF ENTRE O ÍNDICE DE EMISSÕES E O CUSTO DE COMBUSTÍVEL DEPOIS DA APLICAÇÃO DO NSGA-II, NO SISTEMA DE 10 GERADORES.....	97
<b>FIGURA 6.3:</b> TRADE OFF ENTRE O ÍNDICE DE EMISSÕES E O CUSTO DO COMBUSTÍVEL APÓS A APLICAÇÃO DO NSGA-II PARA O SISTEMA DE TESTE 118-BARRAS DO IEEE. ....	97
<b>FIGURA 6.4:</b> POTÊNCIA DE CADA GERADOR PARA O PRIMEIRO CASO DE ESTUDO. ....	98
<b>FIGURA 6.5:</b> POTÊNCIAS DE SAÍDA DOS GERADORES PARA O SISTEMA DE TESTE IEEE 118-BARRAS. ....	98
<b>FIGURA 6.6:</b> CUSTOS DE GERAÇÃO DE CADA GERADOR DO PRIMEIRO ESTUDO DE CASO. ....	99
<b>FIGURA 6.7:</b> CUSTO DE GERAÇÃO DE CADA GERADOR PARA O SISTEMA DE TESTE 118-BARRAS DO IEEE. ....	99
<b>FIGURA 6.8:</b> ÍNDICES DE EMISSÕES DOS GERADORES.....	100
<b>FIGURA 6.9:</b> ÍNDICES DE EMISSÃO DOS GERADORES PARA O SISTEMA DE TESTE 118-BARRAS DO IEEE. ....	100

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 4.1:</b> PADRÕES DE QUALIDADE DO AR NO BRASIL.....	60
<b>TABELA 4.2:</b> DADOS PARA DETERMINAR O ÍNDICE DE EMISSÃO DOS MOTORES A GÁS. .....	61
<b>TABELA 4.3:</b> FATORES DE CONVERSÃO.....	62
<b>TABELA 4.4:</b> PESOS MOLECULARES.....	62
<b>TABELA 4.5:</b> EMISSÕES TÍPICAS DOS MOTORES A GÁS.....	63
<b>TABELA 4.6:</b> DADOS PARA DETERMINAR O ÍNDICE DE EMISSÃO DOS MOTORES A HFO. .....	63
<b>TABELA 4.7:</b> FATORES DE CONVERSÃO NO CASO DOS MOTORES A HFO. ....	63
<b>TABELA 4.8:</b> EMISSÕES TÍPICAS DE UM MOTOR MAN A HFO. ....	64
<b>TABELA 4.9:</b> EMISSÕES NOS DIFERENTES SISTEMAS DE UNIDADES .....	65
<b>TABELA 4.10:</b> COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES ENTRE OS MOTORES A GÁS E OS MOTORES MAN COM RESPEITO À POTÊNCIA FORNECIDA. ....	66
<b>TABELA 6.1:</b> DADOS CARACTERÍSTICOS DOS GERADORES DE USINA DO ESTUDO DE CASOS.....	91
<b>TABELA 6.2:</b> COEFICIENTES DE EMISSÕES PARA OS 10 GERADORES DA USINA. ....	92
<b>TABELA 6.3:</b> PROGRAMAÇÃO FINAL DO NSGA-II.....	94
<b>TABELA 6.4:</b> PROGRAMAÇÃO FINAL DO NSGA-II.....	95

## LISTA DE SIGLAS

*ABC* - Algoritmo de Colônias de Formigas Artificial  
*ABCDP* - Algoritmo Colônia de Abelha Artificial com Tamanho Dinâmico da População  
*ACHS* - Busca Harmônica Híbrida com uma Operação Aritmética de Crossover  
*AG* - Algoritmo Genético  
*ANEEL* - Agência Nacional de Energia Elétrica  
*ANN* - Artificial Neural Networks  
*AS* - Simulated Annealing  
*BBPSO* - Bare-bones Particle Swarm Optimization  
*BBPSO* - Bare-bones Particle Swarm Optimization  
*BF* - Bacterial Foraging  
*BSA* - Backtracking Search Algorithm  
*CDEED* - Despacho Econômico Dinâmico Combinado com Emissões  
*CDF* - Função Densidade Cumulativa  
*CHP* - Produção Combinada de Calor e Potência  
*CLS* - Procura Local Caótica  
*CO* - Monóxido de carbono  
*CO<sub>2</sub>* - Dióxido de Carbono  
*CONAMA* - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
*CPVEIHBMO* - Chaotic Parallel Vector Evaluated Interactive Honey Bee Mating Optimization  
*CRO* - Otimização da Hibridação da Reação Química  
*CSADHS* - Chaotic Self-Adaptive Differential Harmony Search  
*DE* - Differential Evolution  
*DEA* - Despacho Econômico Ambiental  
*DEAR* - Despacho Econômico Ambientalmente Restrito  
*DED* - Despacho Econômico Dinâmico  
*DEED* - Despacho Econômico Ambiental Dinâmico  
*DE-HS* - Algoritmo de Evolução Diferencial Híbrido Eficiente com Busca Harmônica  
*DHS* - Differential Harmony Search  
*EAS* - Algoritmos Evolucionários  
*ED* - Evolução Diferencial  
*EED* - Despacho Meio Ambiente/Economia  
*ER* - Energia Renovável  
*ETS* - Emission Trading Scheme  
*EU* - União Europeia  
*FF* - Algoritmo FireFly  
*FPO* - Fluxo de Potência Ótimo  
*GBTLBO* - Gaussian Bare-bones TLBO  
*GSA* - Gravitational Search Algorithm  
*GSO* - Glowworm Swarm Optimization  
*HFA* - Hybrid Firefly Algorithm  
*HGABF* - Hybrid Genetic Algorithm and Bacterial Foraging  
*HS* - Harmony Search  
*HSA* - Algoritmo de Busca Harmônica Clássica  
*IABC-LS* – Algoritmo Incremental com Colônias de Abelhas Artificiais com a Pesquisa Local

**IA-EDP** - Immune Algorithm for Economic Despach Problem  
**ICA** - Algoritmo Competitivo Imperialista  
**IEEE** - Institute of Electrical and Electronics Engineers  
**IGF** - Função Gama Incompleta  
**IMBDE** - Algoritmo Melhorado Evolução Diferencial Binário Multiobjetivo  
**IWO** - Invasive Weed Optimization  
**KHA** - Krill Herd Algorithm  
**LHS** - Latin Hypercube Sampling  
**MAED** - Despacho Econômico Multi-Área  
**MATLAB** - Matrix Laboratory  
**MAG** - Micro Algoritmo Genético  
**ABHM** - Algoritmo de Busca Harmônica Modificado  
**AMIC** - Algoritmo Modificado Imperialista Competitivo  
**MIOP** - Mixed Integer Optimization Problem  
**MOBCC** - Multi-Objective Bacterial Colony Chemotaxis  
**MOED** - Despacho Econômico Multiobjetivo em Sistemas de Hidrelétricas em Cascata  
**MOO** - Complexo de Otimização Multi-Objetivo  
**NECED** – Despacho Econômico Ambiental Não Convexo Restringido  
**NM** - Ndeer Mead  
**NO** - Óxidos de Nitrogênio  
**NO<sub>x</sub>** - Óxidos de Azoto  
**NRPG** – Northern Regional Power Grid  
**NSGA-II** - Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II  
**O<sub>3</sub>** - Ozônio  
**OIWO** - Oppositional Invasive Weed Optimization  
**ORCCRO** - Real Coded Chemical Reaction Algorithm  
**DPRO** - Despacho de Potência Reativa Ótima  
**PETROBRÁS** - Petróleo Brasileiro S.A  
**PIM** - Pólo Industrial de Manaus  
**PROCEL** - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
**PSO** - Particle Swarm Optimization  
**PV** - Plantas Fotovoltaica  
**RCCRO** - Reação Química Real-Codificada  
**REED** - Despacho Econômico Ambiental Robusto  
**RES** - Fonte de Energia Renovável  
**RM-MEDA** - Modelo de Estimção Multiobjetivo de Distribuição  
**RPD** - Despacho de Potência Reativa  
**SCEED** – Despacho Econômico Ambiental Estático  
**SDP** – Programação Semi-Definida  
**SO<sub>2</sub>** - Dióxido de Enxofre  
**SOA** - Spiral Optimization Algorithm  
**SQP** - Sequential Quadratic Programming  
**TLBO** - Teaching-Learning Based Optimization  
**TOMLAB** - Pacote de Otimização Não-Linear  
**UTE** - Usinas Termelétricas  
**VOA** - Virus Optimization Algorithm

## RESUMO

Uma das tarefas prioritárias para as usinas termelétricas é fornecer a demanda de energia solicitada garantindo o menor custo possível. Esta tarefa possui ainda mais importância na Região Norte do Brasil, principalmente no Polo Industrial de Manaus (PIM) e na própria cidade, onde uma grande parte desta energia é fornecida por Usinas Termelétricas (UTE). A seleção dos geradores e o seu regime de trabalho se conhece como Despacho Econômico (DE). O objetivo essencial do DE é operar as UTE satisfazendo a demanda ao menor custo de combustível possível. Entretanto, a preocupação mundial com a poluição causada pelos combustíveis fósseis nestes últimos tempos a minimizar o custo de combustível não pode ser considerado o único objetivo a atingir nas UTEs e limitar a emissão de poluentes tornou-se outro objetivo primordial. Assim, surge o Despacho Econômico Ambiental (DEA), que procura não diminuir os custos, mas também as emissões. Para resolver a otimização desta tarefa existem diversos métodos tanto determinísticos como heurísticos. Um dos métodos mais utilizados segundo a literatura é o Algoritmo Genético de Classificação Não-dominado, NSGA-II, considerando duas funções objetivos, uma função de custo de combustível e outra função de quantidade de emissões. Nesta tese, a solução proposta tem as seguintes contribuições: desenvolve uma nova e inédita função para avaliar a contaminação ambiental produzida pelas UTEs que além de minimizar a quantidade de poluentes, leva em consideração a influência dos poluentes mais nocivos para o meio ambiente. Essa função denominada Índice de Emissões é aplicada aos motores de duas UTEs da cidade de Manaus com resultados satisfatórios. O Índice de Emissões e a função tradicional custo de combustível é otimizada usando o NSGA-II, determinando soluções ótimas para a potência de saída em diversos cenários característicos e não característicos das usinas, podendo ser aplicado a qualquer termelétrica. Para analisar a viabilidade da solução proposta por esta tese, utilizaram-se um conjunto de dez unidades geradoras térmicas de uma UTE da cidade de Manaus e o Sistema de 118-barras do IEEE como estudos de caso, demonstrando a robustez da proposta no que se referem à solução apresentada. Tais resultados foram significativos, considerando Índice de Emissões e utilizando o procedimento de otimização do algoritmo de classificação não dominada II (NSGA-II). Esta nova metodologia do DEA viabiliza aos especialistas da área a redução de custos e planejamento de geração.

**Palavras-Chave:** Despacho ambiental, emissões, geração de energia, índice de emissões, otimização (Algoritmos Genéticos), NSGA-II.

## ABSTRACT

One of the priority tasks for thermoelectric plants is to supply the requested energy demand, ensuring the lowest possible cost. This task is more important in the Northern Region of Brazil, especially in the Industrial Hub of Manaus (PIM) and in the city itself, where a large part of this energy is supplied by Thermoelectric Power Plants (UTE). The selection of generators and their work regime is known as the Economic Dispatch (DE). The essential objective of ED is to operate UTEs by meeting demand at the lowest possible cost of fuel. However, the worldwide concern about pollution caused by fossil fuels in recent times to minimize fuel costs can not be considered the only objective to be achieved in the UTEs and limiting the emission of pollutants has become another primary objective. Thus, the Environmental Economic Dispatch (DEA) appears, which seeks not to reduce costs, but also emissions. To solve the optimization of this task there are several deterministic as well as heuristic methods. One of the most used methods according to the literature is the Genetic Algorithm of Non-dominated Classification, NSGA-II, considering two objective functions, a function of fuel cost and another quantity function. In this thesis, the proposed solution has the following contributions: it develops a new and unprecedented function to evaluate the environmental contamination produced by the UTEs that, in addition to minimizing the amount of pollutants, takes into account the influence of pollutants more harmful to the environment. This function, called the Emissions Index, is applied to the engines of two UTEs in the city of Manaus with satisfactory results. The Emissions Index and the traditional fuel cost function is optimized using the NSGA-II, determining optimal solutions for output power in several characteristic and non-characteristic scenarios of the plants, and can be applied to any thermoelectric plant. In order to analyze the viability of the solution proposed by this thesis, a set of ten thermal generating units of a UTE of the city of Manaus and the IEEE 118-bar System were used as case studies, demonstrating the robustness of the proposal in what refer to the solution presented. These results were significant considering the Emissions Index and using the optimization procedure of the non-dominated classification algorithm II (NSGA-II). This new DEA methodology enables specialists in the area to reduce costs and generate generation planning.

**Keywords:** Environmental dispatch, emissions, power generation, emissions index, optimization (Genetic Algorithms), NSGA-II.

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização Inicial

Os custos de energia constituem um dos maiores gastos de administração nos negócios. Atualmente no ambiente competitivo que se vive por administrar estes custos como outra matéria prima, a economia de energia se converteu nos últimos anos em uma prioridade a nível mundial, o que se traduz na necessidade de um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Países em desenvolvimento buscam auto sustentabilidade diante do atual cenário energético mundial. As razões para tal inclinação estruturam-se na escassez dos combustíveis fósseis para as próximas décadas, somado a um consumo crescente de energia, seja por razões de desenvolvimento, seja pelo mau uso da energia disponível.

As estratégias de atuação para o cenário nacional vigente precisam ser atualizadas tanto com respeito às dificuldades observadas na esfera sócio econômica e ambiental, como no que se referem ao investimento na pesquisa de novos instrumentos, métodos e critérios que garantam a efetiva contribuição do setor elétrico no processo de busca de um desenvolvimento auto sustentável. Para (YALCINOZ; ALTUN 2002) a geração de energia elétrica e os problemas de despacho, o custo mínimo absoluto não é mais o único critério a ser cumprido. As considerações ambientais tornaram-se uma das principais preocupações de gestão. O problema de despacho econômico limitado ambientalmente pode ser classificado como uma otimização multi-objetivo e um problema de programação não-linear.

De acordo (GRANELLI, MONTAGNA et al. 1992) argumentam que desde o início da década de 1970 o despacho da geração térmica tem sido proposto como um meio eficaz de lidar com o problema da poluição do ar. A legislação restritiva mais recente levou à adoção de técnicas de limitação de poluição e/ou a utilização de combustíveis menos poluentes. Um despacho com as emissões restritas, no entanto, ainda é mais necessário, quando as condições meteorológicas são adversas para a difusão dos efluentes. Os autores apresentam um procedimento de despacho dinâmico, que é capaz de deter a natureza interal das restrições de emissão.

Assim, o DEA nas usinas térmicas é uma tarefa muito importante para garantir a demanda de potência, em que consiste em fazer uma distribuição entre todos os motores da usina, garantindo que o custo seja mínimo. Atualmente, com a preocupação de todos os países com a poluição e com a preservação do meio ambiente, tem-se incorporados outros requisitos

a fim de garantir uma mínima poluição ao meio ambiente. Portanto, é imprescindível a garantia simultânea de aspectos econômicos e ambientais, o que converte o problema do DE em um problema de otimização multiobjetivo.

## **1.2 Problema de Pesquisa**

O cenário energético mundial apresentado nos dias atuais é preocupante no que se refere aos poluentes lançados na atmosfera, principalmente na escala emergente em que se apresenta. Assim, esta pesquisa apresenta fatores e características importantes que não se preocupa somente com custos relacionados para produção de energia, mas propõe-se contribuir, sobretudo para redução das emissões produzidas pela geração de energia em usinas termelétricas avaliando as emissões em suas extensas magnitudes mediante riscos que interferem direta ou indiretamente na poluição ambiental.

## **1.3 Objetivos**

### *1.3.1 Objetivo Geral*

Apresentar um novo modelo e método matemático para o Despacho Econômico Ambiental (DEA) utilizando ferramentas de Algoritmos Evolutivos (AE) (NSGA-II) para reduzir o custo da produção de energia de usinas térmicas e diminuir o impacto ambiental.

### *1.3.2 Objetivos Específicos*

- 1) Identificar as diferentes formas de avaliar as emissões produzidas pelas usinas geradoras de energia.
- 2) Apresentar os modelos matemáticos e implementar ferramentas computacionais para avaliar as variáveis econômicas (Custo de Geração e Consumo de Combustível) e ambientais (Emissões), considerando nestas últimas não só a poluição gerada, mas a permissibilidade de cada poluente na atmosfera, que permitam a construção dos diferentes cenários de simulação;
- 3) Formular o problema de otimização multiobjetivo do DEA utilizando uma ferramenta computacional (AE-NSGA-II) para a seleção da configuração da análise das variáveis independentes e dependentes do modelo matemático, considerando a potência demandada e os impactos ambientais;
- 4) Avaliar os resultados obtidos de acordo com as normas vigentes em relação às especificações elétricas e ambientais;

#### 1.4 Justificativa da Proposta de Tese

Amazônia Brasileira apesar de sua enorme potencialidade econômica, ainda é tratada de forma inadequada no que diz respeito ao seu desenvolvimento socioeconômico. Destacam-se as dificuldades enfrentadas no Sistema Elétrico (SE) nessa região. Cita-se, por exemplo, a ausência de informações ou a quantificação de variáveis subjetivas como custos, impactos ambientais, impactos sociais, etc. A produção científica incipiente acerca das potencialidades e o não comprometimento com os interesses socioambientais, econômicos e regionais, conduziram propostas passadas a resultados ineficazes. As incertezas e as externalidades são objetos de difícil integração aos modelos matemáticos que tratam do SE. Esse problema é sensivelmente potencializado quando as informações mínimas necessárias à modelagem, simplesmente não estão disponíveis (BROWN 2016, GRANDE-ACOSTA; ISLAS-SAMPERIO 2017, NOEL, BRODIE et al. 2017, VERBRUGGEN 2017). A Amazônia em sua expansão, devido as suas particularidades de densidade demográfica e grande espaço físico, ainda se utiliza bastante geração termoelétrica, nesta perspectiva torna-se interessante a abordagem desta pesquisa.

A operacionalização das usinas ao menor custo possível não pode ser o único fator para fornecer a energia elétrica devido às questões inerentes da preocupação crescente com a consideração ambiental. A geração de energia a partir de combustível fóssil libera diversos contaminantes, tais como dióxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono na atmosfera. O problema que atraiu muita atenção é a minimização da poluição devido à demanda pública de pressão para o ar puro (BENIDRIS, ELSAIAH et al. 2016, CHAIB, BOUCHEKARA et al. 2016, CURTIS, LYNCH et al. 2016, DENNIS, COLBURN et al. 2016, FINENKO; CHEAH 2016, ABAS, KALAIR et al. 2017, ABDILAH; MUSTAFA 2017) (MCTi, 2006; ALVAREZ JUNIOR e LINKE, 2006; PINTO, MOUTINHO e RODRIGUES, 2008; EGUSQUIZA et al., 2009; ERTESVAG, 2007).

Apesar dos trabalhos desenvolvidos, ainda não existe uma metodologia e uma ferramenta para a gestão das UTE que leve em consideração os critérios econômicos e ambientais, priorizando os aspectos essenciais não somente aos custos envolvidos, mas principalmente os requisitos que interferem no âmbito ambiental (DARYANI; ZARE 2015, ABDELAZIZ, ALI et al. 2016, ABDELAZIZ, ALI et al. 2016, ARRIAGADA, LÓPEZ et al. 2016, GHERBI, BOUZEBOUDJA et al. 2016, HAGHRAH, NAZARI-HERIS et al. 2016, LAU, YANG et al. 2016, LIU, JIAO et al. 2016, LUJANO-ROJAS, OSÓRIO et al. 2016,

LUJANO-ROJAS, OSÓRIO et al. 2016, MOAREFDOOST, LAMADRID et al. 2016, SANTOS 2016, JEBARAJ, VENKATESAN et al. 2017, JIN, MU et al. 2017, KHESHTI, KANG et al. 2017, MA, YANG et al. 2017, MAHDI, VASANT et al. 2017, MASON, DUGGAN et al. 2017).

### **1.5 Ineditismo**

Esta tese tem como objetivo apresentar uma metodologia para o DEA a fim de utilizá-la nas usinas térmicas com técnicas do NSGA-II da otimização multiobjetivo. A ferramenta caracteriza-se por incorporação de um novo conceito denominado Índice de Emissões, assim como sua formulação matemática, dando prioridade aos aspectos ambientais nesta área para avaliar e mensurar o grau das emissões. A contribuição e relevância se dão pela introdução de um novo conceito para avaliar a contaminação ambiental provocadas pelas Usinas Termelétricas (UTES) e o uso da expressão matemática como uma das funções objetivo para minimizar os custos e as emissões usando o NSGA-II.

### **1.6 Relevância da Pesquisa**

Nesta pesquisa se desenvolve um novo conceito (Índice de Emissões) e sua expressão matemática para avaliar as emissões produzidas por UTES. Este conceito, além de sua respectiva expressão matemática, não tem precedentes na literatura. Foram calculados os índices de emissões para todos os motores de duas UTES na cidade de Manaus.

Dessa forma, é uma inovação tecnológica/científica a contribuição deste trabalho para aplicação dessa função junto à função tradicional de custo de combustível a fim de realizar a otimização multiobjetivo do DEA usando o NSGA- II.

### **1.7 Delimitação da Pesquisa**

Os conceitos, expressões e procedimentos desenvolvidos podem ser aplicados a qualquer UTE com motores de combustão interna. As ferramentas computacionais foram avaliadas através dos seguintes estudos de caso: UTES da cidade de Manaus e o sistema de teste de 118-barras do IEEE. Este último sistema é muito utilizado internacionalmente para avaliar software e procedimentos para o DEA.

### **1.8 Estrutura da Tese**

O **Capítulo I** apresenta-se a contextualização do trabalho, inovação científica, contribuição e relevância, os objetivos que compreende o problema da pesquisa e sua delimitação.

No **Capítulo II**, discute-se uma abordagem crítica da revisão da literatura, o estado da arte sobre o problema do DEA e a necessidade da otimização multiobjetivo como uma das vias de solução do problema.

No **Capítulo III**, realiza-se uma exposição da otimização multiobjetivo usando o NSGA-II.

No **Capítulo IV**, é exposto o Índice de Emissões, a contribuição deste trabalho, como parâmetro para avaliar a contaminação ambiental, avaliando o grau de permissibilidade deste, o que compreende a Resolução do CONAMA, padrões de qualidade do ar no Brasil, bem como a contaminação provocada pelas usinas por meio do respectivo grau de mensurá-lo. Além disso, apresentam-se valores permissíveis do Índice de Emissões para o problema tratado nesta pesquisa.

No **Capítulo V**, desenvolve-se o modelo matemático para a otimização do DEA levando em consideração o Índice de Emissões apresentando uma aplicação da metodologia das ferramentas desenvolvidas à solução de casos práticos.

No **Capítulo VI**, analisa-se a aplicação do procedimento desenvolvido a dois estudos de caso, de uma planta térmica em Manaus e do sistema de teste 118-barras do IEEE, mostrando-se as diferentes possíveis soluções decorrentes da otimização multiobjetivo e de gráficos como resultado da otimização multiobjetivo.

Finalmente, no **Capítulo VII**, apresentam-se as conclusões e recomendações da tese para possíveis trabalhos futuros sobre o tema.

## CAPÍTULO II - REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Importância do Despacho Econômico Ambiental (DEA)

A geração de energia elétrica com o uso de combustíveis fósseis e/ou gás emitem inúmeros contaminantes, tais como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>, para a atmosfera (HOLLADAY e LARIVIERE, 2017; HOWARD *et al.*, 2017). Recentemente, o problema que tem atraído muita atenção, envolve a minimização da poluição devido à pressão de demanda para limpar o ar, desde a aprovação da Lei do Ar Limpo e alterações em novembro de 1990 e atos similares pelos governos europeu e japonês sobre as restrições ambientais que lideram a lista de preocupações de utilidade na gestão (JEBARAJ *et al.*, 2017; JIANG *et al.*, 2017).

O Despacho Econômico Ambientalmente Restrito (DEAR) gera problema e pode ser classificado como uma otimização multicritério para problema de programação não linear. A finalidade do DEAR é minimizar o custo de combustível e níveis de emissão simultânea, atendendo a demanda e restrições operacionais. Muitos pesquisadores tem abordado este problema no passado (MAHDI *et al.*, 2017). Um resumo dos algoritmos de despacho que datam de 1970 utilizando métodos convencionais de otimização é fornecido em (KERMANSHAHI *et al.*, 1990).

### 2.2 O Despacho Econômico

A solução do problema do Despacho Econômico (DE) depende, principalmente, da modelagem dos geradores térmicos. As variações físicas, tais como o envelhecimento e temperatura ambiente afetam os parâmetros de modelagem e são inevitáveis. Como esses parâmetros são a espinha dorsal da solução do DE, a estimativa periódica desses coeficientes característicos é necessária para um despacho de carga preciso. Em “*Teaching-Learning Based Optimization*” (TLBO) é proposto que o processo normalmente é formulado como um problema de minimização do erro e um algoritmo inspirado na natureza. O trabalho fornece um quadro para o cálculo dos coeficientes de funções de custo quadrático e cúbico, o carregamento de ponto válvula (*valve point loading*), funções de custo e de emissões. A eficácia da TLBO é demonstrada em 5 sistemas de teste padrão e um sistema indiano prático, envolvendo vários graus de complexidade (DURAI *et al.*, 2015).

Cheong e Dillon, (1978), realizaram o primeiro uso de funções multiobjetivo em programação com sistemas de energia. Um resumo dos algoritmos de despacho ambiental que datam de 1970 utilizando métodos convencionais de otimização foi apresentado em (TALAQ

*et al.*, 1994). No entanto, percebe-se que técnicas convencionais tornam-se complexas quando se trata de problemas de despacho cada vez mais complexos, e são ainda mais limitadas pela sua falta de robustez e eficiência concernente ao número de aplicações práticas. Inúmeros métodos têm sido utilizados para representar níveis de emissões frente as perspectivas apresentadas.

Kermanshahi *et al.*, (1990) propõem programação por metas, técnica para avaliar o custo marginal ambiental que indica o aumento da porção de custo de operação do sistema enquanto é melhorado o impacto sobre o meio ambiente. Tentou-se encontrar as melhores soluções de compromisso entre as metas conflitantes de custo mínimo e mínimo de emissão por meio de procedimentos adequados multiobjetivos (NANDA *et al.*, 1988).

Em Granelli *et al.*, (1992) foi proposto um algoritmo de despacho econômico com emissões, uma vez que ele minimiza o custo de combustível durante um certo tempo pré-selecionado e leva em conta as limitações ambientais. (KING *et al.*, 1995) apresentaram melhorias na rede neural Hopfield para o problema de despacho econômico ambiental. Um fator de penalidade de preço para resolver o despacho DEAR, problema que combina os custos de emissão com custos de combustível.

De acordo com Wang e Yuryevich, (1998b) desenvolvem um algoritmo eficiente e confiável baseado na programação evolutiva para resolver o problema do DEAR. No artigo são apresentadas técnicas de aceleração para a solução do algoritmo que aumentam a velocidade e robustez do mesmo. O comportamento e a utilidade do algoritmo é demonstrada através da sua aplicação a um sistema de teste.

Heslin e Hobbs, (1989) apresentam um modelo para avaliar os custos e os impactos da troca de combustível como meio de reduzir as emissões de usinas térmicas. O modelo é uma generalização dos algoritmos multiobjetivos de produção probabilística de custos que permite que as plantas tenham combustíveis alternativos. O Algoritmo produz curvas de *trade off* que mostram os custos e as reduções das emissões de SO<sub>2</sub>. Para ilustrar as capacidades do modelo, ele é aplicado para o sistema de geração do estado de Ohio/USA.

El-Keib *et al.*, (1994) discutem o impacto da promulgação da Lei do Ar Limpo de 1990, relativa às práticas atuais relacionadas com o problema de despacho econômico. O problema foi investigado tendo em vista as novas restrições das emissões de SO<sub>2</sub>. Formulações detalhadas do problema são apresentadas e as ferramentas para avaliar os diferentes planos e estratégias de operação são propostas. Os resultados de ensaio de um sistema de energia de grande porte também estão incluídos no documento.

Yokoyama *et al.*, (1988) propõem um novo e eficiente algoritmo para obter o fluxo de potência ótimo nas fases de planejamento e operação dos sistemas de potência, resolvendo um problema de otimização multiobjetivo. Ao decidir a melhor operação do sistema, vários objetivos, tais como economia, confiabilidade e mínima influência sobre o meio ambiente, devem simultaneamente ser alcançados.

Os autores assinalam que estes objetivos são contraditórios entre si e estão em relações de *trade-off*, tornando difícil lidar com esta classe de problema usando as abordagens convencionais que otimizam um único índice de desempenho. O algoritmo proposto tornou possível para tratar os problemas de despacho ótimo com vários índices de desempenho e de compreender as relações *trade-off* entre os índices selecionados. O efeito dos fatores de incerteza que pertencem aos sistemas de energia também podem ser levados em consideração. A validade e eficácia da abordagem proposta é verificada através de exemplos numéricos.

Recentemente, os estudos sobre algoritmos evolucionários tem mostrado que estes métodos podem ser utilizados de forma eficiente para eliminar a maioria das dificuldades dos métodos clássicos no sentido geral e no caso do despacho de carga em particular (NAZARI-HERIS *et al.*, 2017; QU *et al.*, 2017).

De acordo com Farag *et al.*, (1995) para o DE, também tem sido utilizados procedimentos da otimização com programação linear com base na qual os objetivos são considerados um a um. No entanto, muitas suposições matemáticas tem que ser dadas para simplificar o problema. Além disso, esta abordagem não dá qualquer informação sobre a compensação dos objetivos envolvidos.

Para Ghasemi *et al.*, (2015) apresentam uma nova variante do algoritmo de otimização chamado TLBO, os autores chamam a este novo algoritmo “Gaussian Bare-bones TLBO (GBTLBO)” e além disso eles fazem uma versão modificada do mesmo (MGBTLBO) para o despacho ótimo de potência reativa (ORPD) com variáveis discretas e contínuas. A comparação dos resultados da simulação revela eficácia dos algoritmos de otimização GBTLBO e MGBTLBO sobre outros algoritmos bem estabelecidos. Os resultados obtidos para o problema ORPD demonstram superioridade em termos de qualidade da solução dos algoritmos GBTLBO e MGBTLBO.

Para Elattar, (2015), o Despacho Econômico Dinâmico (DED) é um dos problemas não-lineares mais complicados, mostrando a característica não-convexa em sistemas de energia. Isto é devido ao efeito de “valve point” nas funções de custo para as unidades geradoras, dos limites de gradiente de velocidade e as perdas de transmissão. Assim, a proposta de um método

de solução eficaz para este problema de otimização é de grande interesse. Os autores afirmam que o algoritmo de otimização original chamado de “bacterial foraging” (BF) tem características de pobre convergência para grandes problemas restritos.

Para superar esta desvantagem, os autores desenvolveram um algoritmo híbrido, combinando o BF com os algoritmos genéticos e chamaram este algoritmo de “hybrid genetic algorithm and bacterial foraging” (HGABF) e usaram ele para resolver o problema de despacho econômico dinâmico considerando os efeitos de “*valve point*”, os limites das taxas de rampa e as perdas de transmissão. A abordagem HGABF pode ser derivada através da integração algoritmo BF e algoritmo genético (GA). Para ilustrar a eficácia da abordagem HGABF, são utilizados vários sistemas de teste com diferentes números de unidades geradoras. Os resultados da abordagem HGABF são comparados com os obtidos por outros métodos publicados que empregam sistemas de teste. Estes resultados mostram a eficácia e a superioridade do método introduzido sobre outros métodos publicados.

O Algoritmo de Pesquisa Gravitacional “Gravitational Search Algorithm” (GSA) é um método de otimização estocástica inspirado na lei da gravidade e a interação entre as massas.

Duman *et al.*, (2015) propõem um novo algoritmo híbrido modificado, usando a otimização com enxame de partículas “Particle Swarm Optimization” (PSO) e o GSA baseado em lógica fuzzy (FL) para controlar a capacidade de procurar o ótimo global e aumentar o desempenho do PSOGSA híbrido. A fim de avaliar a eficiência e desempenho da abordagem proposta, são utilizados sistemas de energia padrão, incluindo 5 máquinas de 14-barras e 6 máquinas de 30-barras do IEEE, 13 e 40 de unidade de sistemas de teste. Estes são problemas de despacho econômico não convexos, incluindo o efeito de ponto de válvula (*valve point*) e são calculados com e sem as perdas.

Os resultados obtidos a partir da abordagem proposta FPSOGSA são comparados com os das outras técnicas heurísticas na literatura. Os resultados da comparação demonstra que o método proposto pode convergir para a próxima solução ótima e melhorar o desempenho da abordagem PSOGSA híbrido padrão (DUMAN *et al.*, 2015).

Barisal e Prusty, (2015), apresentam um algoritmo evolutivo híbrido de otimização de ervas daninhas invasoras “*Invasive Weed Optimization (IWO)*” misturado com o “*Oppositional Based Learning*” para resolver problemas de DE em grande escala. O novo algoritmo denominado “*Oppositional Invasive Weed Optimization (OIWO)*” que pode-se traduzir como otimização oposição por erva invasora, baseia-se no comportamento de colonização das plantas daninhas e ainda é melhorado usando números quase opostos. A

metodologia OIWO proposta foi desenvolvida para minimizar o custo total de geração, satisfazendo várias restrições, como limites de geração, demanda de carga, efeito do ponto de válvula, opções de multi-combustível e as perdas de transmissão. O algoritmo proposto foi testado e validado utilizando-se cinco diferentes sistemas de teste. O mérito mais importante da metodologia proposta é a alta precisão e boas características de convergência e robustez para resolver problemas do DE. Os resultados da simulação do algoritmo OIWO proposto mostram sua aplicabilidade e superioridade quando comparado com os resultados de outros algoritmos testados.

Zhang *et al.*, (2012) apresentam um algoritmo eficiente de otimização por enxame de partículas híbrido para resolver problemas de despacho econômico dinâmico, com efeitos “valve point”, integrando um novo método de otimização chamado “*Bare-bones Particle Swarm Optimization*” (BBPSO) com um buscador local chamado busca direcional caótica (DCS). O uso do BBPSO é concebido como uma pesquisa de nível básico, que pode dar uma boa direção para novas ideias, enquanto DCS é usado como um operador de ajuste fino para encontrar a melhor solução. Finalmente, o algoritmo proposto pelos autores foi aplicado a vários sistemas de energia, e um estudo comparativo com outros métodos existentes. Outros autores também utilizam o método de enxame de partículas para resolver o problema do despacho de carga (GAING, 2003; NIKNAM, 2010; MANDAL *et al.*, 2015).

A não convexidade do problema do despacho ótimo de carga torna difícil garantir o ótimo global. Tian *et al.*, (2015) apresentam uma abordagem de relaxamento convexo, o método chamado “*Moment Semidefinite Programming*” (MSDP), para facilitar a busca de soluções deterministas ótimas globais. O método utiliza uma sequência de momentos, que podem linearizar funções polinomiais e construir matrizes positivas semi definidas, para formar um relaxamento convexo SDP para os problemas de despacho de carga. Em particular, o nível da matriz é usado como uma condição suficiente para garantir o ótimo global. A mesma condição também pode ser aproveitada para estimar o número de soluções ótimas globais. Este método foi efetivamente aplicado a problemas de DE e de fluxo de potência ótimo (FPO).

Aragón *et al.*, (2015) apresentam um algoritmo inspirado no modelo T-Cell do sistema imunológico (ou seja, um sistema imunológico artificial), que é usado para resolver problemas de despacho econômico. A abordagem proposta é a chamada IA-EDP, (*Immune Algorithm for Economic Despach Problem*). A abordagem proposta é validada usando oito problemas encontrados da literatura especializada. Os resultados são comparados com

respeito aos obtidos por várias outras abordagens. Além disso, uma análise estatística foi feita, a fim de determinar a sensibilidade da abordagem proposta para os seus parâmetros.

Bhattacharjee *et al.*, (2014b) propõem um algoritmo chamado “*Real Coded Chemical Reaction Algorithm*” (ORCCRO) para resolver o problema do DE, envolvendo diferentes restrições de igualdade e desigualdade. Os efeitos de carregamento do ponto de válvula, e as opções de multi-combustível de usinas térmicas em grande escala também são estudados. As perdas de transmissão do sistema também têm sido consideradas em alguns casos. A Otimização da Reação Química (CRO) imita a interação de moléculas em uma reação química para chegar a partir de um estado instável de energia mais alto para um estado estável de baixa energia. A versão real codificada dela, é conhecida como otimização de Reação Química Real-Codificada (RCCRO). A “*Oppositional Based RCCRO*” (ORCCRO) foi usada pelos autores para melhorar a eficácia e a qualidade das soluções em tempo mínimo. Os resultados da simulação estabelecem que a abordagem proposta supera várias outras técnicas de otimização existentes, em termos de qualidade da solução obtida e eficiência computacional. Os resultados também comprovam a robustez da metodologia proposta para resolver problemas do DE.

O DE é um problema de otimização não-linear, devido à não-linearidade das equações de fluxo de potência. Na literatura aberta, a linearização do fluxo de potência que produz apenas a potência ativa é usada para problemas de despacho de carga. As soluções obtidas são inaceitáveis quando são verificadas com as equações de fluxo de potência não-lineares, especialmente para aplicações de rede inteligente por causa dos problemas de instabilidade que resultam de tais formulações. Sikiru *et al.*, (2014) superam essa limitação, propondo um modelo que responde tanto a potência ativa como reativa em formulações do problema de despacho de carga.

Além disso, o trabalho desenvolve novas formulações para o despacho de carga que cobre o espectro global do funcionamento de uma rede no sistema de potência com base na curva de duração da carga, em vez do período único considerado na literatura aberta. A vantagem da abordagem proposta é que dá resultados aceitáveis quando verificados com o fluxo de energia não-linear em comparação com a abordagem clássica utilizada em problemas de despacho de carga. Além disso, o artigo demonstra que o conjunto global de linhas comutáveis que possam minimizar as perdas de potência ativa de uma rede pode ser obtido a partir das formulações multi-período com base na consideração de diferentes níveis de carga (ALGUACIL e CONEJO, 2000; FRANK *et al.*, 2012). Os resultados indicam que apenas este

conjunto de linhas comutáveis pode reduzir as perdas e assegurar a estabilidade de uma rede, por conseguinte, são úteis para aplicações de redes inteligentes (SIKIRU *et al.*, 2014).

Os autores Basu e Chowdhury, (2013); Thao e Thang, (2014) apresentam um algoritmo evolutivo nomeado como algoritmo “Cuckoo Search” aplicado a problemas de DE não convexos. O DE é muito essencial para colocar otimamente a potência gerada de forma ideal aos geradores comprometidos no sistema, satisfazendo todas as restrições. Várias técnicas evolucionistas como o Algoritmo Genético (GA), a programação Evolutiva, Enxame de Partículas (PSO) e algoritmo Cuckoo Search são considerados para resolver problemas de despacho de carga. Para verificar a robustez do algoritmo Cuckoo Search proposto, restrições como ponto de carregamento da válvula, limites de taxa de rampa, zonas de operação proibidas, múltiplas opções de combustível, os limites de geração e as perdas também são incorporadas no sistema. Em comparação com a qualidade da solução e o tempo de execução obtido por cinco sistemas de teste, o algoritmo proposto parece ser uma técnica promissora para resolver problemas reais de despacho.

Rajan e Malakar, (2015) apresentam uma novidade com um algoritmo híbrido que combina o “*Firefly Algorithm*” (FA) e o método “*Ndeer Mead*” (NM) para a resolução de problemas de Despacho de Potência Reativa Ótima (ORPD). O ORPD é um aspecto muito importante da operação dos sistemas de potência e é um problema de otimização não-convexo altamente não-linear, que consiste em ambas as variáveis de controle contínuos e discretos. Como muitos outros métodos de otimização de uso geral, o FA original muitas vezes é retido em ótimos locais e, a fim de superar a lacuna, neste trabalho, um método de busca local eficiente chamado sub-rotina NM simplex é introduzido na arquitetura interna do algoritmo FA inicial.

O método proposto “*Hybrid Firefly Algorithm*” (HFA) evita a convergência prematura do método original FA. O método proposto é aplicado para determinar as configurações ideais de tensão do gerador, posições de mudança de transformadores e saída VAR de capacitores em derivação para otimizar duas funções objetivos diferentes; tais como minimização da potência ativa de perda de tensão e desvios. O programa é desenvolvido em Matlab e o algoritmo híbrido proposto é examinado em dois sistemas de teste padrão IEEE para resolver os problemas ORPD. Para fins de validação, os resultados obtidos com a metodologia proposta são comparados com os obtidos por outros métodos. Observa-se que o método proposto tem melhores características de convergência e robustez em comparação

com a versão original do FA e outros métodos existentes. Revelou-se que o método híbrido proposto é capaz de fornecer as melhores soluções.

Em um desregulamentado sistema multi-área de energia elétrica o objetivo é determinar a estratégia de geração mais econômica que poderia satisfazer as demandas de carga, os limites de linha e outras restrições operacionais. Normalmente, o DE lida apenas com a minimização de custos, mas a minimização da emissão de conteúdo tornou-se também uma preocupação igualmente importante devido à exigência obrigatória de redução da poluição para a proteção ambiental.

Para o DEA é um problema complexo de otimização multi-objetivo (MOO) com objetivos conflitantes. Normalmente um ranking fuzzy é utilizado para classificar o grande número de soluções de Pareto obtidos após a resolução de um problema MOO. Mas, neste artigo os autores dão preferência ao gerenciador de decisões (DM) o qual é usado para orientar a busca e para selecionar a população para a próxima geração. Um método melhorado de Evolução Diferencial (ED) é proposto onde a operação de seleção é modificada para reduzir a complexidade de fazer as decisões multi-atributo com a ajuda de um padrão de decisão difusa. A frente de Pareto bem distribuído foi obtido, que apresenta um grande número de soluções de *trade-off* alternativos para o operador do sistema elétrico (PANDIT *et al.*, 2015). Os estudos são realizados em três casos de teste e os resultados obtidos são melhores do que a literatura anterior.

O corte de carga é considerado como última alternativa para evitar o apagão em sistemas de energia durante as contingências de geração. É essencial para otimizar a quantidade de perda de carga, a fim de evitar a perda de carga excessiva. Para minimizar a perda de carga onde, Mageshvaran e Jayabarathi, (2015) propõem a implementação de um algoritmo de otimização inspirado na natureza e conhecido como algoritmo de otimização por enxame pirilampo “*Glowworm Swarm Optimization*”(GSO). O algoritmo proposto é testado em sistemas de teste de 14, 30, 57, 118 , 246 barras do IEEE e “*Northern Regional Power Grid*” (NRPG) - (Índia). A viabilidade do método proposto em termos de qualidade e propriedades de convergência da solução é comparada com os métodos convencionais (MAGESHVARAN e JAYABARATHI, 2015).

Singh *et al.*, (2015) apresentam uma otimização por enxame de partículas (PSO) com um líder envelhecido e adversários (ALC-PSO) para a solução do problema de otimização do despacho de potência reativa. O problema é formulado como um problema de otimização não linear constrangido de um único objetivo, onde a perda de potência real e os desvios totais de

tensão devem ser minimizados separadamente. Os resultados apresentados neste trabalho demonstram o potencial da abordagem proposta e mostram a sua eficácia e robustez para resolver o problema do despacho de potência reativa dos sistemas de energia.

Secui, (2015), mostra um novo algoritmo de colônia de abelhas artificial modificado (MABC) para resolver o problema de despacho econômico, levando em consideração os efeitos de “*valve point*”, as poluições de emissão e várias restrições operacionais das unidades geradoras. O algoritmo MABC introduz uma nova relação para atualizar as soluções dentro do espaço de busca, de modo a aumentar a capacidade do algoritmo para evitar a convergência prematura e para encontrar soluções estáveis e de alta qualidade. O comportamento do algoritmo MABC é investigado por várias combinações resultantes a partir de três modalidades de geração das sequências caóticas e dois esquemas de seleção das soluções. O desempenho das variantes do MABC é testado em quatro sistemas com seis unidades, treze unidades, quarenta unidades e cinquenta e duas unidades geradoras. A comparação dos resultados mostra que o MABC têm um desempenho melhor do que o algoritmo ABC clássico e outras técnicas de otimização.

Para Xiao *et al.*, (2015), a previsão de carga elétrica sempre desempenhou um papel fundamental na administração do sistema de alimentação, o planejamento para a transferência de energia de agendamento e o despacho de carga. Para a previsão de carga elétrica, devido ao fato de que o modelo combinado tem a capacidade de calcular efetivamente a sazonalidade e não-linearidade mostrado nos dados de carga elétrica, absorver os méritos e evitar as limitações dos modelos individuais, um novo modelo combinado é apresentado. Neste modelo, a pré-análise de dados é utilizado para reduzir as interferências a partir dos dados. Os resultados experimentais mostram que o modelo combinado proposto é superior aos modelos de previsão individuais com relação ao desempenho.

Sayah *et al.*, (2014) desenvolvem uma nova e eficiente técnica de otimização baseada na otimização da hibridação da reação química (CRO), para resolver o problema do DE com a função de custo térmico e o efeito do ponto de válvula juntamente, assim como opções de combustível múltiplo e considerando a zona de operação proibida e as restrições do gradiente. Quando os efeitos do ponto de válvula, as operações multi-combustível e as restrições da zona de operação proibida e taxa de gradiente é levado em consideração, o problema DE se torna mais complexo que o problema DE convencional. Para mostrar a prioridade do algoritmo proposto, ele é implementado em seis diferentes sistemas de teste para a resolução de problemas do DE. Estudos comparativos são realizados para examinar a eficácia da

abordagem proposta com o DE convencional, e os outros algoritmos descritos na literatura. Os resultados das simulações mostram que o método proposto é capaz de obter soluções de melhor qualidade do que as outras técnicas de otimização bem conhecidos.

Li *et al.*, (2014) apresentam uma estratégia de despacho de economia de energia (ESD), com base no modelo de fluxo de potência ótimo (FPO), considerando restrições complexas, tais como zonas de operação proibidas, o efeito do ponto de válvula das unidades de geração e a taxa de carbono de uma rede de potência. Com estas restrições, o problema FPO fica mais difícil de resolver, e ele precisa ser tratado por um algoritmo de otimização mais preciso e confiável. No trabalho, foi desenvolvido um melhor otimizador de busca de grupo “*Group Search Optimizer*” com outras ajudas para resolver o problema do ESD. O sistema de energia de 30-barras do IEEE padrão é utilizado para a realização do estudo de simulação para testar o algoritmo, que posteriormente foi comparado com outros algoritmos evolucionários (EAS). Os resultados das simulações mostram que o algoritmo desenvolvido, nomeado GSOICLW supera aos outros utilizados, e também fornece resultados precisos e confiáveis de otimização em lidar com o problema de OPF para ESD.

Os problemas do DE frequentemente apresentam características não-lineares, não-convexas, devido aos efeitos do ponto de válvula. Além disso, várias restrições e fatores, tais como zonas proibidas de funcionamento, limites de taxa de gradiente e restrições de segurança impostas pelas unidades geradoras, e perda de energia na transmissão, tornam-se ainda mais desafiadores para obter o ótimo global utilizando métodos matemáticos convencionais. As abordagens meta-heurísticas são capazes de resolver problemas não-lineares, não-contínuos e não-convexos efetivamente embora eles não impõem requisitos sobre os problemas de otimização. No entanto, a maioria dos métodos relatados até agora concentra-se principalmente em um tipo específico de problemas de DE, tais como problemas de DE estáticos ou dinâmicos.

Niu, Zhang, Li, *et al.*, (2014) propõem uma busca harmônica híbrida com uma operação aritmética de crossover, chamado, ACHS, para a resolução de cinco diferentes tipos de problemas de DE, incluindo DE estático com efeitos de ponto de válvula, DE com zonas de operação proibidos, DE considerando várias células de combustível, DE com calor e energia combinados, e DE dinâmico. Neste ACHS proposto, a melhor informação global e o cruzamento aritméticos são usados para atualizar a solução recém-gerada e acelerar a convergência, o que contribui para a capacidade de exploração do algoritmo. Para equilibrar as capacidades e a exploração, é empregada uma aprendizagem baseada em estratégia de

oposição (OBL) para aumentar a diversidade de soluções. Além disso, quatro operadores de cruzamento comumente usados também são investigados, e o crossover aritmética mostra mais eficiência do que os outros quando eles são incorporados na HS.

Um método de busca simples, mas eficiente chamado busca harmônica (HS) com uma nova regra de ajuste (NPAHS) é proposto para o DED de sistemas de energia elétrica, um problema de otimização em larga escala não-linear em tempo real imposta por uma série de restrições complexas. A nova regra de ajuste do passo baseia-se na informação de perturbação e o valor médio da memória harmônica, que é simples de implementar e ajuda a melhorar a qualidade da solução e a velocidade de convergência. Uma nova técnica de manipulação de restrição também é desenvolvida para gerir eficazmente várias restrições no problema do DED, e da violação dos limites de gradiente de frequência entre os primeiros e últimos intervalos de agendamento que é muitas vezes ignorado por abordagens existentes para a solução de problemas DED é efetivamente eliminado. Para validar a eficácia, a NPAHS é usado para resolver o DED de três sistemas de 24 h com 5, 15 e 54 unidades, que consideram os efeitos de ponto de válvula, perdas na transmissão, emissões e zonas operacionais proibidas. Os resultados das simulações em todos estes sistemas mostram a escalabilidade e superioridade dos NPAHS em vários problemas de grande escala (NIU, ZHANG, WANG, *et al.*, 2014).

Modiri-Delshad e Rahim, (2014) apresentam um algoritmo nomeado “*Backtracking Search Algorithm*” (BSA) para a resolução de problemas do DE (ambos convexos e não convexos), com os efeitos ponto de válvula e sem eles na função custo do gerador e considerando as perdas da rede de transmissão. O BSA é um novo algoritmo evolutivo para a solução de problemas de otimização numérica; ele usa um único parâmetro de controle e duas estratégias de cruzamento e mutação para uma potente exploração do espaço de busca do problema. Quatro sistemas de teste (com 3, 6, 20 e 40 geradores) são os estudos de caso que verificam a robustez e eficácia do método. Os resultados confirmam que, em comparação com métodos bem conhecidos e, especialmente em sistemas de teste existentes em grande escala, o algoritmo proposto é a melhor abordagem para resolver problemas de DE.

Para Mandal *et al.*, (2014), o DE é um tópico importante na operação de usinas de energia que podem ajudar a construir planos de gestão de geração eficazes. Os problemas práticos do DE tem a função de custo não-linear com restrições não-lineares que tornam eles difícil de ser eficazmente resolvidos. Os autores apresentam, um novo e eficiente algoritmo chamado “*Krill Herd Algorithm*” (KHA) para resolver ambos os problemas de DE convexos e

não-convexos de unidades térmicas, considerando o ponto de válvula, a operação de combustível múltipla, as perdas de transmissão e restrições, tais como limites de taxa de gradiente e zonas proibidas de funcionamento.

Para melhorar o desempenho geral e a eficácia do algoritmo proposto, o operador de cruzamento e mutação de ED foi integrado com o método proposto. As diferentes versões do KHA são aplicados com sucesso em sistemas de energia de pequeno, médio e grande escala, e para resolver seis problemas DE diferentes. Os resultados da simulação obtidos pelos algoritmos propostos são comparados com os resultados obtidos usando outros métodos desenvolvidos recentemente disponíveis na literatura. A partir dos resultados numéricos, verifica-se que o KHA proposto com abordagem com operadores de cruzamento e mutação é capaz de proporcionar uma melhor solução do que outras técnicas relatadas em termos de custo de combustível. Além disso, este algoritmo é melhor em termos de robustez do que a maioria dos algoritmos existentes.

O DED desempenha um papel importante na operação do sistema térmico, e também apresenta características não lineares e não convexas quando são considerados os efeitos de ponto de válvula. Lu, P. *et al.*, (2014) adotam o algoritmo de otimização de colônia de abelha diferencial caótica (CDBCO) para resolver o problema do DED considerando os efeitos de ponto de válvula. Para aumentar a capacidade de busca global, sequências caóticas são aplicadas para gerar soluções de candidatos e um novo mecanismo de busca baseada na estratégia ED/best/1 é usado para gerar novas soluções.

Além disso, um método caótico de busca local (CLS) é usado para ajudar a otimização por colônia de abelhas (BCO) a superar a desvantagem de convergência prematura e aumentar a capacidade de exploração local. Durante o processo ideal, uma estratégia de tratamento de restrições heurística é introduzido para lidar com as diversas limitações do problema do DED. Por fim, a viabilidade e eficácia do algoritmo CDBCO proposta é provada por quatro unidades de casos de teste e comparado com outros métodos descritos na literatura recente. Os resultados das simulações mostram que o método proposto pode obter soluções de alta qualidade com o tempo computacional curto (LU, P. *et al.*, 2014).

Ghasemi *et al.*, (2014) desenvolvem um algoritmo confiável e eficaz, baseado no algoritmo híbrido modificado imperialista competitivo (MICA) e otimização de ervas daninhas invasoras (IWO) é proposto para resolver o problema ideal despacho de potência reativa (ORPD). Sem dúvida, um dos algoritmos de otimização simples, mas poderoso no campo da otimização evolutiva é o algoritmo competitivo imperialista (ICA) superando

muitos dos estocásticos já existentes e de técnicas de busca direta de otimização global. O método ICA original muitas vezes converge para um ótimo local. Para evitar este inconveniente, um novo método é proposto IWO para melhorar a busca local perto do melhor global e uma série de modificações são propostas para a regra de política de assimilação do ICA, a fim de aumentar ainda mais a taxa de convergência do algoritmo para a consecução de uma melhor qualidade solução. O método MICA-IWO híbrido é, então, oferecido para lidar com os problemas de ORPD.

O método introduzido é aplicado ao problema de ORPD nos sistemas de potência de 30, 57 e 118-barras do IEEE para fins de teste e validação. O híbrido MICA-IWO proporciona melhores resultados em comparação com o ICA original, IWO, e outros métodos descritos na literatura, como demonstrado pelos resultados da simulação (GHASEMI, GHAVIDEL, GHANBARIAN e HABIBI, 2014).

Para Ghasemi *et al.*, (2014) uma das principais ferramentas para operadores de sistema elétrico é o FPO, que é projetado para otimizar um determinado objetivo sobre as variáveis de rede de potência sob certas restrições. Um dos algoritmos mais simples, mais poderosos de otimização é o algoritmo competitivo imperialista (ICA) superando muitas das técnicas de otimização já existentes. O método ICA originais muitas vezes converge para um ótimo local. Por conseguinte, a fim de evitar este inconveniente, os efeitos de interação das colônias em cada outro são modelados para melhorar a busca local perto do ótimo global.

Além disso, uma série de modificações é proposta para a regra de política de assimilação do método ICA, a fim de aumentar ainda mais a taxa de algoritmo de convergência para alcançar uma melhor qualidade da solução. O artigo investiga a possibilidade de utilizar esta recentemente emergida abordagem evolutiva como uma solução para os problemas de FPO que é baseada no método ICA com suas técnicas modificadas para configurações ideais de variáveis de controle de FPO. O desempenho desta abordagem é estudada e avaliada no sistema de teste padrão 57-barras do IEEE com funções objetivo diferentes e é comparado com os métodos descritos na literatura recente. As técnicas modificadas do método ICA proposto mostram melhores resultados do que o ICA original e outros métodos recentemente relatada na literatura, como foi demonstrado pelos resultados de simulação.

Basu, M, (2014b) também apresenta um algoritmo de otimização chamado de “*Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm*” para resolver o problema do despacho econômico multi-área (MAED) com restrições de linha e considerando: as perdas de

transmissão, múltiplos combustíveis, carregamento de ponto de válvula e zonas operacionais proibidas. O TLBO (otimização baseada em ensino-aprendizagem) é um dos algoritmos com bases populacionais recentemente proposto que simula o processo de ensino-aprendizagem da sala de aula. É uma técnica de otimização global muito simples e robusta. A eficácia deste algoritmo foi verificada em três diferentes sistemas de teste, tanto pequenos como grandes, envolvendo vários graus de complexidade. Comparado com a evolução diferencial, e o algoritmo genético, considerando a qualidade da solução obtida, o algoritmo proposto parece ser uma alternativa promissora de abordagem para resolver os problemas MAED em sistemas de potência reais.

Ghasemi *et al.*, (2014) também apresentam um novo método para a otimização multi objetivo nomeado “*Chaotic Parallel Vector Evaluated Interactive Honey Bee Mating Optimization*” (CPVEIHBMO) para encontrar a melhor solução viável ao problema multiobjetivo do despacho de potência reativa (RPD) ótimo considerando as restrições operacionais dos geradores. O problema RPD ideal é uma questão importante com estrutura não-linear na indústria da geração de energia, que consiste em as variáveis de controle contínuas e discretas. O algoritmo proposto é aplicado para encontrar as configurações de variáveis de controle contínuos e discretos, mudando transformadores, geradores de tensões, e a quantidade de dispositivos de compensação reativa para otimizar três funções objetivos conflitantes e não comensuráveis: desvio da tensão, a total estabilidade de tensão e perda de potência real.

Para conseguir um bom design com soluções diferentes em um problema de otimização multiobjetivo, o conceito de dominância de Pareto é utilizado para gerar e distribuir as soluções dominadas e não-dominadas. Além disso, a teoria dos conjuntos fuzzy é utilizada para extrair a melhor solução. O método proposto foi examinado individualmente e aplicado a vários sistemas de teste. A eficácia da abordagem proposta é demonstrada comparando seu desempenho com outros algoritmos de otimização multi-objetivos evolutivos. Os resultados computacionais mostram que o algoritmo proposto tem excelentes características de convergência e é superior a outros múltiplos algoritmos objetivos de otimização. Além disso, os resultados confirmam o seu grande potencial em lidar com os problemas de múltiplos objetivos em sistemas de energia.

### **2.3 O DEA usando um único objetivo**

O despacho das emissões é uma atraente alternativa de curto prazo. Além do objetivo de custo de combustível devem ser minimizadas as emissões; assim, o problema do DE pode

ser tratado como um problema de otimização multicritério com os objetivos não-comensuráveis e contraditórios. Em anos recentes, esta opção tem recebido muita atenção, como diz, Hamedi, (2013); Mandal *et al.*, (2015), uma vez que requer apenas pequenas modificações do DE básico para incluir as emissões. Diferentes técnicas têm sido relatadas na literatura referentes ao problema do despacho ambiental/econômico (EED) (YANG *et al.*, 2012; GHASEMI, 2013; JANA e MANDAL, 2013; MONDAL *et al.*, 2013; NIKNAM *et al.*, 2013; ROY *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2013).

Em Yokoyama *et al.*, (1988); Farag *et al.*, (1995), o problema tem sido reduzido a um único problema objetivo, tratando a emissão como uma restrição. Esta formulação, contudo, tem uma grave dificuldade em obter as relações de compensação entre o custo e a emissão. Alternativamente, a minimização da emissão tem sido tratada como outro objetivo além do custo.

Em outra direção, o problema multiobjetivo pode ser convertido a um único problema objetivo mediante a combinação linear de diferentes objetivos, como uma soma ponderada (CHANG *et al.*, 1995; MORSALI *et al.*, 2014). O aspecto importante deste método da soma ponderada é que um conjunto de soluções não inferiores (ou soluções ótimas de Pareto) pode ser obtida através da variação dos pesos. Infelizmente, esta requer várias execuções tantas vezes quanto o número de soluções ótimas de Pareto desejada. Além disso, este método não pode ser utilizado em problemas com uma solução ótima de Pareto não convexa. Para evitar essa dificuldade, outros métodos são mostrados em (HSIAO *et al.*, 1994; COELLO, 1999; ZHANG *et al.*, 2012).

Estes métodos otimizam o objetivo mais preferido e consideram os outros objetivos como restrições delimitadas por alguns níveis permitidos. As fraquezas mais óbvias desta abordagem são que é demorado e tende a encontrar soluções fracamente não dominadas. Recentemente, os estudos sobre algoritmos evolucionários têm mostrado que estes métodos podem ser utilizados de forma eficiente para eliminar a maioria das dificuldades dos métodos clássicos (OMMEN *et al.*, 2014). Desde que utilizam uma população de soluções na sua pesquisa, e múltiplas soluções Pareto-ótimas podem, em princípio, ser encontradas em uma única corrida.

Um fator de penalidade de custo para resolver o problema do DEAR, que combina os custos de emissão com custos de combustível foi proposto por (WANG e YURYEVICH, 1998a).

A formulação da programação semi-definida (SDP) do problema de despacho econômico ambiental multiobjetivo é apresentado por Jubril, A. *et al.*, (2014). As funções de custo de combustível e de emissão são representadas por funções polinomiais de ordem superior e isto se mostrou como uma representação mais precisa do problema do EED. Além disso, as funções polinomiais de ambas as funções objetivo são agregadas em uma única função objetivo utilizando a abordagem da soma ponderada. Isto reduz, assim, o problema a um problema de otimização polinomial padrão que foi formulado como uma hierarquia de problemas de relaxamento semi-definidos. O problema SDP resultante foi então resolvido em diferentes graus de aproximação. O desempenho da abordagem proposta foi avaliado através da realização de experiências sobre os sistemas de teste de 6-unidade padrão e 13 unidades da IEEE. Os resultados obtidos foram comparados com os relatados na literatura e indicou que SDP tem inerentemente boa propriedade de convergência e proporciona uma melhor exploração da frente de Pareto.

#### **2.4 Despacho Econômico Ambiental Multiobjetivo**

Nanda *et al.*, (1988) propôs um método de programação por metas técnicas para avaliar o custo marginal ambiental que indica o aumento da porção de custo do sistema de operação enquanto o impacto sobre o meio ambiente é melhorado. Para (GRANELLI *et al.*, 1992) tentaram encontrar as melhores soluções de compromisso entre as metas conflitantes de custo mínimo e mínima emissão por meio de procedimentos multiobjetivo adequados.

Qi *et al.*, (2017) propõem o uso das redes neurais para solucionar o problema do despacho econômico com emissões, uma vez que ele minimiza o custo de combustível durante certo tempo pré-selecionado e leva em conta completamente as limitações ambientais.

Conforme Heslin e Hobbs, (1989); Finenko e Cheah, (2016); Kopsakangas-Savolainen *et al.*, 2017; Procter, (2017) várias estratégias para reduzir as emissões têm sido propostas e discutidas. Estas incluem instalação de equipamentos de limpeza de poluentes, a mudança para combustíveis de baixa emissão, substituição dos combustíveis e queimadores velhos com os mais limpos, e despacho de emissões. As três primeiras opções exigem a instalação de novos equipamentos e/ou modificação dos existentes que envolvem consideráveis dispêndios de capital e, portanto, eles podem ser considerados como opções em longo prazo.

O Despacho Econômico Ambiental Dinâmico (DEED) de geração de energia elétrica é um problema de otimização matemática multi-objetivo com duas funções objetivo. O primeiro objetivo é minimizar todos os custos de combustível dos geradores no sistema de

potência, enquanto que o segundo objetivo visa minimizar o custo das emissões. Ambas as funções objetivo estão sujeitas a restrições, como a restrição de demanda de carga, restrição de gradiente de velocidade, entre outras restrições.

Em Nwulu, Nnamdi I e Xia, Xiaohua, (2015) os autores integram um programa de resposta ao problema do despacho econômico ambiental dinâmico com base a teoria dos jogos. O programa de resposta à demanda baseada na teoria dos jogos determina o incentivo horário ótimo para ser oferecido aos clientes que se inscreverem para corte de carga. O modelo de teoria dos jogos tem mecanismos internos para garantir que o incentivo oferecido aos clientes é maior do que o custo de interrupção, ao mesmo tempo sendo benéfico para a concessionária. O modelo de resposta à demanda teórica apresentada neste trabalho, minimiza os custos de combustível e as emissões e, ao mesmo tempo determina o incentivo e corte de carga ideais que tem que se executar para o alívio do sistema a potência máxima. O modelo desenvolvido é testado em dois sistemas de testes com clientes industriais e os resultados obtidos indicam os benefícios práticos do modelo proposto.

Mandal *et al.*, (2015) apresentam uma nova estratégia de automação para os algoritmos de otimização por enxame de partículas para a solução de problemas de Despacho Econômico Ambiental Não Convexo Restringido (NECED). Muitas técnicas evolutivas, tais como otimização por enxame de partículas e evolução diferencial foram aplicadas para resolver estes problemas e encontrou-se como uma maneira melhor, em comparação com os métodos de otimização convencionais. Mas, muitas vezes estes métodos convergem para uma solução sub-ótima prematuramente. No artigo, os autores apresentam uma nova e melhorada técnica de otimização por enxame de partículas chamada técnica auto - organizada hierárquica de otimização por enxame de partículas com coeficientes de aceleração variáveis no tempo (SOHPSO\_TVAC) para o NECED para evitar a convergência prematura. Limites de taxa de gradiente dos geradores e zonas de operação proibidas são levados em conta na formulação do problema. A solução para o problema NECED é obtida considerando-se tanto os objetivos de economia como as emissões. O desempenho do método proposto é demonstrado em dois sistemas de teste da amostra. Os resultados do método proposto são comparados com outros métodos. Verificou-se que os resultados obtidos pelo método proposto são superiores em termos de custos do combustível, saída de emissões e perdas.

Segundo Arul *et al.*, (2015), o principal objetivo do problema do despacho econômico dinâmico combinado com emissões (CDEED) é determinar o esquema ideal de geração de energia para as unidades geradoras de linha ao longo de um horizonte de tempo considerado

e, simultaneamente, minimizar o nível de emissão no que respeita aos geradores e as limitações do sistema. O problema CDEED é um problema de otimização biobjetivo, onde o custo de geração e emissão é considerado como duas funções objetivo concorrentes. Este problema CDEED multiobjetivo é representado como um problema de otimização de um único objetivo atribuindo pesos diferentes para cada função objetivo. Os pesos são variados em etapas e para cada variação é gerada uma solução viável e o método de seleção baseado na lógica fuzzy é usado finalmente para selecionar a melhor solução viável a partir do conjunto de soluções obtido.

Diferentes versões dos algoritmos “*Differential Harmony Search*” (DHS) têm sido propostas para resolver os problemas do CDEED. A viabilidade dos algoritmos propostos é demonstrada em sistemas de 26-barras e 39-barras do IEEE. O resultado obtido pelo algoritmo “*Chaotic Self-Adaptive Differential Harmony Search*” (CSADHS) proposto é encontrado para ser melhor do que o EP (programação evolutiva), DHS, e os outros algoritmos propostos em termos de qualidade da solução, a velocidade de convergência e de tempo de computação (DOS SANTOS COELHO e MARIANI, 2009; DOS SANTOS COELHO *et al.*, 2010; ARUL *et al.*, 2013; WANG e LI, 2013; SHAYEGHI e GHASEMI, 2014).

Para Sayah *et al.*, (2014), as usinas geradoras de energia geralmente operam sobre a estratégia do DE, independentemente de emissões produzidas. As questões ambientais tornaram-se uma das principais preocupações de gestão. Nestas circunstâncias, a estratégia alternativa do despacho meio ambiente/economia (EED) está se tornando mais e mais desejável para não só resultar em grande benefício econômico, mas também reduzir a emissão de poluentes. Com base na revisão da literatura, algumas tentativas foram feitas em considerar os efeitos do ponto de válvula para fazer mais real o problema do EED.

Neste trabalho, os autores propõem um novo algoritmo de evolução diferencial híbrido eficiente com busca harmônica (DE-HS) para resolver os problemas de otimização multiobjetivo do EED que apresentam curvas de custo não lineares. A abordagem proposta combina de forma mais eficaz as propriedades dos algoritmos da ED e de busca harmônica (HS). Para aumentar a capacidade de busca local do método ED original, é utilizado o novo mecanismo de geração individual do HS. Os resultados numéricos para três estudos de caso foram apresentados para ilustrar o desempenho e aplicabilidade do método híbrido proposto. Os resultados comparativos com alguns dos métodos mais recentemente publicados confirmam a eficácia da estratégia proposta para encontrar uma solução ótima exata e viável.

Shayeghi e Ghasemi, (2014) desenvolvem um algoritmo de colônias de formigas artificial (ABC), o qual é modificado com base na teoria do caos obtendo-se o CIABC o qual é amplamente reforçada e efetivamente aplicado para resolver os problema multi-objetivo do EED, para minimizar três funções objetivos conflitantes com características de custo de combustível do gerador não-lisas e não convexas, e que satisfaçam as restrições de operação. O método proposto utiliza uma procura local caótica (CLS) para aumentar a capacidade de auto busca do algoritmo ABC original para encontrar as melhores soluções viáveis do problema EED. Além disso, muitas restrições lineares e não lineares, como os limites de geração, a perda de transmissão da linha, restrições de segurança e funções de custo não-lineares são consideradas como restrições operacionais dinâmicas. Além disso, é utilizado um método baseado na teoria dos conjuntos fuzzy para extrair uma das soluções ótimas de Pareto.

A crescente consciência ambiental e os conflitos aparentes entre objetivos econômicos e ambientais transformam os problemas de planejamento de energia em problemas de otimização multiobjetivos. Rong *et al.*, (2014), consideram a combustão de combustível misto como uma opção para alcançar equilíbrio entre o objetivo econômico (associado com custo de combustível) e o objetivo de emissão (medido em custo de emissão de CO<sub>2</sub> de acordo com o preço de combustíveis e de licenças de emissão), porque um combustível com emissões mais elevadas é geralmente mais barato do que com emissões mais baixas. A produção combinada de calor e potência (CHP) é uma importante tecnologia de alta eficiência para promover no âmbito do regime de comércio de emissões.

Para Liang e Juarez, (2014), a solução dos problemas do EED/MED torna-se separadamente mais complexa que quando a versão combinada (CEED) dos dois casos acima mencionados é considerada. A ideia básica é a de atingir o menor custo possível, com a menor quantidade de poluentes e esse problema é conhecido como o despacho econômico ambiental combinado (CEED). A nova abordagem para a resolução do CEED é apresentada neste trabalho. A ideia consiste em normalizar as duas funções objetivo conflitantes, DE e MED, usando o desvio média e padrão dos membros contidos na base populacional dos algoritmos implementadas na meta-heurística deste estudo evitando assim as diferenças de unidades e de escala quando otimizar o problema CEED. O modelo matemático para cada problema (DE, MED, e CEED) apresentado neste estudo é otimizado implementando um pacote de otimização não-linear chamado TOMLAB disponível para MATLAB, que nos ajuda a determinar a melhor possível solução para as instâncias testadas. Uma nova meta-heurística chamada “*Virus Optimization Algorithm*” (VOA) é implementada juntamente com sete

conhecidas técnicas, que são o Algoritmo Genético (GA), Enxame de Partículas (PSO), Harmony Search (HS), Evolução Diferencial (ED), algoritmo FireFly (FF), Gravitacional Pesquisa Algorithm (GSA), e Seeker Optimization Algorithm (SOA).

Para Jiang *et al.*, (2014); Khadanga e Satapathy, (2015), a Otimização por enxame de partículas (PSO) é inspirado por comportamentos sociais dos grupos de aves, o algoritmo de busca gravitacional (GSA) baseia-se na lei da gravidade e interação entre massas, e ambos pertencem a algoritmos meta-heurísticos. Um novo método de otimização híbrido que combina o enxame de partículas e o algoritmo de busca gravitacional (HPSO-GSA), com atributos de PSO e GSA, é proposto por Jiang *et al.*, (2014); Khadanga e Satapathy, (2015) para resolver o problema do EDE considerando várias restrições práticas. Essas restrições consistem no limites de frequência do gerador, natureza não-convexo e descontínua de zonas proibidas de funcionamento, características não-suave dos efeitos de ponto de válvula, combustíveis múltiplos, tipo de unidades de geração, e as perdas de transmissão em sistemas de potência reais.

A abordagem proposta incorpora conceitos interessantes e incorpora plenamente a essência social do PSO com o mecanismo de movimento da GSA. A proposta HPSO-GSA adota a técnica co-evolucionária para atualizar simultaneamente posições de partículas com velocidade do PSO e aceleração de GSA. HPSO-GSA, portanto, espera-se obter um equilíbrio eficiente entre pesquisa e exploração. A partir dos resultados de testes, HPSO-GSA melhora significativamente o PSO e o GSA com um melhor desempenho. Como uma aplicação real, os problemas de EDE em cinco sistemas de teste, incluindo diferentes restrições são resolvidos pelo HPSO-GSA para avaliar o desempenho da abordagem híbrida proposta para a otimização. Os resultados obtidos confirmam o potencial e a eficácia da abordagem proposta em comparação com PSO, GSA e outros algoritmos publicados na literatura para a solução dos problemas EDE.

O problema do DE é um dos problemas básicos e importantes de otimização em um sistema de energia. No entanto, considerando as limitações práticas de sistemas de energia do mundo real, tais como limites de gradiente de velocidade, zonas proibidas de funcionamento, efeitos de carregamento de válvula, opções de multi-combustível, fiação de reserva e de perdas nos sistemas de transmissão, o problema DE se torna num problema de otimização não-convexo, o que é complicado e não pode ser resolvido por métodos tradicionais. Além disso, considerando as questões ambientais, resulta em problema econômico combinado de despacho de carga e emissões, chamado também despacho econômico-ambiental (CEDE),

que é um modelo de otimização multiobjetivo com dois objetivos não comensuráveis e contraditórios.

Jeddi e Vahidinasab, (2014) propõem e aplicam um algoritmo de busca harmônica modificado (MHSA) para resolver o problema de DE e CEDE, considerando as limitações acima referidas. O desempenho do algoritmo proposto é investigado através da sua aplicação para resolver vários sistemas de teste com espaços de solução não-convexas. Para mostrar a eficácia do método proposto, os resultados obtidos foram comparados com o algoritmo de busca de harmonia clássica (HSA) e alguns dos trabalhos mais recentemente publicados na área.

Zhang *et al.*, (2013) abordam o EED usando um novo algoritmo chamado “Algoritmo cultural multiobjetivo”.

O Algoritmo Incremental com Colônias de Abelhas Artificiais com a Pesquisa Local (IABC-LS) é uma das variantes eficientes de otimização da Colônia de Abelha Artificial que foi aplicado com sucesso em problemas de despacho econômico de potência com anterioridade. Todavia, o algoritmo IABC-LS tem alguns parâmetros ajustáveis que estão afetando diretamente o comportamento do algoritmo. Aydin *et al.*, (2014) introduzem um novo algoritmo nomeado Colônia de Abelha Artificial com tamanho dinâmico da população (ABCDP) que usa mecanismos semelhantes aos definidos no IABC-LS sem usar muitos parâmetros a serem afinados. Para comprovar a eficiência e robustez do algoritmo no despacho de carga, o algoritmo é utilizado para resolver o problema de despacho econômico e emissão combinada que é convertido em único problema objetivo de otimização. Os resultados dos algoritmos indicam que ABCDP está dando bons resultados com técnicas de inteligência computacional em sistemas.

Basu, M, (2014a) apresenta o uso do NSGA-II para a solução do problema do despacho de emissão e econômica restringido das unidades geradoras térmicas. Este é um problema de otimização multi-objetivo que inclui as limitações normais de carga, bem como as restrições de combustível. O esquema de geração é comparada com o que resultaria se as restrições de combustível são ignorados.

A comparação mostra que o combustível consumido pode ser adequadamente controlada pelo ajuste da potência de saída de várias unidades geradoras de modo que o sistema de energia opera dentro de suas limitações de combustível e dentro das restrições contratuais. Verificou-se que um dos dois objetivos (ou seja, o custo de combustível e nível de emissões) pode ser aumentada, enquanto outros podem ser diminuída para atender a

mesma demanda de energia, mas isso pode compensar a penalidade que poderia ser de outra forma imposta por não manter o contrato de combustível. Os resultados numéricos para dois sistemas de teste foram apresentados e os resultados do teste são satisfatórios.

Para Benaśla *et al.*, (2014), o “*Spiral Optimization Algorithm*” (SOA) é uma técnica metaheurística baseada em uma analogia dos fenômenos espirais na natureza e é um conceito simples, poucos em parâmetros e fácil na sua execução. Neste trabalho, SOA é proposto para resolver o problema do CEED. Destina-se, no problema CEED, que a programação de geradores deve operar com os custos mínimos de combustível e os níveis mínimos de emissões, ao mesmo tempo, desde que satisfaçam a demanda de carga e restrições operacionais. O problema CEED é formulado como um problema multiobjetivo, considerando os objetivos de custo de combustível e de emissões das unidades geradoras. O problema de otimização multiobjetivo é convertido em uma única função objetivo usando um fator de penalidade de preço. O algoritmo proposto foi implementado em três sistemas de teste com 3, 6, e 40 unidades geradoras, com diferentes restrições e várias curvas de custo. A fim de ver a eficácia do algoritmo proposto, os resultados são comparados com os relatados na literatura recente. Esses resultados são bastante animadores, mostrando a boa aplicabilidade do SOA para o problema CEED.

De acordo com Bhattacharjee *et al.*, (2014a) também apresentam uma abordagem do algoritmo “*Real Coded Chemical Reaction*” (RCCRO) para resolver o problema do EDE de geradores térmicos de sistemas de potência. A emissão de substâncias como  $\text{NO}_x$ , as restrições das demandas de potência e restrição do limite de operação são consideradas aqui. O problema do EDE foi originado como um problema multiobjetivo, considerando tanto a economia e emissões simultaneamente. A Otimização por Reação Química (CRO) imita as interações de moléculas em uma reação química para alcançar um estado estável de baixa energia. Basicamente, o CRO é projetado para trabalhar nos problemas de otimização de domínios discretos. A versão real codificada dele, conhecida como “*Real-Coded Chemical Reaction Optimization*” (RCCRO) é aplicada aqui para resolver problemas multiobjetivos de EDE. Sistemas de teste diferentes que têm 10, 13 e 40 geradores, abordando o carregamento do ponto válvula e emissões de  $\text{NO}_x$  foram considerados. As soluções obtidas são bastante animadoras e superiores a diferentes técnicas de otimização existentes (BHATTACHARJEE *et al.*, 2014a).

O DE ou EED é um problema multiobjetivo não-linear restringido com dois objetivos concorrentes e conflitantes. Di *et al.*, (2014) propõem um algoritmo melhorado chamado

evolução diferencial binário multiobjetivo (IMBDE) para resolver o problema do EED. No algoritmo proposto, um operador de correção de análise marginal é apresentado para lidar com várias restrições do sistema. Os resultados da simulação demonstram que o algoritmo proposto é válido para a resolução do problema EED e o seu desempenho é superior a outras abordagens (DI *et al.*, 2014).

O problema de despacho econômico ambiental é um problema clássico na comunidade de sistemas de potência. Consiste na programação ótima de produção das unidades de geração de energia para atender a demanda de carga necessária sujeita a desigualdade e igualdade das unidades e ao sistema de restrições e levando em consideração as questões ambientais. Este problema de otimização é um desafio em três diferentes níveis: a geometria viável do seu conjunto, a não-diferenciabilidade de sua função de custos e o aspecto multimodal de seu cenário. Por esta razão, o despacho econômico ambiental tem recebido muita atenção nos últimos anos e têm sido propostas várias técnicas livres derivativas para enfrentar suas características multimodais e não diferenciável.

## **2.5 Despacho Econômico Ambiental de sistemas de potência com energias renováveis**

Nos dias atuais, os sistemas de energias renováveis tem grande destaque estabelecendo-se grande procura no uso de fontes de energia renováveis que para Li *et al.*, (2015) consideram o DEA de sistemas de potência hidrotérmicos como um problema de otimização multiobjetivo. O sistema hidrotérmico prático possui várias restrições que tornam difícil o problema de encontrar o ótimo global. O trabalho desenvolve uma estimativa multiobjetivo melhorada do algoritmo de distribuição para resolver o problema acima. A operação de aprendizagem local é adicionada no modelo original da regularidade baseado no modelo de estimação multiobjetivo de distribuição (RM-MEDA) na abordagem melhorada de modo a aperfeiçoar a capacidade de busca local e aumentar a eficiência de convergência. Além disso, um mecanismo de reparação é empregado para reparar as soluções inviáveis pesquisadas a fim de ser capaz de pesquisar na região viável. No experimento, os resultados obtidos pelo método proposto foram comparados com os de outros métodos de MOEAs: NSGA-II, NNIA e RM-MEDA. Os resultados demonstram a superioridade deste método proposto como um MOEA promissor para resolver este problema de otimização multiobjetivo de sistemas de potência (LI *et al.*, 2015).

Há décadas, o fornecimento de energia confiável e de baixo custo é um dos objetivos de investigação significativos. Vários métodos de DE foram desenvolvidos a fim de enfrentar o desafio de fornecimento contínuo e sustentável de energia elétrica a um custo otimizado.

A escalada rápida dos preços dos combustíveis, o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e as preocupações ambientais obrigaram-nos a incorporar aos recursos da Energia Renovável (ER). Khan *et al.*, (2015) apresentam os modelos desenvolvidos do EED para um sistema constituído por várias plantas fotovoltaica (PV) e unidades térmicas. Com base na natureza das variáveis de decisão, o modelo proposto é essencialmente um Problema de Otimização Inteiro Misto “*Mixed Integer Optimization Problem*” (MIOP). O Enxame de Partículas (PSO) é usado para resolver o problema de otimização para um cenário envolvendo seis plantas convencionais e treze PV. Dois casos de teste, Despacho Econômico Ambiental Estático (SCEED) e Despacho Econômico Ambiental Dinâmico (DCEED). O SCEED são executados para o nível de radiação solar completo, bem como para o nível de radiação reduzida devido ao efeito de nuvens. Os resultados das simulações provaram a eficácia do modelo proposto (KHAN *et al.*, 2015).

Gopalakrishnan e Kosanovic, (2015) tratam do planejamento operacional a curto prazo (até 24 h) em plantas de co-geração de energia para aplicações de distrito. Em tais aplicações, as demandas de calor e energia flutuam numa base horária, devido à mudança das condições meteorológicas, fatores de tempo no dia e exigências dos consumidores. A eficiência energética da planta é altamente dependente da temperatura ambiente e à carga operacional desde eficiências de equipamentos são funções não-lineares destes parâmetros. No planejamento de estratégias operacionais, as características dos equipamentos não-lineares são raramente levadas em conta. Para operar as plantas sob maior eventuais ganhos de eficiência, as estratégias de planejamento, que tenham em conta as características dos equipamentos não-lineares precisam ser desenvolvidas. Para tais estratégias, uma formulação não-linear de programação mista 0-1 é proposta. O problema é não convexo e, portanto, as condições de otimização globais são desconhecidas. As técnicas clássicas como branch-and-bound podem não produzir soluções viáveis. Como alternativa, um método de solução por meio de algoritmos genéticos é proposto, no qual a pesquisa genética é aplicada apenas em variáveis 0-1 e a pesquisa gradiente é aplicada sobre as variáveis contínuas.

O problema de despacho econômico multi-objetivo (MOED) em sistemas de hidrelétricas em cascata é um problema de otimização não-linear complexa com um grupo de restrições complexas. Wang *et al.*, (2015) desenvolveram um algoritmo genético melhorado

(IPGA) para resolver o problema do MOED em sistemas de energia com hidrelétricas com base no operador de mutação não-uniforme. Em comparação com outros algoritmos, os resultados obtidos utilizando IPGA verificam a sua superioridade em termos de eficiência e precisão.

De acordo com Yuan *et al.*, (2015), devido às características de ser limpa e renovável, a energia eólica é muito importante para à exploração econômica e ambiental dos sistemas de energia elétrica de modo que atrai cada vez mais atenção por parte dos pesquisadores. No artigo desenvolvido por esses autores estabelecem um modelo multi-objetivo do despacho econômico ambiental considerando o custo incerto do vento. Para resolver o problema com várias restrições complicadas, o trabalho utiliza o NSGA-III, introduzindo o critério de relação de dominância com base na violação de restrição para selecionar uma nova geração. Finalmente, um exemplo de agendamento diário do sistema hidro-térmico-vento é usado para testar a capacidade de NSGA-III para resolver o problema. Conclui-se a qualidade superior e boa distribuição das soluções ótimas de Pareto que, NSGA-III pode oferecer uma alternativa eficiente para otimizar o problema de despacho de carga com diferentes fontes envolvidas.

Em Osório *et al.*, (2015), uma metodologia para resolver o problema DE, considerando a incerteza de confiabilidade de geração dos geradores de energia eólica é apresentado. A correspondente função de distribuição de probabilidade (PDF) de geração de energia eólica disponível é discretizada e introduzida no problema de otimização, a fim de descrever probabilisticamente a geração de energia de cada unidade térmica, as limitações da energia eólica, ENS (energia não fornecida), o excesso de geração de potência, e o custo total de geração. O método proposto é comparado ao Monte Carlo Simulation (MCS) abordagem, sendo capaz de reproduzir o PDF de uma forma razoável, especialmente quando a confiabilidade do sistema não é levada em conta.

Neves e Silva, (2015) no seus estudos utilizam o DHW (água quente doméstica) de backup elétrica a partir de sistemas solares térmicos para otimizar o despacho total de energia de uma mini-rede isolada. A abordagem proposta estima a carga horária de DHW, e propõe e simula diferentes estratégias DR (resposta à demanda), do lado da oferta, para minimizar os custos de despacho de um sistema de energia. O estudo de caso consiste em otimizar a carga de energia elétrica, em um dia representativo, com baixa radiação solar, na Ilha do Corvo, Açores. O DHW backup é induzida por três diferentes padrões de demanda. O estudo compara diferentes estratégias de DR: *backup* na demanda (sem estratégia), backup pré-agendadas com dois horários diferentes impostas, uma estratégia baseada em programação

linear e, finalmente, duas estratégias de uso de algoritmos genéticos, com diferentes formulações para *DHW backup*, uma que assegura número de sistemas e outra que assegura a demanda de energia.

As estratégias de DR pré-determinadas podem aumentar os custos de produção, mas as estratégias de DR com base em algoritmos de otimização são capazes de diminuir os custos de geração. Em particular, a programação linear é a estratégia que apresenta o menor aumento em custos de envio, mas a estratégia baseada em algoritmos genéticos é a que melhor se minimiza os custos de operação diária e da demanda total de energia do sistema.

Morshed e Asgharpour, (2014) apresentam um novo método baseado em um algoritmo híbrido constituído por o algoritmo imperialista competitivo (ICA) e a técnica de programação quadrática sequencial (SQP) para resolver o DE de um sistema de potência. O ICA poderia ser levado em conta como uma poderosa técnica. No entanto, ele pode ser preso em mínimos locais, especialmente quando os números de imperialistas aumentam. Para minimizar esse problema, a SQP é usada para afinar os resultados da ICA e para aumentar a confiança na solução. As fontes renováveis de energia eólica têm recebido recentemente mais interesse por causa das várias considerações ambientais e econômicas. Assim, a energia eólica é incluída na formulação do problema.

A função gama incompleta (IGF) é usada para caracterizar o impacto da energia eólica. O algoritmo híbrido imperialista competitivo (ICA) e a técnica de programação quadrática sequencial (SQP) formam o (HIC-SQP) que é aplicada para resolver o problema do EDE com a incorporação de energia eólica estocástica. Para avaliar a sua eficácia, o método proposto é testado em vários sistemas de energia com 6, 13, 15, e 40 plantas de potência com e sem energia eólica. Os resultados da simulação do método proposto são comparados com métodos de otimização heurística da literatura. Pode ser claramente visto que o método proposto melhora a solução do problema EDE (MORSHED e ASGHARPOUR, 2014).

Com o crescente desenvolvimento de parques eólicos, as soluções do EED estão se tornando mais difícil para atender a demanda de ambos, otimalidade e robustez devido as incertezas da energia eólica. Lu, Z. *et al.*, (2014) desenvolvem um modelo Robusto de Despacho Econômico Ambiental (REED) com base numa função eficaz para lidar com a incerteza da energia eólica e o método da “*Latin Hypercube Sampling*” (LHS) é empregado para melhorar a precisão do cálculo da função efetiva. Como a captura e armazenamento de carbono (CCS) desempenha um papel importante na redução das emissões de carbono, o impacto da CCS, que opera no modo flexível, sobre o problema da EED também é

investigado. Para resolver o problema REED foi usado a “*Multi-Objective Bacterial Colony Chemotaxis*” (MOBCC). Finalmente, os testes do método proposto foram realizadas no sistema de ensaio de IEEE 30 barras. Os resultados demonstram que o modelo REED pode atender a demanda de obtenção de soluções robustas na presença de incertezas de energia eólica e operação flexível do CCS tem a vantagem de lidar com o índice de redução de carbono (LU, Z. *et al.*, 2014).

Kherfane *et al.*, (2014) examinam a injeção de energia eólica à rede elétrica. A abordagem é aplicada a 30 barras e em uma parte ocidental da rede de energia da Argélia. Os resultados obtidos são comparados com os da literatura. Este trabalho apresenta um novo método combinado em dois métodos meta-heurísticos, o algoritmo genético (GA) e o Micro Algoritmo Genético (MGA) para resolver o problema do DE. O GA é aplicado para encontrar o ótimo global entanto o MGA é usado para procurar o melhor local. O problema foi solucionado através de examinar a injeção de energia eólica à rede elétrica. A abordagem é aplicada a 30 barrase em uma parte ocidental da rede de energia da Argélia. Os resultados obtidos são comparados com os da literatura.

El-Sobky e Abo-Elnaga, (2014) apresentam um algoritmo de região de confiança para resolver o problema multi-objetivo do EDE. O algoritmo região de confiança (trust region) provou ser uma técnica de globalização de muito sucesso para resolver problemas de otimização restritos de um único objetivo. A abordagem proposta é adequada para o problema multi-objetivo (EDE). Além disso, foram identificados os valores de peso que refletem o grau de satisfação de cada objetivo. A abordagem proposta é levada sobre os sistemas de teste padrão da IEEE de 30-barras 6-gerador para confirmar a eficácia do algoritmo utilizado para resolver o problema multiobjetivo do EDE. Os resultados com a abordagem proposta foram comparados com aqueles relatados na literatura. A comparação demonstra a superioridade da abordagem proposta e confirmam o seu potencial para resolver o problema multiobjetivo de (EDE). Uma implementação em Matlab do algoritmo foi usada na solução de um estudo de caso e os resultados são apresentados.

O interesse em fontes de energia renováveis está crescendo e o estudo de diferentes aspectos de integração desses recursos se torna muito importante para superar os problemas causados por sua variabilidade ou incerteza.

Bilil *et al.*, (2014) tratam o despacho de carga econômico ambiental como um problema multiobjetivo probabilístico. As funções de custo de operação e a emissão de gases de estufa são considerados como a soma de uma parte determinística e uma probabilística. Em

primeiro lugar, o problema é resolvido com base em valores esperados de energia eólica gerada em seguida, usando a função densidade cumulativa (CDF) de cada fonte de energia renovável (RES), o CDF da reserva necessária para compensar a variabilidade das RESs, a fim de manter um balanço de potência. Em seguida, respeitando à contribuição de reserva de cada gerador térmico, a parte probabilística do custo global de produção, bem como, a sua CDF são desenvolvidos. Finalmente, a abordagem proposta é aplicada para resolver o problema de despacho de potência ativa do sistema de teste da IEEE de 30 barras em dois casos com e sem RESs. Os resultados das simulações mostram que este método permite obter a informação completa sobre a função de distribuição acumulada do custo total real da operação do sistema.

Segundo Bilil *et al.*, (2014), o estudo de diferentes aspectos de integração de fontes de energia renováveis (RES) torna-se muito importante para superar os problemas causados por sua variabilidade ou incerteza. Os autores tratam o despacho de potência econômico ambiental como um problema multiobjetivo probabilístico. O custo de operação é considerado como a soma de uma parte determinística e outra probabilística. Em primeiro lugar, o problema é resolvido com base em valores esperados de geração de energia elétrica das RES. Então, usando a função de distribuição cumulativa (CDF) de cada RES, o CDF da reserva necessária para compensar a variabilidade de potência das RES é desenvolvido.

Depois disso, respeito à contribuição de reserva de cada gerador térmico, a parte probabilística do custo global de produção, bem como a sua CDF são desenvolvidos. A fim de resolver o problema multiobjetivo proposto, é investigada uma nova abordagem computacional com base em enxame de partículas. Finalmente, a abordagem proposta é aplicada para resolver o problema de despacho de potência ativa do sistema de teste da IEEE de 30 barras em dois casos com e sem RESs. Os resultados das simulações mostram que a abordagem proposta permite obter as informações completas sobre a função de distribuição acumulada do custo total real da operação do sistema (BILIL *et al.*, 2014).

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

## 2.6 Conclusão

Diante do exposto, ressalta-se a importância do DEA, que traz uma abordagem significativa no contexto da pesquisa, principalmente no que se refere à preocupação aos contaminantes presentes na atmosfera.

Esse problema, permite descrever uma otimização multicritério para programação não linear, o qual minimiza o custo do combustível e níveis de emissão simultânea, embora inúmeros métodos sejam utilizados trazendo a representação dos níveis de emissões, porém ainda há muitas técnicas que são limitadas pela falta de eficiência e robustez em seus respectivos resultados nas aplicações práticas ao tratamento das soluções. Assim, existem inúmeras formas de executar o DEA frente à otimização da geração de potência das usinas termelétricas.

Nessa perspectiva, o problema clássico do DEA é desafiador pela estrutura que detém no sistema elétrico de potência, tema de muita atenção nos últimos tempos e que anuncia propostas variadas de técnicas livres de derivadas para análise da não diferenciabilidade e de ricas propriedades de características multimodais.

Dessa forma, o próximo capítulo, estabelece de forma mais detalhada a otimização multiobjetivo aos seus possíveis respectivos métodos, que fundamentam o trabalho ao problema DEA com a inserção da implementação do NSGA-II.

## CAPÍTULO III - OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO USANDO NSGA- II

### 3.1 Técnicas de Otimização Heurísticas

O crescimento do uso de procedimentos heurísticos se deve a necessidade de dispor de ferramentas que permitam obter soluções rápidas a problemas reais. É importante destacar que os métodos heurísticos por si só não garantem a otimização da solução encontrada, embora seu propósito seja encontrar uma solução próxima do ótimo em um tempo razoável. A Figura 3.1 mostra a classificação dos métodos de otimização global (ARÉVALO 2005, FLOUDAS 2013).

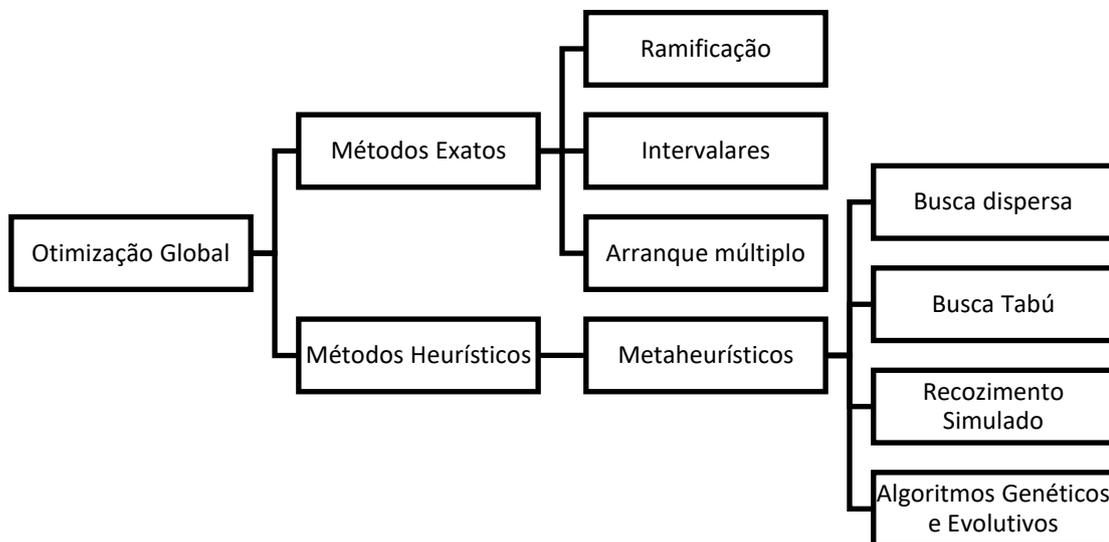


Figura 3.1: Métodos de otimização global.  
Fonte: (ARÉVALO 2005).

As técnicas de otimização heurísticas podem ser do tipo exaustivas e não exaustivas. As técnicas exaustivas, tais como os esquemas algorítmicos *Backtracking* e *Branch & Bound*, têm a vantagem de sempre encontrar a solução ótima, recorrendo no pior dos casos todo o espaço de solução que pode ser enorme. É difícil estreitar a pesquisa mediante o emprego de técnicas heurísticas, e, portanto, podem resultar em algoritmos pouco eficientes para problemas de tamanho médio ou grande.

As técnicas não exaustivas são conhecidas com o nome de meta-heurísticas, que podem ser esquemas algorítmicos baseados em ideias distintas, em muitas ocasiões tomadas do funcionamento da natureza, porém que tem enfoque comum do problema resolvendo-o mediante sucessivas melhoras de uma solução ou conjunto de soluções, com uma exploração

de espaço de soluções mais ampla e com certo fator aleatório (FERNÁNDEZ; DOWSLAND 2003, CARRETERO, CÁNOVAS et al. 2008).

Neste trabalho, serão utilizadas as técnicas meta-heurísticas, especificamente os Algoritmos Genéticos. Levando em consideração que os tipos de problemas de otimização têm um espaço de soluções muito complexo, portanto explorá-lo por completo pode não ser viável para determinadas aplicações. Neste tipo de técnica, o que se faz é trabalhar com uma solução ou conjunto de soluções para obter novas respostas que sejam mais próximas ao ótimo com o fim de evitar os ótimos locais, e de forma iterativa, alcançar uma convergência de alta qualidade. Dessa forma, é possível garantir a qualidade da solução, dado que esta cumprirá com os critérios encontrados.

Existem várias técnicas de otimização meta-heurísticas, uma vez que é um campo em que se realizam diversas pesquisas, de acordo com (GENDREAU; POTVIN 2010, SALHI 2014). Algumas das mais conhecidas são:

- a. Algoritmos Genéticos;
- b. Busca Tabu;
- c. Otimização baseada em colônia de formigas;
- d. GRASP;
- e. *Scatter Search*;
- f. Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*).

### 3.2. Os Algoritmos Genéticos

Os AGs são algoritmos adaptativos de busca heurística baseados nas ideias evolucionárias de seleção natural e genética. Como tal, representam uma exploração inteligente de uma pesquisa aleatória usada para resolver problemas de otimização. Embora randomizados, os AGs não são de forma alguma aleatórios, em vez disso, exploram informações históricas para direcionar a pesquisa para a região de melhor desempenho dentro do espaço de pesquisa. As técnicas básicas dos AGs são projetadas para simular processos em sistemas naturais necessários para a evolução, especialmente aqueles que seguem os princípios estabelecidos pela primeira vez por Charles Darwin de "sobrevivência do mais apto". Desde que na natureza, a competição entre indivíduos para recursos escassos resulta em indivíduos mais aptos dominando sobre os mais fracos (SIVARAJ; RAVICHANDRAN 2011).

É melhor do que as técnicas convencionais da Inteligência Artificial (IA) em que é mais robusto. Ao contrário dos sistemas mais antigos de IA, eles não se quebram facilmente mesmo se os inputs mudarem ligeiramente, ou na presença de ruído razoável. Além disso, ao pesquisar um grande estado-espço, espaço de estados multimodal, ou superfície n-dimensional, um algoritmo genético pode oferecer benefícios significativos sobre os tipos de buscas mais típicas de técnicas de otimização. (Programação linear, heurística, profundidade-primeiro, busca em largura, e praxis) (SASTRY, GOLDBERG et al. 2014).

Os AGs simulam a sobrevivência do mais apto entre todos os indivíduos de uma geração consecutiva para resolver um problema. Cada geração é constituída por uma população de cordas de caracteres que são análogas ao cromossomo que vemos em nosso DNA. Cada indivíduo representa um ponto em um espaço de busca e uma possível solução. Os indivíduos da população são levados a passar por um processo de evolução.

Os AGs baseiam-se numa analogia com a estrutura genética e o comportamento dos cromossomas dentro de uma população de indivíduos usando as seguintes bases (SIVARAJ e RAVICHANDRAN, 2011):

- Os indivíduos em uma população competem por recursos e companheiros.
- Os indivíduos mais bem-sucedidos em cada "competição" produzirão mais descendentes do que aqueles indivíduos que apresentam um mau desempenho.
- Os genes de indivíduos "bons" se propagam por toda a população de modo que dois bons pais às vezes produzem prole que são melhores do que qualquer dos pais.
- Assim, cada geração sucessiva se tornará mais adequada ao seu ambiente.

A forma mais simples de algoritmo genético tem três tipos de operadores: seleção, cruze e mutação (RODRÍGUEZ-PIÑERO 2003):

- Seleção e reprodução: Este operador escolhe cromossomos entre a população para efetuar a reprodução. Quanto mais capaz seja o cromossomo, mais vezes será selecionado para reproduzir-se.
- Cruze ou cruzamento: Se trata de um operador que tem a função de escolher um lugar, e mudar as sequências antes e depois daquela posição entre dois cromossomos, para criar uma nova descendência (por exemplo, as cadeias 10010011 e 11111010 podem cruzar-se após o terceiro lugar para produzir a descendência 10011010 e 11110011). Imita a recombinação biológica entre dos organismos haploides.

- **Mutação:** Este operador produz variações de modo aleatório em um cromossoma (por exemplo, a cadeia 00011100 pode trocar sua segunda posição para obter a corrente 01011100). A mutação pode ter lugar em cada posição de um bit em uma cadeia, com uma probabilidade, normalmente muito pequena (por exemplo, 0.001). Como se pode apreciar, os AGs diferem dos métodos tradicionais de busca e otimização, em quatro áreas essenciais:

- Eles trabalham com um código do conjunto de parâmetros, não com o conjunto mesmo (precisam que o conjunto dos parâmetros de definição do problema de otimização está codificado em cadeias finitas em um determinado alfabeto). Como eles trabalham no nível do código, e não com as funções e as suas variáveis de controle, como os outros métodos, são mais difíceis de "enganar".

- Procuram uma população de pontos, e não um único ponto. Mantendo uma população de pontos de amostragem bem adaptados, a probabilidade de cair em um falso pico é reduzida.

- Empregam a função objetivo, não precisam de derivadas ou outras informações complementariam, pois às vezes são muito difíceis de conseguir. Assim, eles ganham em eficiência e generalidade.

- Eles usam regras de transição estocásticas, não deterministas. Os AGs fazem uso de operadores aleatórios para orientar a busca dos melhores pontos; pode parecer estranho, mas a natureza é cheia de precedentes a este respeito.

### 3.3 O Algoritmo NSGA-II.

Os algoritmos multiobjetivos requerem para seu desenvolvimento métodos matemáticos de otimização sobre uma população de soluções, pelo que se tem encontrado nos algoritmos genéticos como proposta, frente suas características de diversidade e confiabilidade. No entanto, deve-se manter uma visão ampla para possibilitar o uso de outros procedimentos, tais como as colônias de formigas, o recozimento simulado e o enxame de partículas. O algoritmo NSGA-II, cuja primeira versão se apoia nos algoritmos genéticos, é classificado como de tipo elitista, já que incorpora um mecanismo de preservação das soluções dominantes através de várias gerações de um algoritmo genético.

O processo se inicia a partir de um conjunto de tamanho  $N$  de soluções (Pares) obtidas aleatoriamente ou randomicamente. As seguintes gerações são determinadas usando

mecanismos modificados de seleção, cruzamento e mutação definidos pelo algoritmo genético clássico.

### 3.3.1. Processo de Seleção, Cruzamento e Mutação.

Sobre a população atual (Pares) são selecionadas  $N$  pares de soluções escolhidas aleatoriamente. Cada par compete em um torneio, em que ganha a alternativa que pertença à categoria de melhor qualidade. Se as alternativas de dominância pertencem à mesma frente, então ganha a que introduz um maior grau de diversidade ao conjunto em construção. Os vencedores de cada torneio são os únicos autorizados para obter descendência; o cruzamento e a mutação se manejam da mesma forma como mostrado pelo algoritmo genético clássico.

Desta maneira, o que se espera é que a informação genética das alternativas dominantes fique presente nas gerações seguintes e atraia o resto da população para suas respectivas vizinhanças.

### 3.3.2 Operador de empilhamento

Os algoritmos multiobjetivo buscam encontrar o maior número possível de soluções que pertençam à frente de Pareto. Portanto, é necessário que a população se mantenha tão diversa como seja possível. O operador de empilhamento permite quantificar o espaço em torno de uma alternativa que não se encontra ocupado por nenhuma outra solução. Para isso se deve calcular o perímetro do cuboide formado pelas soluções vizinhas que têm a mesma categoria de dominância que a alternativa “ $i$ ”, o qual se descreve por meio da equação seguinte como:

$$d_i = \sum_{m=1}^M \left| \frac{f_m^{(I_{i+1}^m)} - f_m^{(I_{i-1}^m)}}{f_m^{max} - f_m^{min}} \right| \quad (3.1)$$

Em que:

$I^m$  é um vetor que indica a alternativa de solução vizinha a alternativa  $i$ ,

$f_m^{max}$  e  $f_m^{min}$  são os valores máximo e mínimo em todo o espaço de solução da função objetivo  $m$ , e  $M$  é o número de funções objetivo otimizadas.

### 3.3.3 Seleção por torneio segundo o operador de empilhamento.

Este procedimento substitui a seleção usada no algoritmo genético tradicional. Consistem em comparar duas soluções, as quais possuem cada uma, dois atributos:

- Um intervalo de não dominação  $r_i$ , segundo a frente de Pareto.
- Uma distância local de empilhamento  $d_i$ .

A seleção retorna à solução ganhadora  $i$  baseando-se em dois critérios fundamentais.

- Se tem melhor  $j$  hierarquia:  $r_i < r_j$
- Se tem a mesma  $j$  hierarquia, mas  $i$  tem melhor distância de empilhamento:  $d_i > d_j$

### 3.3.4. Determinação do Conjunto Descendente Final

Antes de finalizar uma geração do algoritmo executa-se um processo de pré-seleção e preservação das soluções de elite, que consiste em reunir o conjunto de soluções Pais e os descendentes obtidos por meio dos operadores de seleção, cruzamento e mutação.

Dessa forma, a população atual aumenta ao duplo dos indivíduos da população inicial. Para isso é necessário classificar o conjunto completo em suas respectivas frentes de dominância e preservar os indivíduos que pertençam às frentes de melhor qualidade, tal como apresenta-se na Figura 3.2.

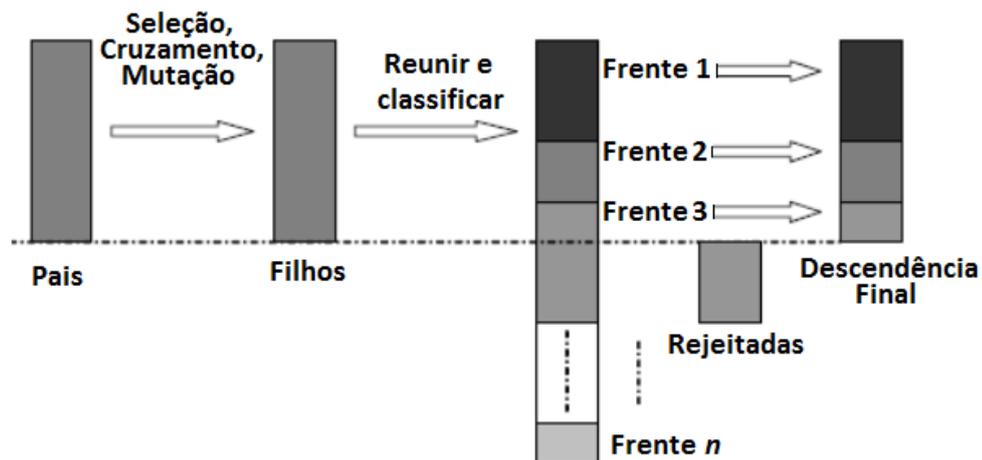


Figura 3.2: Determinação da nova população.  
Fonte: (DILLON e S. K. JAIN, 2011).

Se não é possível ingressar todas as alternativas de uma frente determinada, então são eliminados aqueles indivíduos com uma menor distância à multidão.

### 3.3.5 Pseudocódigo para o NSGA-II

Os passos a seguir usando o NSGA-II são os seguintes:

1. Gerar uma população de tamanho  $N$ ;
2. Identificar as frentes de dominância e avaliar as distâncias de empilhamento em cada frente;
3. Usando seleção, cruzamento e mutação se gera uma população descendente do mesmo tamanho de  $P$ ;
4. Reunir Pais e filhos em um conjunto de tamanho  $2N$  e classificar as frentes de dominância;
5. Determinar o conjunto descendente final selecionando as frentes de melhores características ou hierarquia. Se for excedido o limite de população  $N$ , eliminar as soluções com menor distância de empilhamento na última frente selecionado;
6. Se o critério de convergência é cumprido, fim do processo.

Caso contrário, retornar ao passo 3.

Neste trabalho, no problema de DEA serão usadas técnicas do NSGA-II com duas funções objetivo, uma delas representa o Custo de Combustível e a outra o Índice de Emissões.

## **CAPÍTULO IV - O ÍNDICE DE EMISSÕES COMO PARÂMETRO PARA AVALIAR A CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL DE USINAS TÉRMICAS**

### **4.1 Introdução**

A degradação ambiental, cada vez mais acelerada a nível mundial e os impactos adversos da geração de energia tem chamado cada vez mais a atenção de políticos e investigadores nas últimas décadas. Um dos principais contribuintes na emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera, que por sua vez são os responsáveis da mudança climática é o uso de combustíveis fósseis nas plantas geradoras de energia (BELLHOUSE e WHITTINGTON, 1996).

A produção de energia por meio de combustíveis fósseis, os processos industriais e os meios de transporte exercem grande influência sobre o meio ambiente, em virtude do desmatamento e da emissão de poluentes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ , particulados, etc.), sendo considerados as principais fontes antropogênicas da poluição.

Definem poluição como sendo a degradação do ambiente, ou seja, mudanças nas características físico-químicas ou biológicas do ar, da água ou do solo que afetam negativamente a saúde, a sobrevivência ou as atividades humanas e de outros organismos vivos (CATÁLOGO DO MOTOR JENBACHER, 2010).

O Protocolo de Kioto resultou do encontro de 160 nações, em 1997, no Japão, visando reduzir as emissões de gases que causam o efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , entre outros) e, estimular o desenvolvimento de novas tecnologias e a implantação de fontes limpas de energia. Desde então, a possibilidade de comercializar as emissões (principalmente de  $\text{CO}_2$ , resultante da queima de combustíveis fósseis, cuja utilização nos países desenvolvidos é intensiva) vem ganhando força como estratégia política.

Os poluentes do ar originam-se principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis. Os poluentes atmosféricos são classificados em dois tipos: primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente das fontes para a atmosfera, destacando-se: material particulado (fumos, poeiras, névoas); monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ); dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$ ); compostos de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ); hidrocarbonetos; clorofluorcarbonos (LIU, LIN et al. 2016, HOLLADAY; LARIVIERE 2017, JEBARAJ, VENKATESAN et al. 2017).

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 estabelecidos são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada. Sendo assim, com a degradação ambiental cada vez mais acelerada globalmente, os impactos adversos da geração de energia têm exigido mais de políticos e pesquisadores na tomada de decisões nos últimos anos (HASSLER, MCDONALD et al. 2016, HOWARD, WAITE et al. 2017).

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.

Uma forma eficaz de reduzir emissões é usar estratégias operacionais em plantas térmicas, o que poderia ser realizado com o uso da programação de modelos matemáticos, que tenham a minimização das emissões como função objetivo ou considerar limites de emissão como restrições. O despacho de carga em sistemas de energia poderia ser formulado como um problema de otimização mono-objetivo quando os limites de emissões são tomados como restrições (WANG XIN, QIN BIN et al. 2006, REBENNACK, FLACH et al. 2012, SAYAH, HAMOUDA et al. 2014, MANDAL, MANDAL et al. 2015).

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. 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 ( $\text{SO}_2$ ), poeira em suspensão, monóxido de carbono (CO), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). A razão da escolha destes parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada à sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente. Para o problema da mudança climática causada pelos gases de efeito estufa, a União Europeia (UE) introduziu o *Emission Trading Scheme* (ETS), que adota o “*cap-and trade*” que consiste na distribuição de permissões por meio dos Governos dos países signatários do Protocolo. As empresas desses países também têm um limite máximo de emissão de gases estipulado e a partir disso podem comprar e vender

permissões. Sendo assim, empresas que têm um número menor de emissão permitida, podem vender a quantia restante para outras empresas (EUROPEAN COMMISSION 2005).

Neste regime, as licenças de emissão são primeiro alocados para cada instalação industrial; as instituições participantes podem comprar licenças adicionais e/ou vender seu excesso de licenças de emissão no mercado (CLEARY, DUFFY et al. 2016, HENNEMAN, RAFAJ et al. 2016, KÖK, SHANG et al. 2016). Por outro lado, alguns países como a Finlândia introduziu a tributação ecológica (Imposto sobre o carbono), incluindo o imposto com base tanto na quantidade do carbono contido no combustível ou da quantidade da emissão de CO<sub>2</sub> (A. VOURECH; M. JIMENEZ 2000).

O valor da taxa de imposto sobre o carbono é decidido principalmente pelas autoridades com o duplo objetivo de reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> e ao mesmo tempo promover o desenvolvimento técnico. Além disso, podem ser aplicadas receitas fiscais para alcançar medidas ambientais mais avançadas (AVERSANO; TEMPERINI 2006, ABDILAH; MUSTAFA 2017).

Com a introdução de mercado de emissões e tributação ecológica para o setor de energia elétrica, o desenvolvimento de métodos de tomada de decisão em matéria de comércio de emissões ou restrições de emissões está se tornando cada vez mais importantes e muitos estudos podem decidir a programação dos geradores para operação (SHARMA; VERMA 2013, CURTIS, LYNCH et al. 2016, DELARUE; VAN DEN BERGH 2016, LAU, YANG et al. 2016, GRANDE-ACOSTA; ISLAS-SAMPERIO 2017).

Embora existam muitos estudos sobre restrições de CO<sub>2</sub>, eles se concentram principalmente no problema de decidir o nível de saída de cada gerador durante o despacho econômico (TALAQ, EL-HAWARY et al. 1994, LI, LI et al. 2014, PAVIĆ, CAPUDER et al. 2016, ENGLISH, NIET et al. 2017, MA, WANG et al. 2017).

No entanto, para obter uma solução ótima, é importante considerar não apenas o nível de despacho de cada unidade de geração, mas também o cronograma (on/off), desde que a potência de saída mínima, as restrições, e o *start-up* influenciam na solução final do custo/emissão. Por isso, é fundamental considerar o problema de compromisso de cada unidade (UC) nos métodos de tomada de decisão. Além disso, a maioria dos estudos de UC, incluindo restrições de CO<sub>2</sub> está se concentrando sobre a programação da solução que maximiza o lucro por unidade (H.Y. YAMIN, Q. EI-DWAIRI et al. 2007, I. KOCKAR, A. CONEJO et al. 2009), mas não nas soluções ótimas de Pareto na redução de CO<sub>2</sub> (BASU 2011, DARYANI; ZARE 2015, CURTIS, LYNCH et al. 2016).

De acordo com (A. VOURC'H; M. JIMENEZ 2000), as licenças de emissão de CO<sub>2</sub> são dadas geralmente por um período de um ano, enquanto o marco de tempo por programação é agendado de UC de 24 horas por vários dias, e as restrições possuem efeito apenas quando o valor das emissões de CO<sub>2</sub> tornam-se elevados. Conforme (CATALAO, S. P. S. MARIANO et al. 2007) acreditam que o lucro máximo é importante, porém o *trade-off* de redução de custos e CO<sub>2</sub> não devem ser levados em consideração.

Por isso, é importante saber o menor nível possível de emissão de CO<sub>2</sub> e o custo associado com base nas instalações de geração existentes. É importante focar o problema das emissões associado ao problema dos custos como um problema multiobjetivo. As soluções ótimas do despacho econômico e a função de utilidade marginal de emissão de CO<sub>2</sub> podem ser obtidas quando a combinação de geradores e do preço do combustível é determinada, e em particular o custo marginal de CO<sub>2</sub> será de grande utilidade para a tomada de decisões.

A captura e armazenamento de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) tem o potencial de reduzir significativamente a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada na atmosfera. As tecnologias necessárias para separar o CO<sub>2</sub> de outros gases e para sequestrar CO<sub>2</sub> são conhecidas. Outros desenvolvimentos são necessários para programar a captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub> em grande escala (CARVAJAL, PEREZ et al. 2015).

Estes custos de degradação constituem custos externos que são aplicados a terceiros, mas não são tidos em conta nem na análise custo/benefício dos empreendimentos nem sobre os preços da energia. Apesar das dificuldades associadas à valorização monetária destes efeitos externos e a incerteza relativa a eles, (MUSLU 2004, KIM 2007, RHODES, KING et al. 2017), pode-se afirmar que eles têm um grande significado no custo total de energia e são um enorme fardo para a sociedade em geral.

#### **4.2 Resolução do CONAMA**

O efeito estufa é um fenômeno natural do Planeta Terra com a propriedade de absorver e reemitir parte da irradiação infravermelha emitida da Terra para o espaço, mantendo a temperatura média na superfície da Terra em torno de 14° C, sendo assim essencial para a existência de vida tal como conhecida. Caso ele não existisse, a temperatura média seria de 19° C. Os principais agentes do Efeito Estufa são o vapor d'água e o dióxido de carbono. Estudos científicos apontam que as crescentes emissões antrópicas de GEE, provenientes, principalmente, da queima de combustíveis fósseis em usinas termelétricas, indústria, veículos e sistemas domésticos, estão promovendo o aumento da concentração desses gases na

atmosfera e, conseqüentemente, ampliando a capacidade de absorção de energia, alterando o equilíbrio energético natural do Planeta (ALVES; UTURBEY 2010).

A Resolução CONAMA n° 382, de 26/12/2006 (CONAMA 2006), estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, ou seja, a quantidade máxima de poluentes permissível de ser lançada para a atmosfera. Fonte fixa de emissão é definida como qualquer instalação, equipamento ou processo, situado em local fixo, que libere ou emita matéria para a atmosfera, por emissão pontual ou dispersa. As emissões de óxido de nitrogênio e de CO<sub>2</sub> são significativas em usinas térmicas a gás natural e de cogeração com biomassa a partir de resíduos de cana de açúcar. Nestes casos, (CONAMA 2006) impõe restrições que devem ser atingidas através da utilização de equipamento de controle.

São poluentes padronizados no Brasil:

- Partículas totais em suspensão; - fumaça; - dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>); - partículas inaláveis;

- Monóxido de carbono (CO); - ozônio (O<sub>3</sub>); - dióxido de nitrogênio.

Os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA N° 3 de 28/06/90<sup>1</sup> são apresentados na Tabela 4.1 (CONAMA 1990, ALVES; UTURBEY 2010).

Tabela 4.1: Padrões de qualidade do ar no Brasil.

<b>Poluente</b>	<b>Tempo de amostragem</b>	<b>Padrão primário</b> <i>μg/m<sup>3</sup></i> <sup>(4)</sup>	<b>Padrão Secundário</b> <i>μg/m<sup>3</sup></i> <sup>(4)</sup>	<b>Método de medição</b>
Partículas Totais em Suspensão	24 horas <sup>(1)</sup>	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA <sup>(2)</sup>	80	60	
Dióxido de Enxofre	24 horas <sup>(1)</sup>	365	100	Pararosanilina
	MAA <sup>(3)</sup>	80	40	
Monóxido de Carbono	1 hora <sup>(1)</sup>	40.000 (35pmm)	40.000(35 pmm)	Infravermelho não dispersivo
	8 horas <sup>(1)</sup>	10.000 (9 pmm)	10.000 (9 pmm)	
Ozônio	1 hora <sup>(1)</sup>	160	160	Quimiluminescência
Fumaça	24 horas <sup>(1)</sup>	150	100	Refletância
	MAA <sup>(3)</sup>	60	40	
Partículas Inaláveis	24 horas <sup>(1)</sup>	150	150	Separação Inercial Filtração
	MAA <sup>(3)</sup>	50	50	
Dióxido de Nitrogênio	1 hora <sup>(1)</sup>	320	190	Quimiluminescência
	MAA <sup>(3)</sup>	100	100	

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

(2) Média geométrica anual (MGA).

(3) Média aritmética anual (MAA).

(4) A condição de referência para as concentrações é de 25<sup>o</sup>C e pressão de 760mmHg (1.013,2 bilibares).

Fonte: (CONAMA 2006).

<sup>1</sup>[http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/conama\\_03\\_90\\_padroes\\_de\\_qualidade\\_do\\_ar.pdf](http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/conama_03_90_padroes_de_qualidade_do_ar.pdf)

### 4.3 Índice de emissões dos motores a gás

Para avaliar a poluição do meio ambiente provocada pelos motores a gás se estabeleceu por este trabalho o índice de emissão pela autora, considerando o valor dos dados da tabela 4.2. Para desenvolver a expressão matemática do índice de emissão foram considerados os limites estabelecidos de qualidade do ar pela CONAMA e se determinou o valor ponderado de cada poluente dentro da qualidade do ar (CONAMA 1990), expresso na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados para determinar o índice de emissão dos motores a gás.

Poluente	Padrão primário da CONAMA $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Peso específico Permissível	Valor de influência
Partículas totais em suspensão	240	0,00592885	0,99407115
Monóxido de Carbono	40000	0,98814229	0,01185771
Dióxido de Nitrogênio	320	0,00790514	0,99209486
Hidrocarbonetos <sup>2</sup>	160	0,00395257	0,99604743
Total	40480	1	3

Fonte: Autora, (2016).

Considerou-se o valor de influência das emissões de  $\text{CO}_2$  como 1. A equação para calcular o índice de emissões dos motores a gás é expressa por (4.1):

$$I_{emg} = \text{CO}_2 + 0,99407115MP + 0,01185771CO + 0,99209486\text{NO}_2 + 0,99604743C_xH_y \quad (4.1)$$

Como os motores a gás também emitem monóxido de nitrogênio, se decidiu incluí-los na expressão com o mesmo valor de influência que o  $\text{NO}_2$ , segue a fórmula em (4.2):

$$I_{emg} = \text{CO}_2 + 0,99407115MP + 0,01185771CO + 0,99209486(\text{NO}_2 + \text{NO}) + 0,99604743 C_xH_y \quad (4.2)$$

A fim de calcular a taxa de emissão ou índice de emissões, todos os valores de emissões devem estar no mesmo sistema de unidades, sendo necessário realizar conversões das mesmas de acordo com as empresas que fazem o controle dessas emissões. A tabela 4.3 apresenta os valores de emissão conforme a Usina Térmica e os fatores de conversão.

<sup>2</sup>[http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos/poluicao\\_do\\_ar.pdf](http://www.consultoriaambiental.com.br/artigos/poluicao_do_ar.pdf). Conforme a norma da EPA – EUA.

Tabela 4.3: Fatores de conversão.

Parâmetro	Unidades iniciais	Multiplicar por	Unidades finais
Material Particulado (MP)	mg/m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	mg /m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Monóxido de Nitrogênio (NO)	mg /m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	%	18000	mg /m <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	1,25	mg /m <sup>3</sup>
Hidrocarbonetos (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> )	%	17960	mg /m <sup>3</sup>

Fonte: Autora, (2016).

Para realizar as conversões foram considerados os pesos moleculares dos componentes, conforme aos valores e procedimentos seguintes (ver tabela 4.4):

Tabela 4.4: Pesos moleculares.

Sustância	Peso molar
C	12g/mol
O <sub>2</sub>	32 g/mol
O	16 g/mol
CO <sub>2</sub>	44 g/mol
CO	28g/mol
N	14g/mol
N <sub>2</sub>	28g/mol
H	1g/mol
Metano CH <sub>4</sub>	16g/mol
Hexano C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86g/mol

Fonte: (GREEN 2007, ALBRIGHT 2008).

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{ppm \times PM}{24,45} \quad (4.3)$$

Assim, a expressão para calcular o índice de emissão dos motores a gás é dada por:

$$I_{emg} = 18000 CO_2 + 0,99407115MP + 0,01185771 * 1,25CO + 0,99209486(NO_2 + NO) + 0,99604743 * 17960 C_xH_y \quad \text{em mg/m}^3.$$

(4.4)

Na expressão (4.4) o CO<sub>2</sub> e os C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> ficam expressos em %, o CO em ppm e os demais dados em mg /m<sup>3</sup>.

Na tabela 4.5 são apresentadas as emissões típicas de um motor a gás da Usina em Manaus.

Tabela 4.5: Emissões Típicas dos motores a gás.

<b>Emissões típicas de um Motor a gás (UGGN 12)</b>	<b>U originais</b>	<b>a 3%mg/m<sup>3</sup></b>
Material Particulado mg/m <sup>3</sup>	76,57	76,57
Dióxido de Nitrogênio mg/m <sup>3</sup>	315,07	315,07
Oxigênio % a mg/m <sup>3</sup>	12,3	80490,7975
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) % a mg/m <sup>3</sup>	4,8	86400
Monóxido de carbono CO ppm a mg/m <sup>3</sup>	286	327,525562
Monóxido de Nitrogênio mg/m <sup>3</sup>	105	105
Hidrocarbonetos (CxHy) de ppm a mg/m <sup>3</sup>	861,64	1688,8144
Óxidos de Nitrogênio (NOx como NO <sub>2</sub> ) ppm a (mg/m <sup>3</sup> )	213	400,44

Fonte: (MUSTAFA-MORAES, HOLANDA-BEZERRA et al. 2016).

#### 4.4 Índice de emissões dos motores a HFO

Neste caso, o procedimento desenvolvido foi o mesmo que para os motores a gás, porém levando em consideração as emissões deste tipo de motores (ver tabela 4.6).

Tabela 4.6: Dados para determinar o índice de emissão dos motores a HFO.

<b>Poluente</b>	<b>Padrão primário da CONAMA µg/m<sup>3</sup></b>	<b>Peso específico permissível</b>	<b>Valor de influência</b>
Partículas totais em suspensão	240	0,0059	0,9941
Monóxido de Carbono	40000	0,9735	0,0265
Dióxido de Nitrogênio	320	0,0078	0,9922
Dióxido de Enxofre	365	0,0089	0,9911
Hidrocarbonetos	160	0,0039	0,9961
<b>TOTAL</b>	<b>41085</b>	<b>1</b>	<b>4</b>

Fonte: (MUSTAFA-MORAES, HOLANDA-BEZERRA et al. 2016)

A tabela 4.7 apresenta os valores de conversão:

Tabela 4.7: Fatores de conversão no caso dos motores a HFO.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidades iniciais</b>	<b>Multiplicar por</b>	<b>Unidades finais</b>
Material Particulado (MP)	mg/m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	mg /m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Monóxido de Nitrogênio (NO)	mg /m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	%	18000	mg /m <sup>3</sup>
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	1,25	mg /m <sup>3</sup>
Dióxido de Enxofre	mg/m <sup>3</sup>	1	mg /m <sup>3</sup>
Hidrocarbonetos (CxHy)	%	17960	mg /m <sup>3</sup>

Fonte: (MUSTAFA-MORAES, HOLANDA-BEZERRA et al. 2016).

$$I_{emHFO} = 18000 \times CO_2 + 0,9941MP + 1,25 \times 0,0265CO + 0,992(NO_2 + NO) + 0,991SO_2 + 0,9961 * 17960 C_x H_y$$

em g/m<sup>3</sup> (4.5)

Na tabela 4.8 são apresentadas as emissões típicas de um motor MAN a HFO da Usina em Manaus.

Tabela 4.8: Emissões típicas de um motor MAN a HFO.

Emissões Típicas de um Motor a HFO (MAN 1)	U originais	a 7%	a 3%
		mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
Material Particulado mg/m <sup>3</sup>	156,65	156,65	201,407143
Dióxido de Enxofre mg/m <sup>3</sup>	287,42	287,42	369,54
Oxigênio % a mg/m <sup>3</sup>	13,7	179304,703	230534,619
Dióxido de Nitrogênio mg/m <sup>3</sup>	315,07	315,07	405,09
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) % a mg/m <sup>3</sup>	5,5	98977,5051	127256,792
Monóxido de carbono CO ppm a mg/m <sup>3</sup>	66,66	76,3386503	98,1496933
Monóxido de Nitrogênio mg/m <sup>3</sup>	1167	1167	1500,42857
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> ) (mg/ m <sup>3</sup> )	1843	1843	2369,57143
Hidrocarbonetos Totais (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> ) de % a (mg/ m <sup>3</sup> )	0,03	588	756

Fonte: (MUSTAFA-MORAES, HOLANDA-BEZERRA et al. 2016)

#### 4.5 Contaminação provocada pela usina

A planta térmica estudada encontra-se na cidade de Manaus e tem uma capacidade de geração de 173 MW. Possui 23 motores a gás Jenbacher de 3,5 MW e 5 motores MAN a HFO de 18,5 MW, entretanto para uso da otimização foram utilizados 10 motores.

Para analisar a contaminação provocada pela usina foram estudados os dados das emissões gasosas dos anos 2011 e 2012. Além disso, para poder comparar as contaminações dos motores a gás com as contaminações dos motores MAN foram convertidos os dados dos motores MAN ao mesmo nível de oxigênio que os dados dos motores a gás.

Para fazer a conversão dos dados a diferentes % de oxigênio foi utilizada a seguinte expressão:

$$C_c = C_{GÁS} \times \frac{(21 - O_{REF})}{(21 - O_{MED})} \quad (4.6)$$

$C_c$  – Concentração corrigida expressada ao % de oxigênio especificado.

$C_{GÁS}$  – Concentração do gás corrigida (com os valores obtidos nas verificações).

$O_{REF}$  – Oxigênio de referência, ou seja, ao que tem que referir as medidas.

$O_{MED}$  – Oxigênio médio durante as medições.

Foi necessário estabelecer o mesmo sistema de unidades para alguns dos valores como são apresentados na tabela 4.9.

Tabela 4.9: Emissões nos diferentes sistemas de unidades

GÁS	mg/m <sup>3</sup> = ppm
CO	1,25
NO	1,339
NO <sub>2</sub>	2,054
NO <sub>x</sub> (Como NO <sub>2</sub> )	2,054
SO <sub>2</sub>	2,857

Fonte: Autora, (2016).

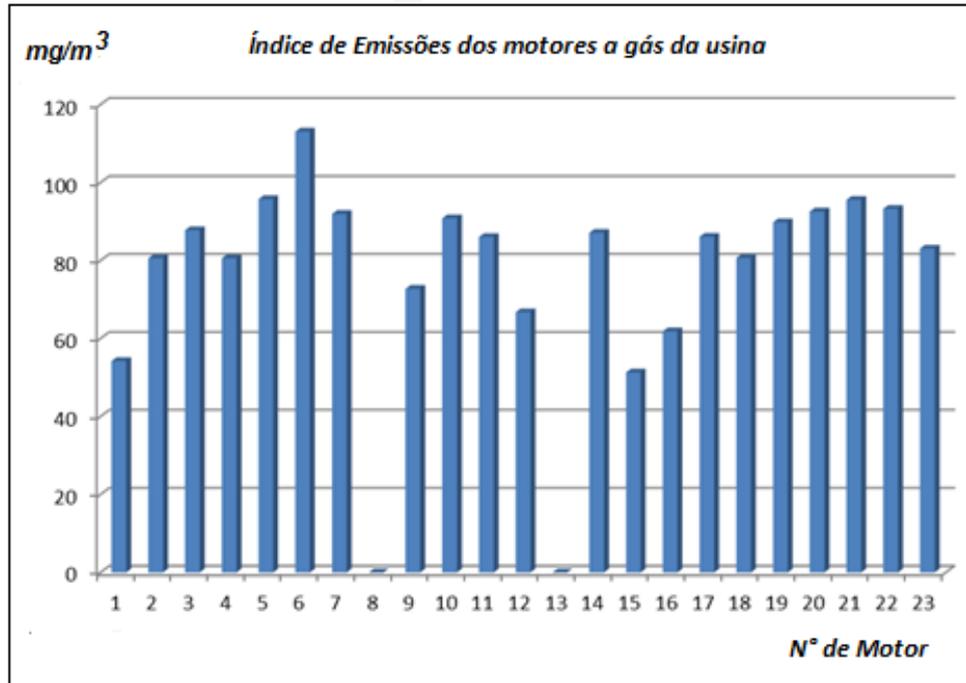


Figura 4.1: mostra o índice de emissões dos motores a gás da usina.

Fonte: Autora, (2016).

Da figura pode-se observar que o índice de emissões dos motores a gás da usina é bem diferente. Existe motores que polui muito o meio ambiente, motivo pelo qual o estado técnico dos motores é de suma importância, como o motor 6 que tem um índice de emissões superior aos 100 mg/m<sup>3</sup> em virtude da emissão de material particulado, o que é inadmissível, tem outros motores como os motores 1 e 15, cujo índice de emissões é menos da metade do índice de emissões do motor 6. Se o gestor da usina levar em consideração a contaminação ambiental, nunca ligaria o motor 6, somente em caso de extrema necessidade.

Para obter o índice de emissões dos motores a HFO da usina foram realizadas da mesma forma para os motores a gás, isto é, foram realizadas medições na chaminé dos motores dos valores dos diferentes poluentes e processados estatisticamente os resultados. Com os valores médios foi calculado o índice de emissões para cada motor a HFO da usina.

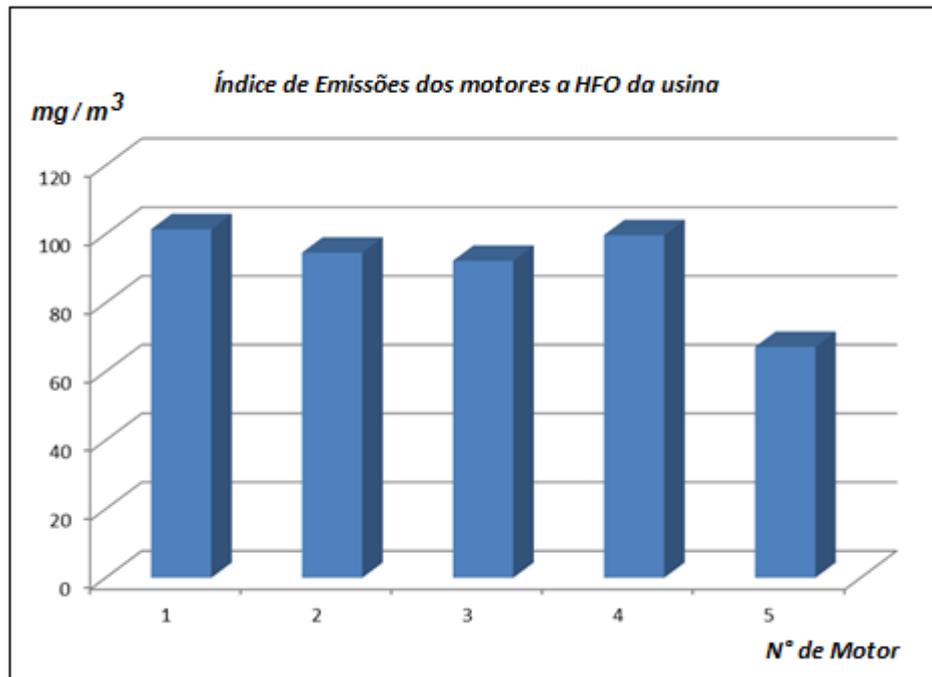


Figura 4.2: mostra o índice de emissões dos motores a HFO da usina.  
Fonte: Autora, (2016).

Da figura pode-se observar que o índice de emissões dos motores a HFO da usina possui valores muito próximos entre si, são praticamente análogas, isto é, não é tão diferente como no caso dos motores a gás. Neste caso, a contaminação destes motores é menor que a dos motores a gás, a explicação para esta contradição é que o estado técnico dos motores a gás é inferior ao estado técnico dos motores a HFO.

#### 4.6 Índice Específico de Emissões

Para avaliar melhor os índices das emissões, foram divididos pela potência gerada pelos motores, dessa forma se obtém o índice específico das emissões. Na tabela 4.10 apresenta-se uma comparação entre o índice específico de emissões dos motores a gás e os motores a HFO e a figura 4.4 mostra uma comparação das emissões conforme a potência fornecida para os motores a gás e para os motores MAN.

Tabela 4.10: Comparação das emissões entre os motores a gás e os motores MAN com respeito à Potência Fornecida.

Índice específico de emissões em $g/m^3-kW$	HFO	Gás
Material Particulado	10,6564	22,32
Dióxido de Enxofre	19,5523	0
Oxigênio	121,975	234,66

Dióxido de Nitrogênio	21,4333	91,85
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	673,16	251,89
Monóxido de carbono (CO)	6,41	11,8
Monóxido de Nitrogênio (NO)	79,3877	30,61
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> como NO <sub>2</sub> )	125,374	116,74
Hidrocarbonetos Totais (C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> )	40	49,36

Fonte: Autora, (2016).

O gráfico da figura 4.3 mostra o índice específico de emissões para cada tipo de poluente.

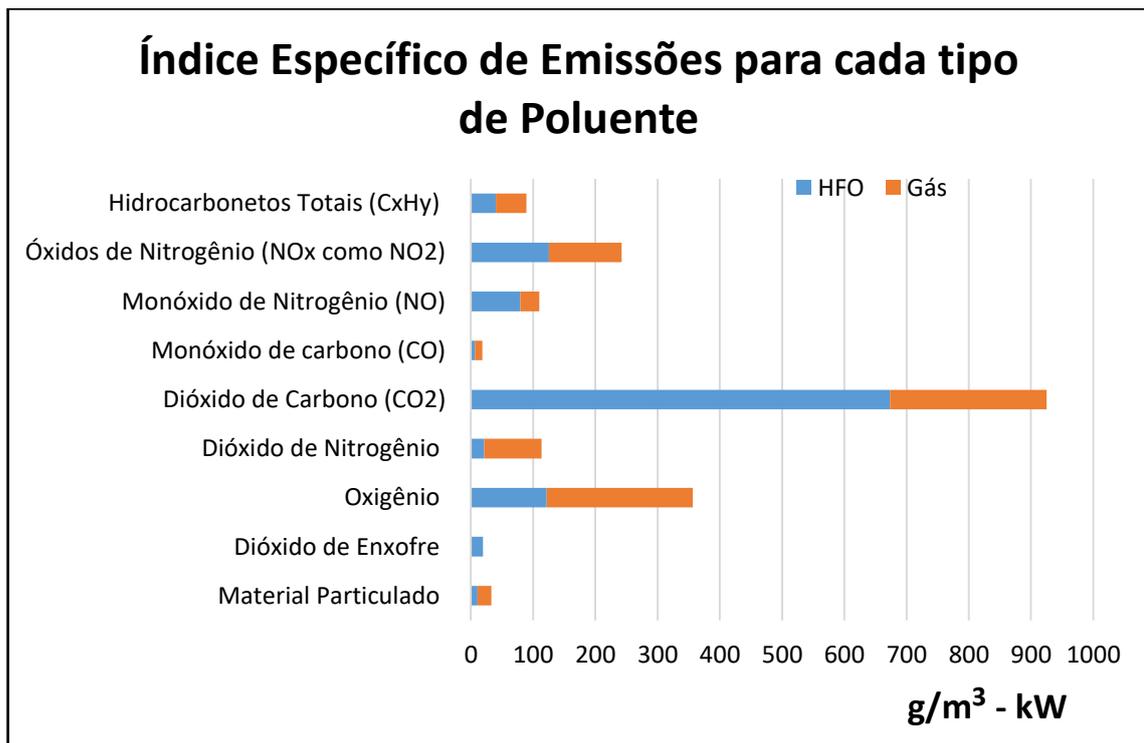


Figura 4.3: O gráfico mostra o índice específico de emissões para cada tipo de poluente. Autora, (2016).

Do gráfico da figura 4.3 pode-se observar que, neste caso, os motores a HFO contaminam muito mais o meio ambiente que os motores a gás, sobretudo pelas suas emissões de Dióxido de Carbono, estes resultados estão em concordância com o estabelecido pela literatura, mas o resto das emissões deveria comportar-se analogamente, porém os motores a gás emitem mais NO<sub>2</sub> que os motores a HFO, porém este fato tem a ver com duas situações, a primeira é o dispositivo LENOX que tem esses motores, que regulam eles para máxima eficiência e esta é obtida quando as emissões de NO<sub>2</sub> são máximas. O outro aspecto que influi, é o estado técnico dos motores a gás mencionado anteriormente.

#### 4.7 Valores Permissíveis do Índice de Emissões.

Na literatura consultada do DEA aparecem apenas valores permissíveis ou restrições para as emissões das usinas térmicas, o que reforça a necessidade das emissões se utilizar de um parâmetro que restrinja o funcionamento de uma usina térmica. Na maioria dos casos, os autores calculam a quantidade de emissões e às vezes convertem esses valores em dinheiro. (HONG; SLATICK 1994) desenvolveram fatores de emissões para o caso do uso do carvão, mas não limitaram estas emissões. (REBENNACK, FLACH et al. 2012) desenvolvem um complexo procedimento matemático para determinar as emissões permissíveis de CO<sub>2</sub>, mas este procedimento além de ser muito complexo, só contempla as emissões de CO<sub>2</sub>. De acordo com (HASSLER, MCDONALD et al. 2016) fizeram um inventário das emissões de NO<sub>x</sub> e CO através de vários anos de observação e concluíram que as mesmas devem ser restringidas.

O Índice de Emissões desenvolvido nesta tese apresenta grande vantagem, pois traz consigo as restrições, o qual foi desenvolvido a partir do dano que as emissões provocam. Contudo, se desejasse uma maior precisão, pode-se estabelecer um índice de emissões máximo que seria a soma de todos os valores permissíveis pela (CONAMA 2006), adicionando valores permissíveis das emissões de CO<sub>2</sub>, as quais não são fornecidas por este padrão.

Segundo essas considerações o Índice de Emissões Máximo Permissível (IEMP) seria:  
 $IEMP = 58,48 \text{ mg/m}^3$ .

Pode-se observar das análises realizadas neste capítulo, que o índice de emissões dos diferentes motores sempre supera esse valor, o que demonstra algo já conhecido que as usinas térmicas prejudicam grandemente o meio ambiente.

#### 4.8 Obtenção dos dados primários.

Para obter o índice de emissões dos motores a gás da usina foram realizadas medições na chaminé dos motores dos valores dos diferentes poluentes e processados estatisticamente os resultados. Com os valores médios foi calculado o índice de emissões para cada motor a gás da usina.

A fim de obter os dados primários na expectativa de poder calcular os índices de emissões, foi desenvolvido o seguinte procedimento:

- Foram colocados todos os motores da usina trabalhando a diferentes níveis de potência com relação à potência máxima (20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%).

- Para cada um dos níveis de Potência foram medidas as emissões dos diferentes poluentes, tanto em volume como em tipo de poluentes em  $\text{mg}/\text{m}^3$ .
- Para cada um dos níveis de potência de cada motor foi calculado o índice de emissões conforme a equação (4.4) ou (4.5), dependendo se é um motor a gás ou a HFO.
- Com o valor do índice de emissões de cada motor foi obtida a curva de potência versus índice de emissões. Nos gráficos deste capítulo foram colocados os índices de emissões à potência máxima.
- Com a curva do índice de emissões de cada motor e usando um software de regressão foram obtidas as equações do índice de emissões de todos os motores da usina. Foram calculados também os coeficientes “d”, “e” e “f” que serão usados na função índice de emissões a ser otimizada no capítulo 5.

#### 4.9 Preço das Emissões de Carbono

Os créditos de carbono são um instrumento financeiro previsto no Protocolo de Kioto para tentar diminuir as emissões que provocam o efeito estufa. Cada crédito é equivalente a uma tonelada de dióxido de carbono que foi deixado de emitir para a atmosfera. Eles só podem ser gerados através dos mecanismos estabelecidos no Protocolo de Kioto. Conforme o mecanismo existe diferentes tipos de créditos (KÖK, SHANG et al. 2016, WANG, WEI et al. 2016):

Em outras palavras, esses créditos são usados para tornar mais fácil o cálculo da quantidade de gases que são lançados para o ar e *compensar as suas emissões*. É parte de um plano internacional, provavelmente o maior que foi criado na história da humanidade, em um esforço para reduzir o aquecimento global e seus efeitos. Trata-se de nivelar a quantidade total de emissões que pode ser liberada por uma empresa ou negócio. Se houver um excesso na quantidade de gases que são emitidos, existe um valor monetário atribuído a esse excesso e podem ser negociados, principalmente para projetos que compensem a poluição, ou seja, que renovem o dióxido que tem sido emitido para a atmosfera, tais como projetos de reflorestamento (geralmente em países pobres ou em desenvolvimento).

É bem notório que alguns entendem que ocorre a transição de dinheiro para lhes permitir continuar poluindo. Além disso, eles são créditos que são comprados e vendidos nos mercados internacionais. Então, isso pode ser objeto de especulação e não tem que ser usado para cuidar do meio ambiente.

Por convenção, 1 tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) corresponde a um crédito de carbono. Este crédito pode ser negociado no mercado internacional. A redução da emissão de outros gases, igualmente geradores do efeito estufa, também pode ser convertida em créditos de carbono, utilizando-se o conceito de Carbono Equivalente (Equivalência em dióxido de carbono) (TOACHE, AMADO et al. 2016).

Uma tonelada de  $\text{CO}_2$  equivalente corresponde a um crédito de carbono. O  $\text{CO}_2$  equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas do GEE pelo seu potencial de aquecimento global. O potencial de aquecimento global do  $\text{CO}_2$  foi estipulado como 1. O potencial de aquecimento global do gás metano é 21 vezes maior do que o potencial do  $\text{CO}_2$ , portanto o  $\text{CO}_2$  equivalente do metano é igual a 21. Portanto, uma tonelada de metano reduzida corresponde a 21 créditos de carbono (VICTOR, HOUSE et al. 2005, SHARMA; VERMA 2013, CHATURVEDI 2014).

Potencial de aquecimento global dos GEE (LOBOS, VALLEJOS et al. 2005, AVERSANO; TEMPERINI 2006):

- $\text{CO}_2$  - Dióxido de Carbono = 1
- $\text{CH}_4$  - Metano = 21
- $\text{N}_2\text{O}$  - Óxido nitroso = 310
- HFCs - Hidrofluorcarbonetos = 140 ~ 11700
- PFCs - Perfluorcarbonetos = 6500 ~ 9200
- $\text{SF}_6$  - Hexafluoreto de enxofre = 23900

Desde 2008, o preço dos créditos de carbono negociados para vender dos países desenvolvidos na América (Certificado de Redução de Emissões de  $\text{CO}_2$ , CER, por sua sigla em Inglês) caiu 98%, a partir de 23 euros por tonelada para apenas 35 centavos de euros por tonelada. O valor dos títulos negociados no mercado doméstico da Europa - European Union Allowance (EUA), por sua vez, caíram de 30 euros para 4 (WANG, WEI et al. 2016). Basicamente, um conceito de oferta e demanda: há atualmente um excesso de créditos de carbono, esse é um problema. De fato, os números mais recentes estimam que o mercado esteja saturado em cerca de 1.700 milhões de toneladas de créditos de carbono.

Segundo (AVERSANO; TEMPERINI 2006), o custo da tonelada das emissões de  $\text{CO}_2$  tem variado entre 9 e 24 euros. Esses autores como foi citado anteriormente também fazem uma equivalência entre as toneladas de outros poluentes e as toneladas de  $\text{CO}_2$ . Levando em

consideração os critérios anteriores, é possível calcular o custo das emissões usando o índice de Emissões através da seguinte aproximação:

$$Custo_{emissões} = 24 \times I_{em} \quad \text{em euros} \quad (4.7)$$

#### 4.10 Conclusões

Neste capítulo, foram analisadas determinadas técnicas a fim de reduzir as emissões devido à geração de energia elétrica. Porém, de todas as técnicas, o que exige menos investimento é a realização do despacho econômico com emissões mínimas.

Um novo método foi desenvolvido para avaliar a poluição ambiental causada por uma usina geradora de energia elétrica. Este método, ao contrário da literatura, não atribui um valor de custo para as emissões, mas introduz um índice global que leva em consideração não só o custo, mas a importância da influência dos contaminantes mais nocivos à saúde humana e ao bem-estar das pessoas, os quais são principais poluentes para o meio ambiente. A fim de fazer comparações entre diferentes motores e combustíveis foi desenvolvido o conceito de *Índice Específico de Emissões* que é apenas a taxa de emissão dividida pela potência gerada pelo motor. O procedimento matemático desenvolvido foi aplicado ao estudo de caso de uma usina na cidade de Manaus, no estado do Amazonas. Os resultados foram altamente satisfatórios e validam todo processo desenvolvido.

## CAPÍTULO V - MODELO MATEMÁTICO PARA A OTIMIZAÇÃO DO DEA CONSIDERANDO O ÍNDICE DE EMISSÕES

### 5.1 Introdução

A otimização do DEA é uma das tarefas mais importantes em usinas geradoras de energia com motores de combustão interna. O Despacho Econômico (DE) de energia com um único objetivo custo de combustível, o monobjetivo considera apenas a questão de geração, tem dado lugar aos despachos multiobjetivo devido as questões ambientais que surgem de emissões das plantas térmicas. O objetivo deste capítulo é analisar uma nova solução da otimização do DEA pela técnica do *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II), porém utilizando o novo conceito de Índice de Emissões em lugar de usar as emissões como custos ou como quantidade dos gases poluentes.

O problema do DEA é minimizar o custo total de geração e o nível de emissão simultaneamente e ao mesmo tempo satisfazer a demanda de geração da usina.

A geração de energia térmica é uma das fontes mais significativas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e óxidos de azoto ( $\text{NO}_x$ ) que criam a poluição atmosférica (LIU, LIN *et al.*, 2016; SETHI, 2015). O problema clássico do DE de geração é fornecer a quantidade necessária de potência ao menor custo, para atender a demanda e as restrições operacionais.

Este é um problema muito complexo para resolver devido a sua alta dimensionalidade, uma função objetivo não linear e um grande número de restrições. Várias técnicas como Programação Inteira (GARVER 1963), Programação Dinâmica (SNYDER, POWEL *et al.* 1987), o método de Newton por (RAHUL DOGRA 2014), e as funções de Lagrange por (BARD 1988) têm sido usadas para resolver o problema de DEA de geração.

Para resolver o problema DEA, são utilizados também outros métodos de otimização, tais como o método do Recozimento Simulado (Simulated Annealing Goal-Attainment) apontado por (BASU 2005); enxame de Partículas usado por (A. IMMANUEL SELVA KUMAR 2003), a Teoria dos Jogos usada por (NWULU; XIA 2015), e a abordagem com o uso da Técnica para Ordem de Preferência por Semelhança da Solução Ideal (TOPSIS ) (GHASEMI, GHEYDI *et al.* 2016).

Vários métodos também tem sido desenvolvidos baseados em abordagens matemáticas para oferecer uma solução mais rápida para o DE (C. PALANICHAMY 2002). Algoritmos evolutivos também foram aplicadas ao problema do DE em questão (NADERI, AZIZIVAHED et al. 2017). Têm sido desenvolvidas pesquisas também para minimizar os custos, mas incluindo restrições de emissão para resolver o despacho econômico de geração e a seleção de geradores (MUSLU 2004). Recentemente, tem sido empregado com sucesso a combinação dos algoritmos de busca gravitacional modificados combinados com o NSGAI por (CHEN, ZHOU et al. 2017) e o NSGA III por (YUAN, TIAN et al. 2015), que são convenientes para resolver os problemas de otimização do DEA de geração.

Portanto, todos os modelos anteriores para o DEA levam somente em consideração as emissões como quantidade de emissões, este trabalho apresenta o grau de influência de cada tipo de emissão sobre o meio ambiente. Nas próximas sessões se desenvolve um modelo matemático inédito que classifica precisamente as emissões conforme seu impacto ao meio ambiente e esta será uma das funções a ser otimizada dentro do modelo.

## 5.2 Modelo Matemático para o Despacho Econômico Ambiental

Na formulação matemática do problema multiobjetivo do despacho econômico ambiental, dois objetivos importantes em um sistema térmico de geração de energia elétrica tem que ser considerados, os quais são: economia e impactos ambientais (BASU 2014, NWULU; XIA 2015, QU, LIANG et al. 2016).

### 5.2.1 Minimização dos custos

O custo de combustível de uma unidade térmica é considerado como um critério essencial para a viabilidade econômica. A curva de custo de combustível é assumida como sendo aproximada por uma função quadrática da potência de saída do gerador  $P_i$  (BASU 2014, NWULU; XIA 2015, RAJAN; MALAKAR 2016, QU, ZHU et al. 2017), a função a utilizar para minimizar o custo é:

$$F_1(P_i) = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad \$/h \quad (5.1)$$

onde  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  são os coeficientes de custos de combustível da  $i$ -ésima unidade geradora,  $n$  é o número de geradores e  $P_i$  a potência ativa de cada gerador.

No entanto, apesar do grande benefício financeiro da estratégia clássica de despacho descrita pela equação (5.1), cuja curva custo de combustível versus potência gerada é apresentada na Figura 5.1, ela tende a produzir alta quantidade de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>.

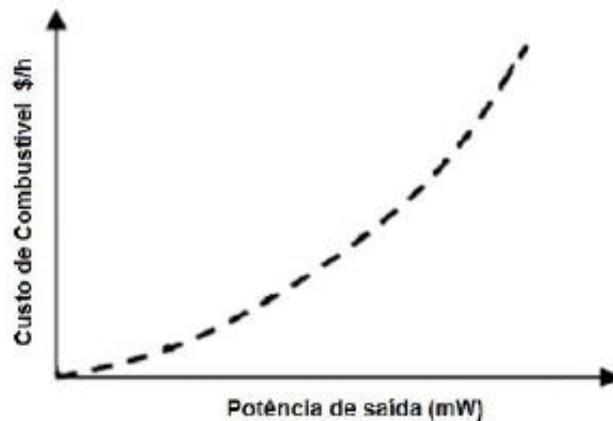


Figura 5.1: Custo de combustível versus Potência de Saída.  
Fonte: (SECUI 2015).

A função de custo de combustível de cada unidade geradora térmica considerando os efeitos de ponto de válvula é expressa como a soma de uma função quadrática e uma função senoidal (SAYAH, HAMOUDA et al. 2014, SAHOO, MAHESH DASH et al. 2015). O custo total do combustível em termos de potência ativa pode ser expresso como:

$$F_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^{N_s} t_m \left[ a_s + b_s P_{sm} + c_s P_{sm}^2 + \left| d_s \sin \left\{ e_s (P_s^{\min} - P_{sm}) \right\} \right| \right] \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Minimização do impacto ambiental

As estações geradoras com combustíveis fósseis são a principal fonte de emissões de óxidos de nitrogênio e outros poluentes. Atualmente existem fortes restrições das agências de proteção ambiental para reduzir a emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) tornando-se esta importante a partir do ponto de vista de conservação do meio ambiente.

Existem várias alternativas para considerar e minimizar o impacto ambiental das usinas termelétricas, elas são apresentadas a seguir:

- Uma estratégia alternativa de despacho que deve satisfazer a exigência ambiental é minimizar o 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 (YALCINOZ; ALTUN 2002, RAGLEND, VEERAVALLI et al. 2010). As emissões são modeladas como um custo para o meio ambiente e, em seguida, eles são adicionados ao custo de geração. A função objetivo é expressa a seguir:

$$\text{minimizar } C = w_0 \cdot F + w_1 \cdot E_S + w_2 \cdot E_N \quad (5.3)$$

Onde  $E_S$  é a função de emissão de  $\text{SO}_2$ ,  $E_N$  é a função de emissão de  $\text{NO}_x$ .  $w_0$ ,  $w_1$  e  $w_2$  são os pesos de custo em relação ao combustível (F), às emissões de  $\text{SO}_2$  e de  $\text{NO}_x$ , respectivamente. F é a função do custo do combustível. Esta é outra variante de considerar as emissões em uma única função objetivo, dando determinado peso nas emissões de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_2$ .

As funções das curvas de custo de emissões em função da potência ativa gerada incluídas na função (5.3) podem ser expressas como segue:

$$E_S = \sum_{i=1}^n (d_i + e_i P_i + f_i P_i^2) \quad (5.4)$$

$$E_N = \sum_{i=1}^n (g_i + h_i P_i + k_i P_i^2) \quad (5.5)$$

em que  $d_i$ ,  $e_i$ ,  $f_i$ ,  $g_i$ ,  $h_i$  e  $k_i$  são os parâmetros estimados com base nos resultados de testes de emissão das unidade geradoras e  $P_i$  é a potência de cada gerador.

Neste modelo, quando os pesos de emissão são iguais a zero, a função objetivo torna-se um problema clássico de DE. Nesta opção do DE o objetivo é minimizar os custos totais de produção do sistema. No caso do despacho de emissão de  $\text{SO}_2$ , os pesos  $w_0$ ,  $w_2$  são iguais a zero e  $w_1$  é igual a um. No despacho de emissão de  $\text{SO}_2$ , o objetivo é o de minimizar a emissão de  $\text{SO}_2$ . No despacho de emissão de  $\text{NO}_x$ , os pesos  $w_0$ ,  $w_1$  são iguais a zero e  $w_2$  é igual a um e o problema torna-se a minimização das emissões de  $\text{NO}_x$ . Quando os pesos não são zero na função objetivo, o problema torna-se minimizar o custo de combustível e as emissões ao mesmo tempo.

Para (ZHANG, GONG et al. 2012), a quantidade de emissão de cada gerador é dada como uma função da sua saída, que é a soma de uma função quadrática e uma função exponencial. A emissão total do sistema pode ser expressa como:

$$F_2 = \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^{N_s} t_m \left[ \alpha_s + \beta_s P_{sm} + \gamma_s P_{sm}^2 + \eta_s \exp(\delta_s P_{sm}) \right] \quad (5.6)$$

onde:  $\alpha_s$ ,  $\beta_s$ ,  $\gamma_s$ ,  $\eta_s$  e  $\delta_s$ , são os coeficientes das características das emissões de cada gerador e  $P_{sm}$  é a potência de cada gerador.

Segundo (ZHANG, ZHOU et al. 2013), o problema multiobjetivo 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.

$$\text{Minimizar } F = F_C + h_i * EC \quad (5.7)$$

onde  $F_C$  é a função custo de combustível e  $EC$  é a quantidade total de emissões.

A expressão (5.7) 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, ZHOU et al. 2013).

$$h_i = \frac{F_C(P_{gi}^{max})}{EC(P_{gi}^{max})} \quad (5.8)$$

onde  $d_i$ ,  $e_i$  e  $f_i$  são os coeficientes das características de emissão por cada unidade geradora.

As emissões consideradas mais importantes na indústria de geração de energia elétrica devido aos seus efeitos sobre o meio ambiente são o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e óxidos de azoto ( $NO_x$ ) (BASU 2008, LIU, LIN et al. 2016). Estas emissões podem ser modeladas através de funções que associam as emissões com a produção de energia para cada unidade. Uma abordagem para representar as emissões de  $SO_2$  e de  $NO_x$  é usar uma combinação de termos polinomiais e exponenciais (JIANG, ZHOU et al. 2013, ZHANG, ZHOU et al. 2013):

$$EC(P_g) = \sum (\alpha_i P_{gi}^2 + \beta_i P_{gi} + \gamma_i) + \varepsilon_i \exp(\lambda_i P_{gi}) \quad (5.9)$$

onde:  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\varepsilon_i$  e  $\lambda_i$ , são os coeficientes das características das emissões de cada gerador  $P_g$  é a potência total gerada e  $P_{gi}$  é a potência de cada gerador.

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

$$F_2(P_i) = \sum_{i=1}^n (d_i + e_i P_i + f_i P_i^3) \quad \text{m}^3/\text{h} \quad (5.10)$$

onde  $d_i$ ,  $e_i$  e  $f_i$  são os coeficientes das características de emissão por cada unidade geradora.

### 5.2.3 Restrições do despacho de carga considerando as emissões

Nesta seção, várias restrições são consideradas:

- Uma restrição de igualdade do balanço de potência ativa gerada.

A equação (5.11) é a restrição de equilíbrio de potência (DHAMANDA ASHISH, ARUNESH et al. 2013, NWULU; XIA 2015)

$$\sum_{i=1}^n P_i - P^D - P^L = 0 \quad (5.11)$$

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

Em outras palavras, a geração total de potência tem que atender a demanda total  $P^D$  e as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão  $P^L$ , isto é:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P^D + P^L \quad (5.12)$$

O cálculo das perdas de potência  $P^L$  envolve a solução do problema de fluxo de carga, que tem restrições de igualdade na potência ativa e reativa em cada barra da seguinte forma (WANG; SINGH 2007):

$$P^L = \sum_{i=1}^n B_i P_i^2 \quad (5.13)$$

Para modelar as perdas de transmissão, é definida a função de saída de cada gerador através dos coeficientes de perdas derivados da fórmula de Kron para as perdas.

$$P^L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} + \sum_{i=1}^M B_{0i} P_{Gi} + B_{00} \quad (5.14)$$

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 operacionais reais estão perto do caso base, onde foram obtidos os coeficientes  $B$  (JUBRIL, OLANIYAN et al. 2014).

- Uma restrição de desigualdade em termos de capacidade de geração.

Para um funcionamento estável, a potência ativa gerada de cada gerador é limitada pelos limites superior e inferior. Essas restrições nos limites de geração são expressas por:

$$P_{min.i} \leq P_i \leq P_{max.i} \quad (5.15)$$

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

- Uma restrição de desigualdade em termos de fornecimento de combustível.

Em cada intervalo de tempo, a quantidade de combustível fornecido a cada gerador  $F_{im}$  deve estar dentro do seu limite inferior  $F_i^{min}$  e o seu limite superior  $F_i^{max}$ , de tal forma que (BASU 2014):

$$F_i^{min} \leq F_{im} \leq F_i^{max}, \quad i \in N, m \in M \quad (5.16)$$

onde:  $F_{im}$  - combustível fornecido ao motor  $i$  no intervalo  $m$ ,  $F_i^{min}$ - quantidade mínima de combustível fornecido a máquina  $i$ ,  $F_i^{max}$ - quantidade máxima de combustível fornecido a máquina  $i$ .

- Uma restrição de desigualdade em termos de limites de armazenamento de combustível.

O volume de armazenamento de combustível  $V_{im}$  de cada unidade em cada intervalo deve estar dentro de seu limite inferior  $V_{min}$  e o limite superior  $V_{max}$ , de modo que (BASU 2014):

$$V_{min} \leq V_{im} \leq V_{max} \quad (5.17)$$

$$V_{im} = V_{(m-1)} + F_{im} - t_m[\eta_i + \delta_i P_i + \mu_i P_i^2] \quad i \in N, m \in M \quad (5.18)$$

onde  $\eta_i$ ,  $\delta_i$  e  $\mu_i$  são os coeficientes de consumo de combustível de cada unidade geradora.

Embora se tenha feito uma forte revisão na literatura sobre as restrições das emissões comparando elas com um limite máximo que não possa ser atingido, não foram encontradas expressões matemáticas de restrições de igualdade ou desigualdade das emissões.

#### 5.2.4 Função Objetivo Econômico usada na tese

A função objetivo utilizada na tese para minimizar o custo de combustível foi a expressão (5.1). É importante destacar que para aplicar essa equação, primeiramente foram calculados os coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$ , e  $c_i$  de cada motor, colocando todos os motores das usinas trabalhando a diferentes valores de potência, em que se obtém a curva de potência versus custo de cada motor. Posteriormente, por métodos de regressão foram obtidas as equações e seus respectivos coeficientes.

#### 5.2.5 Função Objetivo Ambiental usada na tese

A função objetivo ambiental apresentada neste trabalho denominada por Índice de Emissões é inédita e se torna para a literatura um novo conceito a partir da realização desta tese como função objetivo para minimizar o DEA (MUSTAFA-MORAES, HOLANDA-BEZERRA et al. 2016).

O Índice de Emissões para ser usado na função objetivo a minimizar se expressa da seguinte maneira:

$$I_{em}(P_i) = \sum_{i=1}^n (d_i + e_i P_i + f_i P_i^3) \quad \text{mg/m}^3 \quad (5.19)$$

onde  $d_i$ ,  $e_i$  e  $f_i$  são os coeficientes das características do Índice de Emissões por cada unidade geradora. Estes coeficientes foram obtidos segundo o procedimento explicado no epígrafe 4.8.

### 5.3 Métodos para resolver o problema do despacho econômico de geração

Existem diferentes métodos matemáticos e computacionais para resolver o problema do despacho econômico de geração, entre eles podem-se mencionar os seguintes: Método de Iteração Lambda (DHAMANDA ASHISH, ARUNESH et al. 2013, REVATHY; NITHIYANANDHAM 2014), Programação Quadrática Sequencial (DHANRAJ;

GAJENDRAN 2005, DEVENDRA BISEN 2012, BENHAMIDA, ZIANE et al. 2013, MORSHED; ASGHARPOUR 2014). Método de Newton (RAHUL DOGRA 2014). Nesta tese para desenvolver a parte da minimização dos custos foi utilizado o Método de Iteração Lambda.

### 5.3.1 O Método de Iteração Lambda

Uma das técnicas tradicionais mais populares para resolver o problema do DE, minimizando o custo da unidade geradora é o método de iteração lambda. Embora o procedimento computacional da técnica de iteração lambda seja complexo, ele converge rapidamente para este tipo de problema de otimização (DHAMANDA ASHISH, ARUNESH et al. 2013, REVATHY; NITHIYANANDHAM 2014). O método de iteração lambda é mais convencional para lidar com a minimização do custo da geração de energia para qualquer demanda. Para um grande número de unidades, o método de iteração lambda é mais preciso.

Na figura 5.2 é apresentado o algoritmo do método de iteração lambda para o DE.

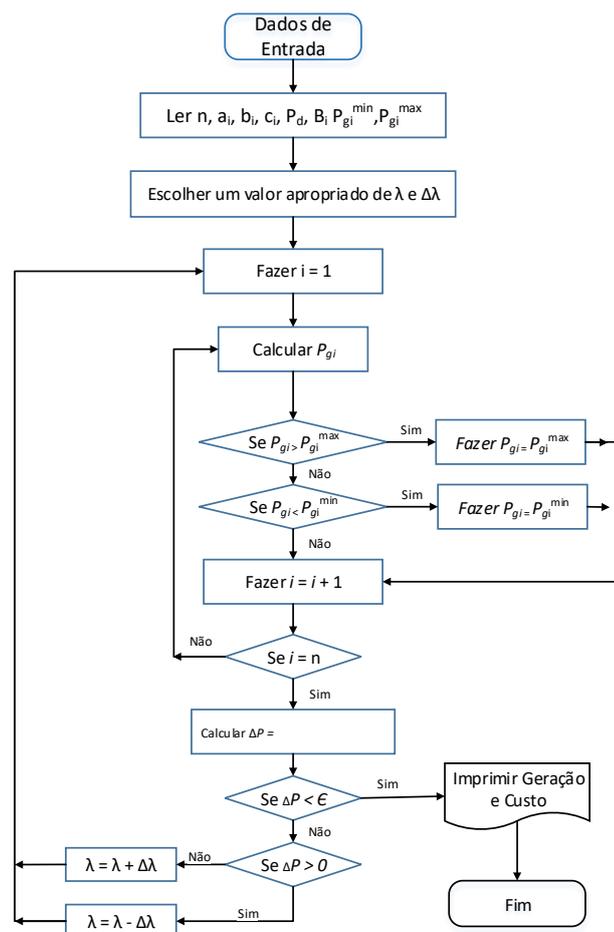


Figura 5.2: Algoritmo para o processo de iteração  $\lambda$  para resolver o problema do despacho econômico de geração.

Fonte: adaptado de (DIKE, ADINFONO et al. 2013).

Os passos para resolver o algoritmo do método de iteração lambda ( $\lambda$ ) são: adaptado de (DIKE, ADINFONO et al. 2013):

1. Ler os dados do problema:

Os coeficientes de custo ( $a_i, b_i, c_i$ ); Os coeficientes de perda ( $B_i$ ); Os limites de potência gerada; A demanda de potência ativa;

2. Assumir um valor inicial de  $\lambda$  e  $\Delta\lambda$  para usar nas equações de custos;
3. Calcular a potência gerada por cada unidade  $P_{gi}$ , e;
4. Verificar os limites de cada unidade de geração:

$$\begin{aligned} \text{se } P_{gi} > P_{gi}^{max} &, \quad \text{então } P_{gi} = P_{gi}^{max} \\ \text{se } P_{gi} < P_{gi}^{min} &, \quad \text{então } P_{gi} = P_{gi}^{min} \end{aligned}$$

5. Calcular a potência ativa gerada.
6. Calcular o desvio de potência pela seguinte equação:

$$\Delta P = \sum_{i=0}^{N_g} P_{gi} - P_d \quad (5.20)$$

7. se  $\Delta P < \varepsilon$  (valor de tolerância), em seguida, parar cálculos e estimar o custo de geração. Caso contrário, vá para a próxima fase:

$$\begin{aligned} \text{se } \Delta P > 0 &, \quad \text{então } \lambda = \lambda - \Delta\lambda \\ \text{se } \Delta P < 0 &, \quad \text{então } \lambda = \lambda + \Delta\lambda \end{aligned}$$

8. Repetir o procedimento a partir da etapa 3.

O método de iteração lambda é um dos mais utilizados para resolver o DE.

#### 5.4 Uso do Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) para Resolver o Problema do DEA.

Segundo Deb *et al.* (2000) desenvolveram um algoritmo, NSGA-II, que usa um mecanismo de preservação e diversificação de soluções. Depois identifica várias frentes não dominadas, classificando a população em diferentes níveis de dominância. Existem muitos conceitos e definições particulares em otimização multiobjetivo. Como trabalha com problemas em que os objetivos encontram-se em conflito, não é possível obter uma solução ótima, mas um conjunto de soluções que constituem a frente ótima de Pareto. Nestas circunstâncias, ter como solução do problema um conjunto de soluções “ótimas” pode ser entendido no sentido de não se poder afirmar que, nesse conjunto, uma solução é melhor do que outra (i.e., o conceito de não dominância é o conceito chave em otimização multiobjetivo, mas é um conceito “pobre” no sentido em que não permite discriminação entre essas soluções) (PEREIRA, 2011; BROWNLEE, 2011) e (DEB *et. al.*, 2000).

O problema de otimização multiobjetivo é definido como (MUSLU 2004, MUELA; SECUE 2012, KASMAEI 2015):

$$\text{Minimize } [F_1(P), F_2(P)] \quad (5.21)$$

onde  $F_1(P)$ ,  $F_2(P)$  são as funções objetivo a ser minimizada ao longo do conjunto de decisão admissível que é o vetor  $P$ .

No caso desta tese serão utilizadas como função  $F_1(P)$  a equação (5.1) e como função  $F_2(P)$  a equação (5.19)

O NSGA-II, que é conhecido como algoritmo genético elitista não-dominado, tem as seguintes características:

- Ele usa técnicas de categorização não dominadas para fornecer a solução o mais próxima possível para a solução de Pareto-ótima.
- Ele usa técnicas de distância de aglomeração para proporcionar diversidade na solução.
- Ele usa 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 viável. 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 gerações;

**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 os frentes de Pareto não-dominados  $F_i$  de  $R_t$ .

**Passo - 8.** Iniciar a nova população  $P_{t+1} = zero$  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 prole ou os descendentes da nova população  $Q_{t+1}$ .

#### 5.4.1 Inicialização

Inicializar a população  $P_t$  gerando aleatoriamente  $P_i$ 's e satisfazendo as restrições do balanço de potência Eq. (5.31). Após a inicialização é criada uma população prole  $Q_t$  da população atual  $P_t$  e então as duas populações são combinadas para formar  $R_t$ . Onde  $R_t$  define-se como: (DHILLON; JAIN 2011).

$$R_t = P_t \cup Q_t \quad (5.22)$$

#### 5.4.2 Seleção Não Dominada

A figura 5.3 mostra a população inicial é classificada de acordo com a não dominação (DHILLON & JAIN 2011). O algoritmo tem início na iteração ( $t = 0$ ) com a geração aleatória de uma população  $P_0$ , de tamanho  $N$ . Nessa população são identificadas várias frentes não dominadas, classificando as soluções em diferentes níveis de não dominância “rank”. A cada solução é atribuído um valor de aptidão igual ao seu nível de dominância, começando por 1 para as soluções da primeira frente (que são as soluções não dominadas da população). Este procedimento é conhecido como ordenamento não dominado “*non-dominated sorting*”.

Depois desta fase de inicialização do algoritmo, inicia-se uma fase comum a todas as gerações (iterações) que compreende os seguintes passos pela iteração  $t$ :

1) Aplica-se um mecanismo de seleção por torneio, baseado no valor da aptidão e da distância de multidões de forma a preservar a diversidade da população. A solução  $i$  ganha o torneio se: tiver melhor classificação (em termos de ordenação nas frentes não dominadas) do que a solução  $j$ , ou se tiver a mesma classificação e a solução  $i$  tiver uma distância de multidões superior à solução  $j$ . A distância de multidões é usada como uma estimativa da densidade de soluções na vizinhança de uma solução  $i$ ;

2) São aplicados os operadores genéticos cruzamento e mutação, para construir uma população de descendentes,  $Q_t$ , de tamanho  $N$  que é combinada com a população  $P_t$  para formar uma terceira população  $R_t$  composta dos progenitores e descendentes;

3) As soluções da população  $R_t$  resultante (com tamanho  $2N$ ), são classificadas por níveis de dominância para identificação das diferentes frentes não dominadas, e;

4) É feita uma nova população,  $P_{t+1}$ , a partir das soluções da população  $R_t$  (ver Figura 5.5). Como o tamanho de  $P_{t+1}$  é metade da de  $R_t$ , nem todas as frentes podem ser adicionadas à nova população. Isto implica que as piores frentes sejam ignoradas e que, ao adicionar a última frente possível à nova população, o número de soluções seja maior do que o espaço que sobra em  $P_{t+1}$ . Não havendo possibilidade de adicionar a totalidade de soluções da última frente possível, quando esta frente é adicionada, em vez de simplesmente se ignorar os elementos excedentes, é usada uma estratégia baseada em distância de multidões.

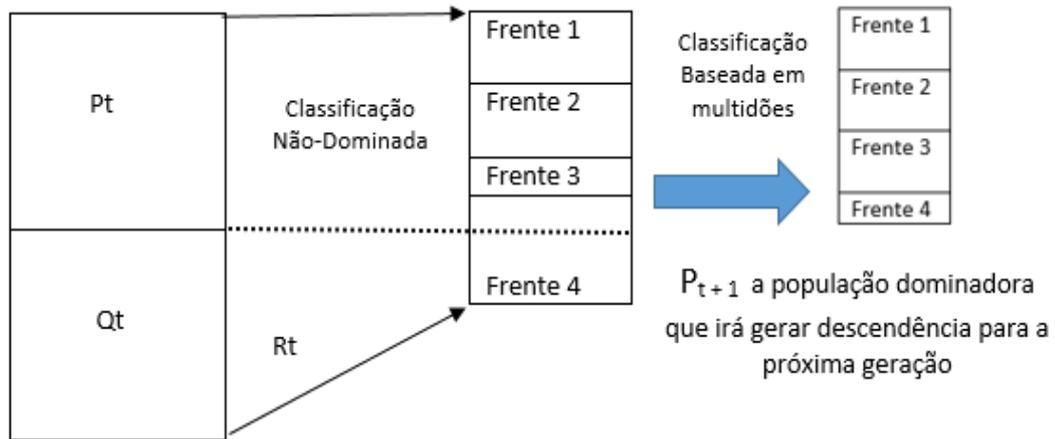


Figura 5.3: Seleção não-dominada e distância de aglomeração.

Fonte: (DHILLON; JAIN 2011).

5) Se a iteração corrente é menor do que o número pré-definido de gerações é incrementado  $t = t + 1$  e se volta ao passo 1, mais em caso contrário o algoritmo termina.

De acordo com Sheshadri (2012), lançou o código fonte em Matlab para NSGA-II que é utilizado no desenvolvimento do *software* de otimização desta tese. Algumas características desta implementação do NSGA-II são as seguintes:

1) O algoritmo fica codificado diretamente em números reais “real-coded GA”, assim, o cromossomo fica representado por um arranjo de números reais, e;

2) O operador genético cruzamento emprega a técnica do “*Simultated Binary Crossover SBX*”, a qual simula o cruzamento binário que existe na natureza. O cruzamento do elemento  $j$  de dois progenitores  $p_{1j}$  e  $p_{2j}$  é feito mediante o seguinte procedimento:

- a. Gera-se um número aleatório  $u_j$  uniformemente distribuído entre 0 e 1.
- b. Calcula-se o coeficiente  $\beta_j$ , mediante (5.22).

$$\beta_j = \begin{cases} (2u_j)^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j \leq \frac{1}{2} \\ (1/(2-2u_j))^{\frac{1}{\mu+1}} & \text{se } u_j > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5.23)$$

onde  $\mu$  é o índice de cruzamento selecionado ( $\mu=20$ ) segundo (SHESHADRI, 2012).

- c. Calcula-se os elementos  $j$  dos filhos  $c_{1j}$  e  $c_{2j}$  mediante (5.23).

$$\begin{aligned} c_{1j} &= \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{2j} \\ c_{2j} &= \frac{1}{2}(1 - \beta_j)p_{1j} + \frac{1}{2}(1 + \beta_j)p_{2j} \end{aligned} \quad (5.24)$$

3) O operador genético mutação segue uma técnica tal como o cruzamento. A mutação do elemento  $j$  do pró-genitor  $p_j$  é feita mediante o seguinte procedimento:

- a. Gera-se um número aleatório  $r_j$  uniformemente distribuído entre 0 e 1.
- b. Calcula-se o coeficiente  $\delta_j$ , mediante (5.24).

$$\delta_j = \begin{cases} (2r_j)^{\frac{1}{\mu m+1}} - 1 & \text{se } r_j < \frac{1}{2} \\ 1 - (1/(2 - 2r_j))^{\frac{1}{\mu m+1}} & \text{se } r_j \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5.25)$$

onde  $\mu m$  é o índice de mutação selecionado ( $\mu m=20$ ) (SHESHADRI, 2012).

- c. Calcula-se o elemento  $j$  do filho  $c_j$  mediante (5.25).

$$c_j = p_j + (x_{\max_j} - x_{\min_j})\delta_j \quad (5.26)$$

onde  $x_{\max_j}$  e  $x_{\min_j}$  são os limites superior e inferior para a variável representada na posição  $j$  do cromossomo.

4) O algoritmo não tem um critério de convergência especial, mais termina quando se completa o número estabelecido de gerações.

Para poder utilizar o código de Sheshadri, foi necessário desenvolver algumas modificações que são descritas seguidamente (SHESHADRI, 2012):

1) Depois que o operador genético de cruzamento é feito, os resultados  $c_{1j}$  e  $c_{2j}$  dos elementos  $j$  que são números inteiros são aproximados ao valor inteiro mais próximo.

2) Depois que o operador genético de mutação é feito, os resultados  $c_j$  dos elementos  $j$  que são números inteiros são aproximados ao valor inteiro mais próximo. Se o resultado  $c_j < x_{\min_j}$ , é avaliado  $c_j = x_{\max_j}$ , pelo contrário, se o resultado  $c_j > x_{\max_j}$ , é avaliado  $c_j = x_{\min_j}$ .

3) Além disso, os limites  $x_{\min_j}$  e  $x_{\max_j}$  são considerados na obtenção das soluções viáveis.

#### 5.4.3 Distância de aglomeração

Para fornecer a diversidade da população, a distância de aglomeração é calculada. (DHILLON; JAIN 2011). O seguinte pseudocódigo é usado para calcular a distância de aglomeração de cada ponto no conjunto I.

$$l = |I|$$

Para cada  $i$

Estabelecer  $I[i]_{distância} = 0$

*fim*

Para cada  $m$

Estabelecer  $I = ordenar(I, m)$

$I[1]_{distância} = I[l]_{distância} = \infty$

*fim*

Para ( $I = 2$  a  $(l - 1)$ )

$$I[i]_{distância} = I[i]_{distância} + \frac{(I(k+1) \cdot m - I(k-1) \cdot m)}{f_m^{max} - f_m^{min}}$$

*fim*

Em primeiro lugar atribuir o valor limite para o infinito e, em seguida, calcular a distância de aglomeração. Aqui,  $I(k).m$  é a distância de aglomeração para a função objetivo  $m_{th}$  do indivíduo enésimo  $k_{th}$ . (DHILLON; JAIN 2011).

$I$  – Conjunto de soluções não dominadas

$l$  – Número total de soluções no conjunto  $I$

$m$  – Número de funções objetivo

$f_m^{max}$  – Valor máximo da aptidão da função objetivo  $m_{th}$

$f_m^{min}$  – Valor mínimo da aptidão da função objetivo  $m_{th}$

#### 5.4.4 Seleção

Uma vez que os indivíduos são classificados com base na não-dominação 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. Como mostrado na Figura 5.3, ela vai ser usado para criar a frente 4 de tamanho menor do que o obtido após a seleção não dominada como mostra a figura 5.3 (DHILLON; JAIN 2011).

Assume-se que toda solução tem dois atributos:

- 1) Um intervalo não dominado em população ( $r_i$ ).
- 2) Uma distância local de aglomeração  $I[i]_{distância}$

$i > nj$

se  $(r_i < r_j)$

ou se  $((r_i = r_j) \text{ e } (I [i]_{distância} = I [j]_{distância}))$

A solução  $i$  é melhor do que  $j$  se o intervalo da  $i_{th}$  solução é melhor do que  $j_{th}$  ou se eles têm o mesmo valor, mas a distância de aglomeração da  $i_{th}$  solução é melhor do que  $j_{th}$  (DHILLON; JAIN 2011).

#### 5.4.5 Cruzamento e Mutação

O algoritmo genético a ser empregado neste trabalho usa o cruzamento simulado binário e a muta o polinomial para criar a popula o  $Q_t$  como mostra na Figura 5.4 (DHILLON; JAIN 2011).

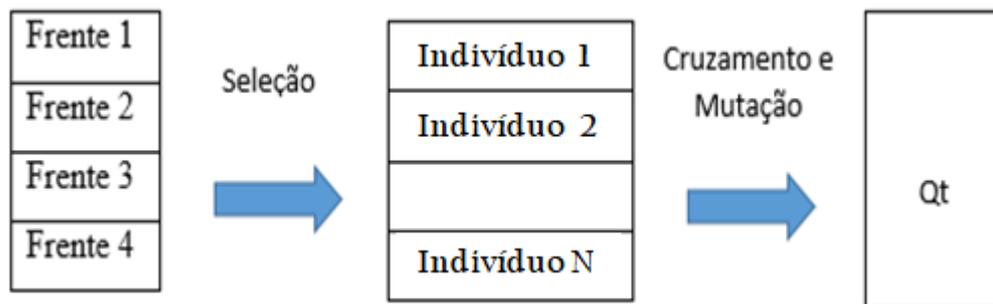


Figura 5.4: Opera es de Cruzamento e Muta o.  
Fonte: (DHILLON; JAIN 2011).

##### 1) Cruzamento Binário Simulado

Para gerar a prole ou solu es dos filhos usando cruzamento,   necessário selecionar aleatoriamente a soluço de dois pais  $(p_{1,k}, p_{2,k})$  da popula o inicial e, em seguida, gerar a soluço de dois descendentes  $(c_{1,k}, c_{2,k})$  (DHILLON; JAIN 2011) conforme o seguinte pseudocódigo:

$$N_{pop} = |pop|$$

para cada  $k$

$$r_{1,k} = \text{random}(1, N_{pop})$$

$$r_{2,k} = \text{random}(1, N_{pop})$$

$$p_{1,k} = pop[r_{1,k}]$$

```

    p2,k = pop r2k
uk = random (0,1)
se (uk > 0,5)
    βk = (2 uk)1/nc+1
senão
    βk =  $\frac{1}{[2(u_k-1)]^{\frac{1}{n_c+1}}}$ 
end
c1,k = 0,5 · [(1 - βk) · p1,k + (1 + βk) · p2,k]
c2,k = 0,5 · [(1 + βk) · p1,k + (1 - βk) · p2,k]
Qt = Qt · Uc1,k
Qt = Qt · Uc2,k
end

```

## 2) Mutação polinomial

Este operador seleciona aleatoriamente uma solução-mãe da população e aplica o operador de mutação para gerar uma única prole ou descendência (DHILLON; JAIN 2011).

O pseudocódigo é dado como:

```

para cada k
    rk = random (1, Npop)
    pk = pop rk
    uk = random (0,1)
    if (uk < 0,5)
        δk = (2rk)1/nm+1 - 1
    else
        δk = 1 - {2(rk - 1)}1/nm+1
    end
    ck = pk + (pku + pkl)δk
    Qt = Qt ∪ ck
end

```

Em que :

$r$  – número randômico para selecionar a solução mãe

$p$  – solução mãe da população,  $pop$

$c$ - solução filha

$u_k$  – número randômico

$n_c$  – índice de distribuição de cruzamento

$n_m$  – índice de distribuição de mutação

$\beta_k$  – fator de dispersão

$\beta_k$  – variação pequena

## 5.5 Melhor Solução de Compromisso

A otimização da formulação multiobjetivo apresentada neste capítulo usando o NSGA-II oferece 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 viável (DHILLON; JAIN 2011).

No presente trabalho foi usado o NSGA-II para otimizar o funcionamento de uma planta geradora de energia usando duas funções objetivo:

1- O Custo de Combustível

2- O Índice de Emissões

Trata-se então do uso do NSGA-II para minimizar simultaneamente o custo de combustível que vem dado pela função 5.1 sujeito as restrições expressadas pelas equações 5.11 a 5.18 e minimizar também o Índice de Emissões que é dado pela função 5.19, as quais são funções quadrática e cúbica, respectivamente.

## CAPÍTULO VI - ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 Despacho de Carga Econômico Ambiental: Estudos de casos.

#### 6.1.1 Formulação do problema

Foram selecionadas duas usinas como estudos de caso, o sistema de teste de 118-barras do IEEE e uma usina na cidade de Manaus. Esta última usina está composta por 23 geradores, dos quais selecionamos um conjunto de 10 geradores com características idênticas. As características dos geradores são mostradas na Tabela 6.1. Para a determinação dos coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$ , foi conduzido um teste de operação experimental, executando os geradores para potências diferentes e medindo o combustível consumido. Em seguida, as curvas de potência versus custo de combustível foram plotadas e por um método de regressão os coeficientes  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$ , foram obtidos. A demanda de energia utilizada foi de 20 MW para o caso dos 10 geradores.

Tabela 6.1: Dados característicos dos geradores de usina do estudo de casos

Gerador	$c_i$ (\$/Mw ^2)	$b_i$ (\$/Mw)	$a_i$ (\$)	$P_{min}$ (Mw)	$P_{max}$ (Mw)
<b>PG1</b>	0.15247	38.53973	756.79886	0,76	3,36
<b>PG2</b>	0.10587	46.15916	451.32513	0,76	3,36
<b>PG3</b>	0.02803	40.3965	1049.9977	0,76	3,36
<b>PG4</b>	0.03546	38.30553	1243.5311	0,76	3,36
<b>PG5</b>	0.02111	36.32782	1658.5596	0,76	3,36
<b>PG6</b>	0.01799	38.27041	1356.6592	0,76	3,36
<b>PG7</b>	0.02682	45.27041	1260.6592	0,76	3,36
<b>PG8</b>	0.02700	46.27041	1266.6592	0,76	3,36
<b>PG9</b>	0.02754	47.27041	1287.6592	0,76	3,36
<b>PG10</b>	0.02799	48.27041	1290.6592	0,76	3,36

Fonte: Autora, (2016).

Os Coeficientes de Perda de Transmissão ( $B_m$ ) são dados por uma matriz quadrada de dimensão  $n \times n$ , onde  $n$  é o número de motores. A matriz de perda,  $B_m$ , para a usina de 10 geradores (todos os valores devem ser multiplicados por  $1e-2$ ), como mostra a figura 6.1 tendo a matriz simétrica definida por: Uma matriz quadrada  $S = [a_{ij}]$  é simétrica se  $S^T = S$ . Se  $S = [a_{ij}]$  é uma matriz simétrica, os elementos dispostos simetricamente em relação à diagonal principal são iguais, isto é,  $a_{ij} = a_{ji}$ . Neste caso, o produto de uma matriz quadrada  $S$  pela sua transposta  $S^T$  é também uma matriz simétrica.

$$B_m = \begin{bmatrix} 0.000049 & 0.000014 & 0.000015 & 0.000015 & 0.000016 & 0.000017 & 0.000017 & 0.000018 & 0.000019 & 0.000020 \\ 0.000014 & 0.000045 & 0.000016 & 0.000016 & 0.000017 & 0.000015 & 0.000015 & 0.000016 & 0.000018 & 0.000018 \\ 0.000015 & 0.000016 & 0.000039 & 0.000010 & 0.000012 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000014 & 0.000016 & 0.000016 \\ 0.000015 & 0.000016 & 0.000010 & 0.000040 & 0.000014 & 0.000010 & 0.000011 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000015 \\ 0.000016 & 0.000017 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000035 & 0.000011 & 0.000013 & 0.000013 & 0.000015 & 0.000016 \\ 0.000017 & 0.000015 & 0.000012 & 0.000010 & 0.000011 & 0.000036 & 0.000012 & 0.000012 & 0.000014 & 0.000015 \\ 0.000017 & 0.000015 & 0.000014 & 0.000011 & 0.000013 & 0.000012 & 0.000038 & 0.000016 & 0.000016 & 0.000018 \\ 0.000018 & 0.000016 & 0.000014 & 0.000012 & 0.000013 & 0.000012 & 0.000016 & 0.000040 & 0.000015 & 0.000016 \\ 0.000019 & 0.000018 & 0.000016 & 0.000014 & 0.000015 & 0.000014 & 0.000016 & 0.000015 & 0.000042 & 0.000019 \\ 0.000020 & 0.000018 & 0.000016 & 0.000015 & 0.000016 & 0.000015 & 0.000018 & 0.000016 & 0.000019 & 0.000044 \end{bmatrix}$$

Figura 6.1: Matriz Simétrica apresenta os coeficientes de perdas de transmissão.

Fonte: Autora, (2016).

Na Tabela 6.2 são apresentados os coeficientes de emissão para a usina de 10 geradores (todos os valores devem ser multiplicados por 1 e -1). Esta tabela foi feita conforme o procedimento desenvolvido no epigrafe 4.8.

Tabela 6.2: Coeficientes de emissões para os 10 geradores da usina.

Gerador	$f_i ((\text{mg}/\text{m}^3\text{h})/(\text{MW}^3))$	$e_i (\text{mg}/\text{m}^3\text{h})/(\text{MW})$	$d_i (\text{mg}/\text{m}^3\text{h})$
<b>PG1</b>	0.00419	1.32767	73.85932
<b>PG2</b>	0.00419	0.32767	13.85932
<b>PG3</b>	0.00683	-0.54551	40.2669
<b>PG4</b>	0.00683	-0.54551	40.2669
<b>PG5</b>	0.00461	-0.51116	42.89553
<b>PG6</b>	0.00461	-0.51116	42.8955
<b>PG7</b>	0.00461	-0.51116	42.8955
<b>PG8</b>	0.00461	-0.51116	42.8955
<b>PG9</b>	0.00061	-0.51116	10.8955
<b>PG10</b>	0.00461	-0.51116	42.8955

Fonte: Autora, (2016).

Para desenvolver todo o processo de otimização foi usado o NSGA-II, conhecido como algoritmo genético de ordenação elitista e não dominada, apresenta as seguintes características (MUTHUSWAMY, KRISHNAN et al. 2015, ZHIJIAN ZHU, WANG et al. 2016):

- Usa técnicas de classificação não dominadas para fornecer a solução o mais próximo possível da solução ótima de Pareto;
- Usa técnicas de distância de aglomeração para fornecer diversidade nas soluções, e;
- Utiliza técnicas elitistas para preservar a melhor solução da população atual na próxima geração.

Há dois estágios na solução do problema multiobjetivo: determinação do conjunto de soluções não dominadas e seleção da melhor solução de compromisso (DHILLON; JAIN 2011).

O processo de implementação é explicado nos seguintes passos (adaptados à potência ativa) (DHILLON; JAIN 2011):

**Passo - 1** Organização dos dados do gerador de acordo com o mais eficiente e seleção do número mínimo de geradores que satisfaçam a demanda de potência ativa.

**Passo - 2** Definição da demanda de potência a ser fornecida pela planta em MW: ( $P_d = 1,000\text{Mw}$ ).

**Passo - 3** Parâmetros do algoritmo:

Tamanho da população = 300;

Geração máxima = 400;

Estes parâmetros foram selecionados após 200 simulações com diferentes números de indivíduos, onde com 300 indivíduos foi obtido o menor custo total com desvio padrão de 0,1944 e coeficiente de variação de Pearson de 1,11%.

**Passo - 4.** Inicializar a população  $P_t$ .

**Passo - 5.** Criar a população descendente  $Q_t$  da população atual  $P_t$

**Passo - 6.** Combinar as duas populações  $Q_t$  e  $P_t$  para formar  $R_t$ , donde  $R_t = P_t \cup Q_t$

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

**Passo - 8.** Inicie a nova população  $P_{t+1} = null$  e o contador de frente para a inclusão  $i = 1$ .

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

**Passo - 10.** Classificar 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 operadores de seleção, cruzamento e mutação para criar a nova população de descendentes  $Q_{t+1}$ .

### 6.1.2 Análise e discussão de resultados.

O relatório de solução apresenta os parâmetros de entrada para executar o programa, tais como a demanda de energia, as potências mínimas e máximas dos motores e os resultados do custo total de combustível, perda de potência total e potência ideal para cada máquina na usina para atender a demanda de carga.

Na tabela 6.3 são apresentados os resultados do estudo de caso da usina localizada na cidade de Manaus (primeiro estudo de caso). Estes resultados foram obtidos após a execução do programa para uma demanda de energia de 20 MW.

Tabela 6.3: Programação final do NSGA-II.

<b>Soluções ao despacho econômico ambiental usando NSGA-II.</b>			
Demanda de Potência	20 MW		
Potência Mínima	0,76 MW		
Potência Máxima	3,36 MW		
Perdas de Potência	0,135 MW		
Custo de Combustível	6.684,72 \$/h		
<b>Valores de Potência e Índice de Emissões de cada gerador</b>			
Potência	MW	Índice de Emissões	g/m <sup>3</sup>
Pm <sub>1</sub>	1,72	Em <sub>1</sub>	41,24
Pm <sub>2</sub>	3,01	Em <sub>2</sub>	42,96
Pm <sub>3</sub>	2,35	Em <sub>3</sub>	41,64
Pm <sub>4</sub>	0,92	Em <sub>4</sub>	43,37
Pm <sub>5</sub>	0,76	Em <sub>5</sub>	43,29
Pm <sub>6</sub>	0,76	Em <sub>6</sub>	43,29
Pm <sub>7</sub>	0,76	Em <sub>7</sub>	43,29
Pm <sub>8</sub>	3,34	Em <sub>8</sub>	44,78
Pm <sub>9</sub>	3,02	Em <sub>9</sub>	44,57
Pm <sub>10</sub>	3,36	Em <sub>10</sub>	43,12
<b>Total</b>	<b>20,01</b>	<b>Total</b>	<b>431,53</b>

Fonte: Autora, (2016).

Pm<sub>i</sub> é a potência assignada a cada gerador  $i_{th}$  e Em<sub>i</sub> é o Índice de Emissões de cada gerador  $i_{th}$ .

Como pode ser observado da Tabela 6.3 existe certa diferença entre os índices de emissão dos geradores, e a demanda de potência é distribuída entre todos os geradores, com valores menores atribuídos aos geradores 2 e 10. Também pode-se observar que nem sempre a potência máxima está relacionada com a máxima emissão.

Na Tabela 6.4 mostram-se os resultados para o estudo de caso do sistema de teste 118-barras do IEEE (LEKSHMI, EEE et al. 2014, MA, DING et al. 2016). Estes resultados foram

obtidos após a execução do programa para uma demanda de potência de 3.500 MW, que é uma potência entre a potência máxima e mínima deste sistema. Este sistema tem 54 unidades térmicas, 118-barras, 186 ramos e 91 lados de carga (WANG, VITTAL et al. 2011). Como não há dados na literatura do índice de emissão desse tipo de sistema, esses dados foram obtidos extrapolando os dados do primeiro estudo de caso. Esta extrapolação foi feita segundo as curvas de tendência de cada poluente e da potência de cada motor.

Tabela 6.4: Programação final do NSGA-II.

<b>Soluções ao despacho econômico ambiental usando NSGA-II.</b>			
Demanda de Potência	3,500 MW		
Potência Mínima	5 MW		
Potência Máxima	420 MW		
Perdas de Potência	3,49 MW		
Custo de Combustível	85786.94 \$/h		
<b>Valores de Potência e Índice de Emissões de cada gerador</b>			
<b>Potência</b>	<b>MW</b>	<b>Índice de Emissões</b>	<b>g/m<sup>3</sup></b>
Pm1	5.59	Em1	38.41
Pm2	8.00	Em2	39.40
Pm3	60.88	Em3	1051.99
Pm4	11.90	Em4	44.59
Pm5	23.56	Em5	91.15
Pm6	60.30	Em6	1022.92
Pm7	5.10	Em7	40.90
Pm8	10.78	Em8	45.58
Pm9	8.00	Em9	41.17
Pm10	61.28	Em10	1578.26
Pm11	42.28	Em11	369.65
Pm12	8.00	Em12	39.40
Pm13	101.80	Em13	4853.65
Pm14	150.00	Em14	23009.69
Pm15	126.11	Em15	8405.10
Pm16	75.72	Em16	2005.61
Pm17	35.77	Em17	235.63
Pm18	83.68	Em18	2471.18
Pm19	10.87	Em19	43.26
Pm20	8.00	Em20	41.17
Pm21	39.55	Em21	307.82
Pm22	44.66	Em22	430.60
Pm23	15.62	Em23	52.49
Pm24	169.92	Em24	22572.80
Pm25	38.03	Em25	277.09
Pm26	6.98	Em26	40.90
Pm27	5.00	Em27	40.92
Pm28	8.00	Em28	41.17
Pm29	66.14	Em29	1343.05
Pm30	57.00	Em30	867.56

Pm31	156.38	Em31	17593.67
Pm32	179.03	Em32	26406.17
Pm33	121.31	Em33	7485.04
Pm34	150.87	Em34	14384.20
Pm35	10.26	Em35	42.63
Pm36	45.05	Em36	640.36
Pm37	111.52	Em37	6380.21
Pm38	120.78	Em38	8104.02
Pm39	123.29	Em39	8619.56
Pm40	11.66	Em40	44.24
Pm41	101.05	Em41	7032.32
Pm42	85.92	Em42	2922.53
Pm43	142.93	Em43	13430.00
Pm44	69.55	Em44	2300.28
Pm45	150.00	Em45	23009.69
Pm46	108.83	Em46	8785.63
Pm47	50.94	Em47	626.07
Pm48	11.67	Em48	44.25
Pm49	77.72	Em49	2166.98
Pm50	33.47	Em50	278.16
Pm51	10.00	Em51	41.64
Pm52	166.15	Em52	19208.43
Pm53	5.23	Em53	42.75
Pm54	111.16	Em54	9360.85
<b>Total</b>	<b>3503.31</b>	<b>Total</b>	<b>250392.79</b>

Fonte: Autora, (2016).

Como pode ser observado a partir da Tabela 6.4, existe uma grande diferença entre os Índices de Emissão dos motores do sistema de teste 118-barras do IEEE.

Isto é principalmente devido à grande diferença entre os motores deste sistema; por exemplo, é atribuída uma potência de 5MW ao gerador 27 e uma potência de 179 MW ao gerador 32. Esta situação conduz também a diferentes Índices de Emissões dos geradores.

A figura 6.2 mostra o *trade off* entre o Índice de Emissão e o custo de combustível do primeiro estudo de caso após a aplicação do NSGA-II, gerado pelo MATLAB.

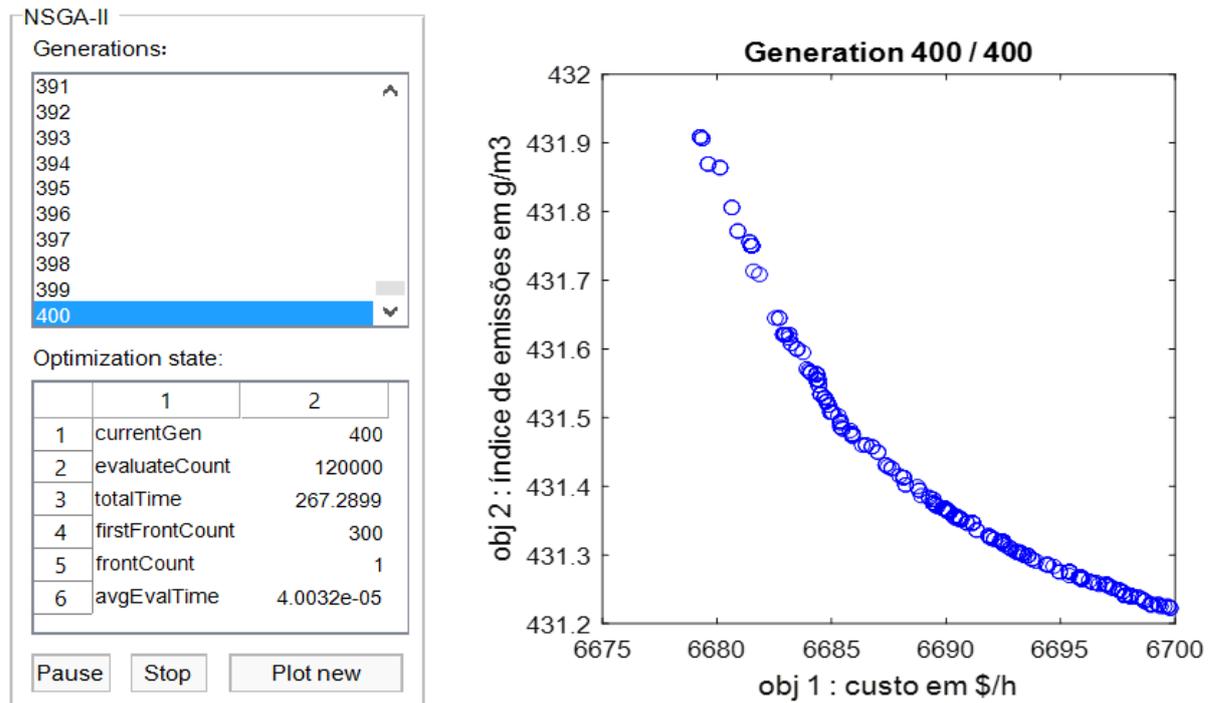


Figura 6.2: *Trade off* entre o Índice de Emissões e o custo de combustível depois da aplicação do NSGA-II, no sistema de 10 geradores.

Fonte: Autora, (2016).

A figura 6.3 mostra o *trade off* entre o Índice de Emissão e o custo de combustível do sistema de teste de 118-barras do IEEE após a aplicação do NSGA-II, gerado pelo MATLAB.

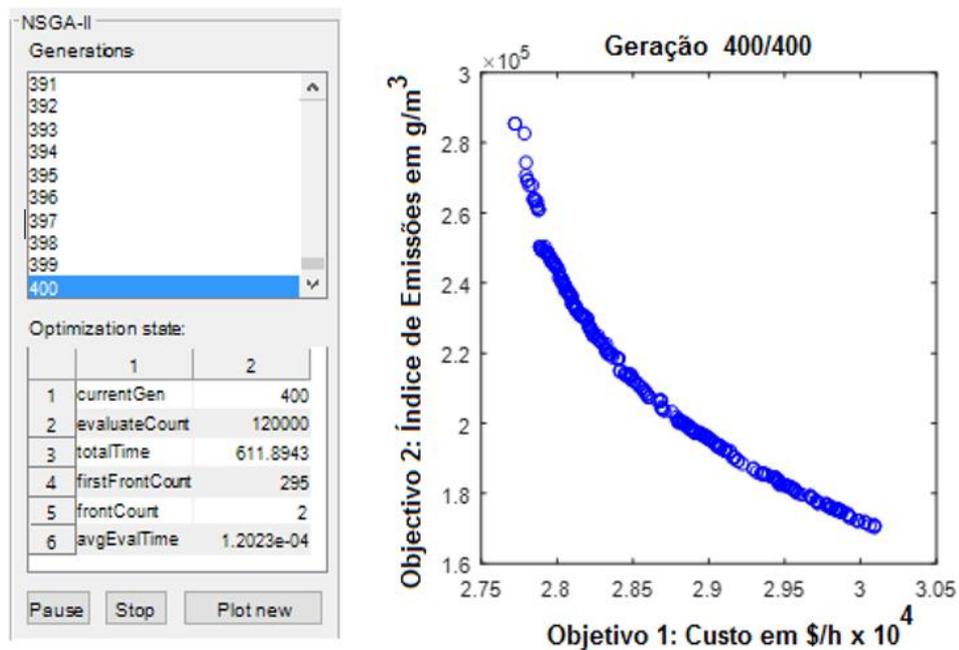


Figura 6.3: *Trade off* entre o Índice de Emissões e o custo do combustível após a aplicação do NSGA-II para o sistema de teste 118-barras do IEEE.

Fonte: Autora, (2016).

Na figura. 6.4 mostra-se uma comparação da potência ativa de cada gerador para a usina do primeiro estudo de caso, onde é possível observar que os geradores (5, 6 e 7) produzem menos potência.

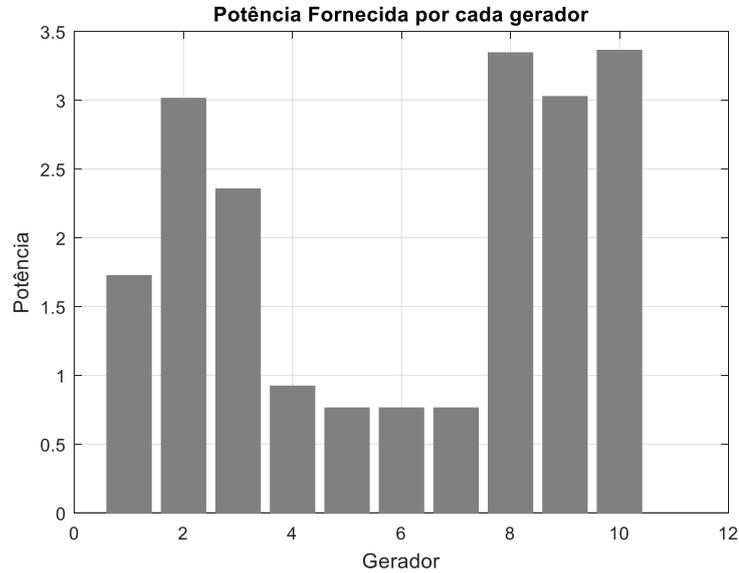


Figura 6.4: Potência de cada gerador para o primeiro caso de estudo.  
Fonte: Autora, (2016).

Na figura 6.5, é mostrado o gráfico comparativo da potência de saída ativa de cada gerador para o sistema de teste 118-barras do IEEE.

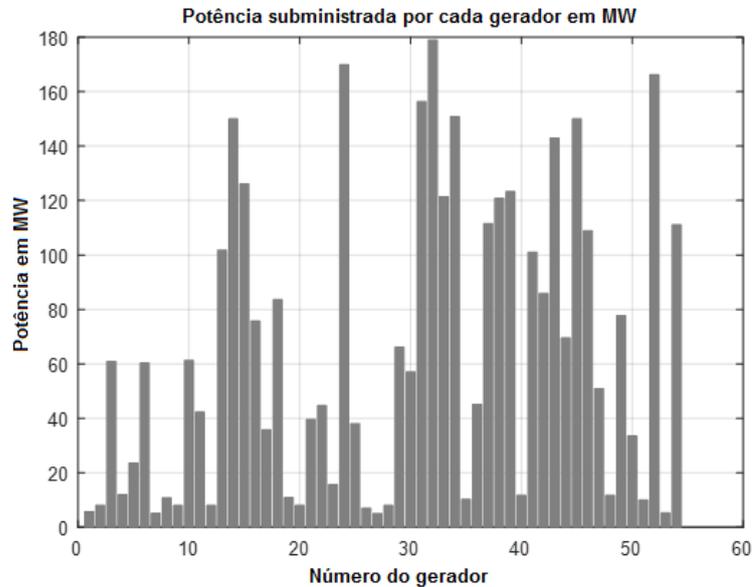


Figura 6.5: Potências de saída dos geradores para o sistema de teste IEEE 118-barras.  
Fonte: Autora, (2016).

Na figura 6.6, é mostrado o gráfico comparativo dos custos de cada gerador do primeiro estudo de caso. Aqui, pode-se observar que geradores (8 e 9) estão gerando o custo mais alto.

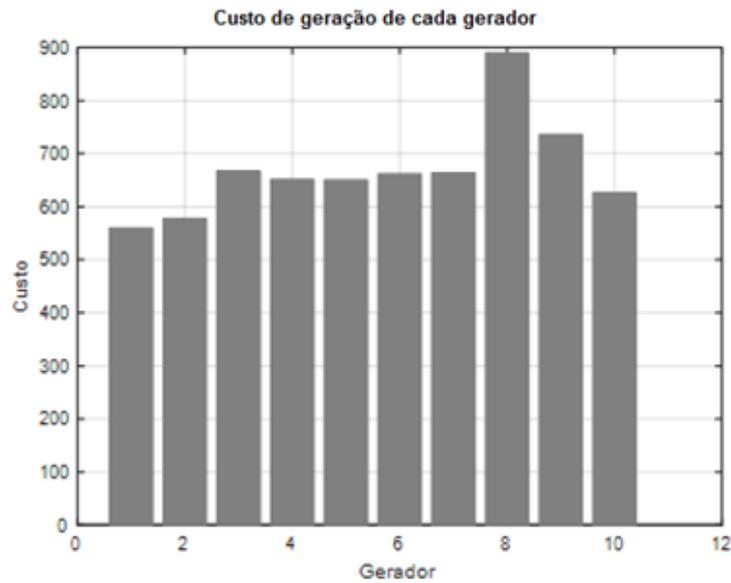


Figura 6.6: Custos de geração de cada gerador do primeiro estudo de caso.  
Fonte: Autora, (2016).

Na figura 6.7, é apresentado o gráfico comparativo dos custos de geração de cada gerador para o sistema de teste 118-barras do IEEE, onde se observa uma grande dispersão entre os custos do gerador.

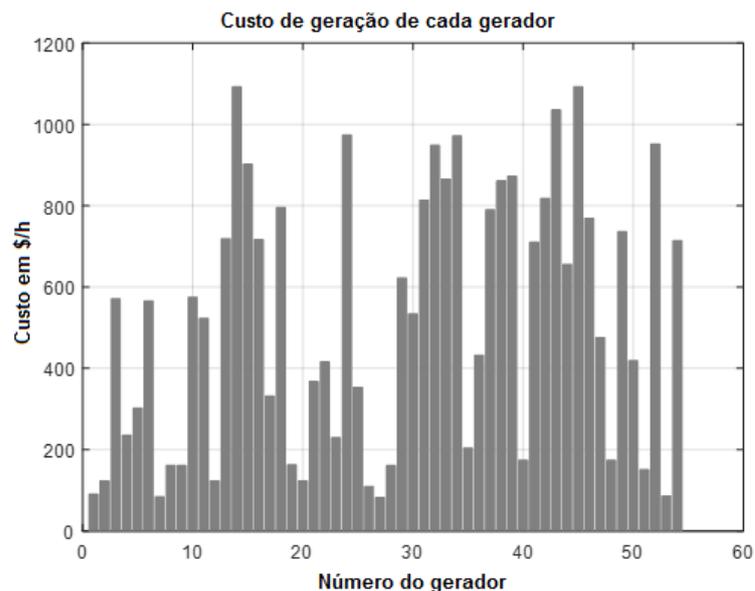


Figura 6.7: Custo de geração de cada gerador para o sistema de teste 118-barras do IEEE.  
Fonte: Autora, (2016).

Na figura 6.8, mostra-se o gráfico comparativo do Índice de Emissão de cada gerador de primeiro estudo de caso, observa-se que os geradores (8 e 9) estão gerando os Índices de Emissão mais altos.

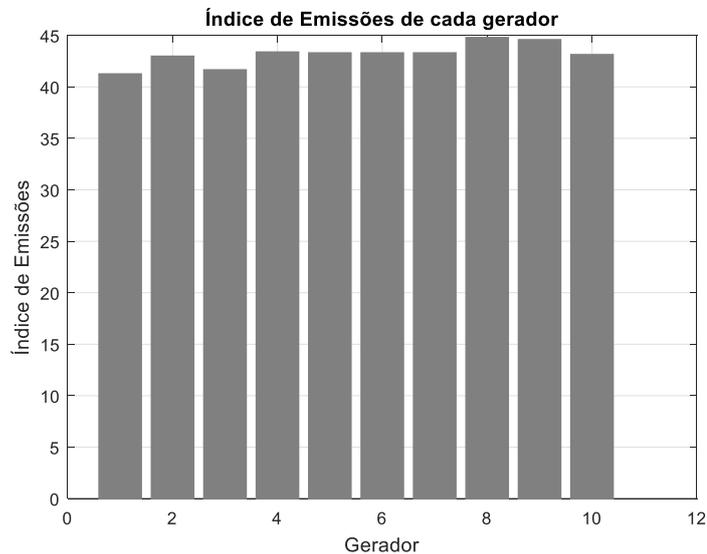


Figura 6.8: Índices de Emissões dos Geradores.  
Fonte: Autora, (2016).

Na figura 6.9, é mostrado o gráfico comparativo do Índice de Emissão de cada gerador para o sistema de teste 118-barras do IEEE onde pode ser observada a diferença entre o Índice de Emissão de cada gerador de acordo com sua respectiva potência. Há cinco geradores que têm um Índice de Emissão mais alto do que os outros.

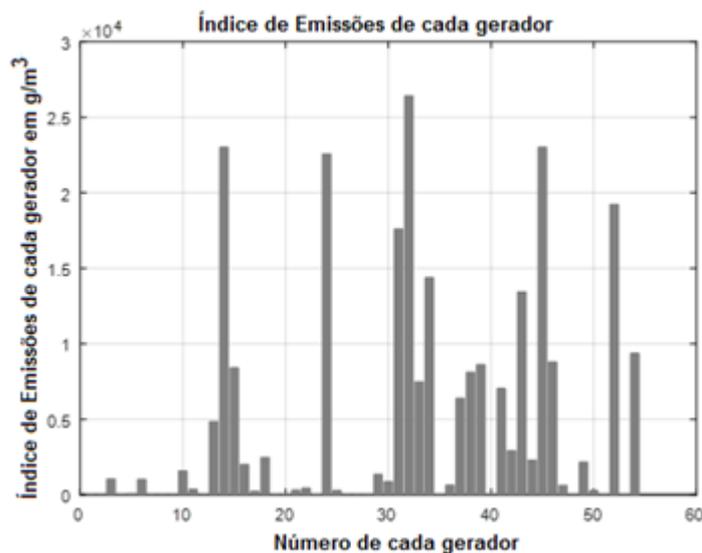


Figura 6.9: Índices de Emissão dos Geradores para o sistema de teste 118-barras do IEEE.  
Fonte: Autora, (2016).

O procedimento desenvolvido foi aplicado satisfatoriamente a dois casos, em uma UTE em Manaus e ao sistema de teste de 118-barras do IEEE. Foram utilizados estes dois casos para validar esta abordagem.

No caso da UTE os Índices de Emissão não são tão diferentes como no caso do sistema de teste de 118 barras, é notório que neste sistema a potência dos geradores é muito diferente. Em ambos os casos, a potência atribuída a cada gerador corresponde aos valores que garantem o custo mínimo de geração da usina, ao mesmo tempo, é garantido o Índice de emissão mínimo.

## CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

O problema de otimização do DEA em sistemas elétricos de distribuição foi formulado como um problema multiobjetivo, que considera os benefícios econômicos na operação das redes elétricas e a redução da poluição ambiental pela inserção do cálculo do Índice de Emissões no sistema, frente à minimização da função índice de emissões. Além disso, a formulação apresentada considera as restrições relevantes impostas pelas normas brasileiras vigentes em relação às especificações elétricas e ambientais.

A partir dos resultados obtidos nesta tese, cujo modelo e método matemático para o DEA utilizando ferramentas de Algoritmos Evolutivos NSGA-II reduzem o custo da produção de energia de usinas térmicas e diminui o impacto ambiental. O uso do NSGA-II permite a ferramenta computacional estabelecer a solução para esta formulação, a qual determinou as soluções ótimas de Pareto para o problema e permite ao profissional determinar as soluções mais eficazes.

De acordo com a análise do antigo problema do DEA no que tange a metodologia utilizada neste trabalho frente nova abordagem matemática para avaliar as emissões dos geradores e, ao mesmo tempo, reduzir o custo do combustível, tem-se uma nova possibilidade da identificação das diferentes formas de avaliar as emissões produzidas pelas usinas geradoras de energia, no que se refere aos modelos matemáticos com implementação de ferramentas computacionais para avaliar as variáveis econômicas e ambientais, considerando a permissibilidade de cada poluente na atmosfera.

O procedimento matemático desenvolvido foi aplicado ao estudo de caso de uma usina geradora de energia elétrica na cidade de Manaus, Amazonas, e também ao sistema de teste 118-barras do IIEEE. Os resultados relevantes desta tese, a partir dos exemplos e análises práticas mostram as vantagens e validam todo procedimento desenvolvido.

Foi visto, a partir do estudo de caso, que o valor do índice de emissões varia para os diferentes motores da planta. Os seus valores variam de 54 a 102 g/m<sup>3</sup> para potência máxima.

O Índice de Emissão de motores a gás no estudo de caso da usina é bastante diferente entre todos os motores da planta. Além disso, os motores a gás emitiam partículas em suspensão, algo que, de acordo com a literatura, não é admissível, esta situação mencionada é devido às condições técnicas dos motores a gás, muitos queimam óleo misturado com gás e, portanto, apresentam partículas do óleo nos gases de escape.

No caso dos motores a HFO, a diferença do índice de emissão entre diferentes motores não é tão significativa como no caso dos motores a gás. Pode-se observar-se que, em geral, os motores a HFO têm um índice de emissão específico inferior ao dos motores a gás, isto é, os motores a HFO emitem menos poluentes em relação à potência que fornecem. Para os 54 motores do sistema de teste de 118-barras do IEEE apresentaram uma discrepância nos resultados com relação aos índices de emissões em relação às características dos seus respectivos motores quanto à potência fornecida.

Foi apresentada uma extensa revisão bibliográfica do DEA, dentre as quais inúmeras técnicas resolvem o problema na redução de emissões devido à geração de energia elétrica. Entretanto, de todas as técnicas para esta finalidade, foi pesquisada uma solução que exige menos investimento para executar, que é DE com emissões mínimas, procedimento usado nesta tese.

Foi desenvolvida uma nova metodologia para avaliar a poluição ambiental causada por uma usina geradora de energia elétrica. Este método, ao contrário de todos os outros na literatura, não atribui um valor de custo às emissões, mas usa um índice geral que considera não somente o custo, mas os impactos ao meio ambiente provocados pela produção de energia elétrica. Para fazer comparações entre diferentes motores e combustíveis foi desenvolvido o conceito de Índice de Emissão Específico que é simplesmente o Índice de Emissões dividido pela potência gerada por cada motor.

Os resultados do estudo, considerando o Índice de Emissões e utilizando o procedimento de otimização do algoritmo de classificação não dominada II (NSGA-II), foram significativos, podendo ser aplicado a qualquer termelétrica, possibilitando aplicação do uso desta nova abordagem, a fim de auxiliar profissionais do ramo para redução da energia elétrica e respectivo planejamento aos custos envolvidos de geração.

## **7.2 Recomendações**

De acordo com os resultados obtidos nesta tese, podem-se considerar os seguintes passos futuros:

- 1) Comparar os resultados obtidos para o modelo matemático apresentado ao uso de outras meta-heurísticas de otimização tais como: Recozimento Simulado, Enxame de Partículas, Colônia de Abelhas, Lobo Cinzento, etc.

- 2) Comparar os resultados obtidos usando o Índice de Emissões e os procedimentos tradicionais para avaliar as emissões.
- 3) Analisar os resultados obtidos para o modelo matemático apresentado, desligando os motores menos eficientes.
- 4) Investigar modelos do Despacho Econômico e Ambiental para determinar mais precisamente os efeitos e impactos para a o meio ambiente e à saúde humana.
- 5) Implementar o NSGA-III, usando como funções objetivos o custo, a quantidade de emissões, e o índice de emissões.

## REFERÊNCIAS

- A. IMMANUEL SELVA KUMAR, K. D., J. JAYA KUMAR, C. KUMAR CHARLIE PAUL. **Particle swarm optimization solution to emission and economic dispatch problem**, . In: IEEE, IEEE Conference Tencon, 2003. p.paper ID-075.
- A. VOURECH; M. JIMENEZ. **Enhancing Environmentally Sustainable Growth in Finland**. OECD Economics Department Working Papers, No. 229, 2000. OECD ECONOMICS DEPARTMENT WORKING PAPERS, N., 2000. Fdinland: OECD Economics Department Working Papers 2000.
- ABAS, N. et al. **Review of GHG emissions in Pakistan compared to SAARC countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 990-1016, 12// 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117305257> >.
- ABDELAZIZ, A. Y.; ALI, E. S.; ABD ELAZIM, S. M. **Combined economic and emission dispatch solution using Flower Pollination Algorithm**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 80, p. 264-274, 9// 2016a. ISSN 0142-0615. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515005244> >.
- \_\_\_\_\_. **Flower pollination algorithm to solve combined economic and emission dispatch problems**. Engineering Science and Technology, an International Journal, v. 19, n. 2, p. 980-990, 6// 2016b. ISSN 2215-0986. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509861500169X> >.
- ABDILAH, A. M.; MUSTAFA, M. W. **Carbon capture power plants: DEcoupled emission and generation outputs for economic dispatch**. International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 63, p. 12-19, 8// 2017. ISSN 1750-5836. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175058361730035X> >.
- ALBRIGHT, L. **Albright's chemical engineering handbook**. CRC Press, 2008. ISBN 1420014382.
- ALGUACIL, N.; CONEJO, A. **Multiperiod optimal power flow using Benders DEomposition**. IEEE Transactions on power systems, v. 15, n. 1, p. 196-201, 2000. ISSN 0885-8950.
- ALVES, L. A.; UTURBEY, W. **Environmental degradation costs in electricity generation: The case of the Brazilian electrical matrix**. **Energy Policy** v. 38, p. 6204–6214., 2010.
- ARAGÓN, V. S.; ESQUIVEL, S. C.; COELLO, C. C. **An immune algorithm with power redistribution for solving economic dispatch problems**. Information Sciences, v. 295, p. 609-632, 2015. ISSN 0020-0255.

ARÉVALO, P. R. **Optimización del diseño y rediseño de procesos químicos complejos bajo incertidumbre mediante cooperación de técnicas de programación matemática y metaheurísticas.** 2005. Universidad Politécnica de Madrid

ARRIAGADA, E. et al. **A probabilistic, emission and economic dispatch model considering renewable energy, demand and generator uncertainties: A real application.** Automatica (ICA-ACCA), IEEE International Conference on, 2016, IEEE. p.1-9.

ARUL, R.; RAVI, G.; VELUSAMI, S. **Chaotic self-adaptive differential harmony search algorithm based dynamic economic dispatch.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 50, p. 85-96, 2013. ISSN 0142-0615.

ARUL, R.; VELUSAMI, S.; RAVI, G. **A new algorithm for combined dynamic economic emission dispatch with security constraints.** Energy, v. 79, p. 496-511, 2015. ISSN 0360-5442.

AVERSANO, N.; TEMPERINI, T. **El Calentamiento Global: Bonos de Carbono, una alternativa. Modelización y Simulación de Sistemas Económicos.** [http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/bonos\\_de\\_carbono](http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/bonos_de_carbono), 2006.

AYDIN, D. et al. **Artificial bee colony algorithm with dynamic population size to combined economic and emission dispatch problem.** International journal of electrical power & energy systems, v. 54, p. 144-153, 2014. ISSN 0142-0615.

BARD, J. F. **Short-term scheduling of thermal-electric generators using Lagrangian relaxation.** Operations Res., v. 36 n. 5, p. 756–766, 1988.

BARISAL, A.; PRUSTY, R. **Large scale economic dispatch of power systems using oppositional invasive weed optimization.** Applied Soft Computing, v. 29, p. 122-137, 2015. ISSN 1568-4946.

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.

BASU, M. **Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 30, n. 2, p. 140-149, 2008. ISSN 0142-0615.

BASU, M. **Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution.** Applied Soft Computing, v. 11, n. 2, p. 2845-2853, 3// 2011. ISSN 1568-4946. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494610002917> >.

\_\_\_\_\_. **Fuel constrained economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II.** Energy, v. 78, n. 0, p. 649-664, 12/15/ 2014. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421401202X> >.

BASU, M. **Fuel constrained economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II.** Energy, v. 78, p. 649-664, 2014a. ISSN 0360-5442.

\_\_\_\_\_. **Teaching-learning-based optimization algorithm for multi-area economic dispatch.** Energy, v. 68, p. 21-28, 2014b. ISSN 0360-5442.

BASU, M.; CHOWDHURY, A. **Cuckoo search algorithm for economic dispatch.** Energy, v. 60, p. 99-108, 2013. ISSN 0360-5442.

BENASLA, L.; BELMADANI, A.; RAHLI, M. **Spiral optimization algorithm for solving combined economic and emission dispatch.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 62, p. 163-174, 2014. ISSN 0142-0615.

BENHAMIDA, F. et al. Solving dynamic economic load dispatch with ramp rate limit using quadratic programming. North American Power Symposium (NAPS), 2013, 2013, 22-24 Sept. 2013. p.1-5.

BENIDRIS, M.; ELSAIAH, S.; MITRA, J. **An emission-constrained approach to power system expansion planning.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 81, p. 78-86, 10// 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516000739>>.

BHATTACHARJEE, K.; BHATTACHARYA, A.; NEE DEY, S. H. **Oppositional real coded chemical reaction optimization for different economic dispatch problems.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 55, p. 378-391, 2014a. ISSN 0142-0615.

\_\_\_\_\_. **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, 2014b. ISSN 0142-0615.

BILIL, H.; ANIBA, G.; MAAROUFI, M. **Probabilistic economic/environmental power dispatch of power system integrating renewable energy sources.** Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 8, p. 181-190, 2014. ISSN 2213-1388.

BROWN, K. E. **The Benefits of Internalizing Air Quality and Greenhouse Gas Externalities in the US Energy System.** 2016. University of Colorado at Boulder.

**BROWNLEE. JASON. Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes.** Ed.Lulu. ISBN: 9781446785065. 2011.

C. PALANICHAMY, N. S. B. **Day-night weather-based economic power dispatch.** IEEE Trans. Power Syst. 17 (no. 2) (May 2002), v. 17, n. 2, p. 469-475, 2002.

CARRETERO, J. C. O.; CÁNOVAS, D. G.; PEREIRA, F. D. Q. **Técnicas Heurísticas para Problemas de Diseño en Telecomunicaciones.** 2008.

CARVAJAL, T. L. R.; PEREZ, C. Q.; GUEDES, A. E. D. **Efficient Energy Management System or the technologies of carbon storage and sequestration as aviable alternative to**

**reduce CO<sub>2</sub> emissions in the short term.** Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (JETIA). Vol.01, No 01, pp.48-54. Março, 2015.

CATALAO, J. P. S. et al. **Profit-Based Unit Commitment with Emission Limitations: A Multiobjective Approach.** Power Tech, p. pp. 1417 - 1 422., 2007.

CHAIB, A. E. et al. **Optimal power flow with emission and non-smooth cost functions using backtracking search optimization algorithm.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 81, p. 64-77, 10// 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516000788> >.

CHANG, C.; WONG, K.; FAN, B. **Security-constrained multiobjective generation dispatch using bicriterion global optimisation.** Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, 1995, IET. p.406-414.

CHATURVEDI, S. **Right to pollute? An understanding on the implications of international carbon trading market.** 2014.

CHEONG, H.; DILLON, T. **Application of multiobjective optimization methods to the problem of generation expansion planning.** Proceedings Sixth Power System Computation Conference (PSCC-6), Damstadt, West Germany, 1978. p.3-11.

CLEARY, B. et al. **Estimating the electricity prices, generation costs and CO<sub>2</sub> emissions of large scale wind energy exports from Ireland to Great Britain.** Energy Policy, v. 91, p. 38-48, 4// 2016. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515302482> >.

COELLO, C. A. C. **A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques.** Knowledge and Information systems, v. 1, n. 3, p. 269-308, 1999. ISSN 0219-1377.

CONAMA. **Padroes de Qualidade do ar. Portal Saúde, Brasília, 1990.** Disponível em: < [http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/conama\\_03\\_90\\_padroes\\_de\\_qualidade\\_do\\_ar.pdf](http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/conama_03_90_padroes_de_qualidade_do_ar.pdf) >. Acesso em: 01/01/2017.

CONAMA, Resolução N<sup>o</sup> 357, de 17 de Março de 2006. **Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**, v. 357, 2006.

CURTIS, J.; LYNCH, M. Á.; ZUBIATE, L. **Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from electricity: The influence of the North Atlantic Oscillation.** Applied Energy, v. 161, p. 487-496, 1/1/ 2016. ISSN 0306-2619. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915011617> >.

DARYANI, N.; ZARE, K. **Multiobjective power and emission dispatch using modified group search optimization method.** Ain Shams Engineering Journal, 2015. ISSN 2090-4479. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447916300016> >.

DEB, K., S. AGRAWAL, A. PRATAP, E T. MEYARIVAN, “**A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA- II**”, Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature VI, Springer, 849- 858, 2000.

DELARUE, E.; VAN DEN BERGH, K. **Carbon mitigation in the electric power sector under cap-and-trade and renewables policies**. Energy Policy, v. 92, p. 34-44, 5// 2016. ISSN 0301-4215. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516300295> >.

DENNIS, K.; COLBURN, K.; LAZAR, J. **Environmentally beneficial electrification: The dawn of ‘emissions efficiency’**. The Electricity Journal, v. 29, n. 6, p. 52-58, 7// 2016. ISSN 1040-6190. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619016301075> >.

DEVENDRA BISEN , H. M. D., MANJAREE PANDIT, B. K. PANIGRAHI. **Solution of Large Scale Economic Load Dispatch Problem using Quadratic Programming and GAMS: A Comparative Analysis**. Journal of Information and Computing Science, v. Vol. 7, No. 3, p. 200-211, 2012.

DHAMANDA ASHISH et al. **A Traditional Approach to Solve Economic Load Dispatch Problem of Thermal Generating Unit Using MATLAB Programming**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. Vol. 2, n. 9, 2013. ISSN 2278-0181.

DHANRAJ, R. M. S.; GAJENDRAN, F. **Quadratic programming solution to Emission and Economic Dispatch Problem**. Journal of the Institution of engineers (India), pt EL, Vol. 86 pp.129-132, 2005.

DHILLON, J.; JAIN, S. K. **Multi-Objective Generation and Emission Dispatch Using NSGA-II**. IACSIT International Journal of Engineering and Technology., v. 3, No. 5, 2011.

DI, Y. et al. **Multi-objective optimization for economic emission dispatch using an improved multi-objective binary differential evolution algorithm**. Energy Procedia, v. 61, p. 2016-2021, 2014. ISSN 1876-6102.

DIKE, D. O.; ADINFONO, M. I.; OGU, G. **Economic Dispatch of Generated Power Using Modified Lambda Iteration Method**. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), v. 7, n. 1 (Jul. - Aug. 2013), p. PP 49-54, 2013.

DOS SANTOS COELHO, L.; DE ANDRADE BERNERT, D. L.; MARIANI, V. C. **Chaotic differential harmony search algorithm applied to power economic dispatch of generators with multiple fuel options**. Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on, 2010, IEEE. p.1-5.

DOS SANTOS COELHO, L.; MARIANI, V. C. **An improved harmony search algorithm for power economic load dispatch**. Energy Conversion and Management, v. 50, n. 10, p. 2522-2526, 2009. ISSN 0196-8904.

DUMAN, S.; YORUKEREN, N.; ALTAS, I. H. **A novel modified hybrid PSO-GSA based on fuzzy logic for non-convex economic dispatch problem with valve-point effect.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 64, p. 121-135, 2015. ISSN 0142-0615.

DURAI, S.; SUBRAMANIAN, S.; GANESAN, S. **Improved parameters for economic dispatch problems by teaching learning optimization.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 67, p. 11-24, 2015. ISSN 0142-0615.

EL-KEIB, A.; MA, H.; HART, J. **Economic dispatch in view of the clean air act of 1990.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 9, n. 2, p. 972-978, 1994. ISSN 0885-8950.

EL-SOBKY, B.; ABO-ELNAGA, Y. **Multi-objective economic emission load dispatch problem with trust-region strategy.** Electric Power Systems Research, v. 108, p. 254-259, 2014. ISSN 0378-7796.

ELATTAR, E. E. **A hybrid genetic algorithm and bacterial foraging approach for dynamic economic dispatch problem.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 69, p. 18-26, 2015. ISSN 0142-0615.

ENGLISH, J. et al. **Impact of electrical intertie capacity on carbon policy effectiveness.** Energy Policy, v. 101, p. 571-581, 2017. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516305559> >.

EUROPEAN COMMISSION. **"EU Emissions Trading. Brussels"**. "EU Emissions Trading. Brussels". COMMISSION, E. Brussels", Belgium: EUROPEAN COMMISSION 2005.

FARAG, A.; AL-BAIYAT, S.; CHENG, T. **Economic load dispatch multiobjective optimization procedures using linear programming techniques.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 10, n. 2, p. 731-738, 1995. ISSN 0885-8950.

FERNÁNDEZ, B. A. D.; DOWSLAND, K. **Diseño de heurísticas y fundamentos del recocido simulado. Inteligencia artificial:** Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, v. 7, n. 19, p. 93-102, 2003. ISSN 1137-3601.

FINENKO, A.; CHEAH, L. **Temporal CO<sub>2</sub> emissions associated with electricity generation:** Case study of Singapore. Energy Policy, v. 93, p. 70-79, 2016. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516300799> >.

FLOUDAS, C. A. **Deterministic global optimization: theory, methods and applications.** Springer Science & Business Media, 2013. ISBN 147574949X.

FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. **Optimal power flow: a bibliographic survey I.** Energy Systems, v. 3, n. 3, p. 221-258, 2012. ISSN 1868-3967.

GAING, Z.-L. **Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 18, n. 3, p. 1187-1195, 2003. ISSN 0885-8950.

GARVER, L. L. **Power generation scheduling by integer programming—development of theory.** IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS v. 82, n. 3, p. 730-735, 1963.

GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. **Handbook of metaheuristics.** Springer, 2010.

GHASEMI, A. **A fuzzified multi objective interactive honey bee mating optimization for environmental/economic power dispatch with valve point effect.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 49, p. 308-321, 2013. ISSN 0142-0615.

GHASEMI, M. et al. **A new hybrid algorithm for optimal reactive power dispatch problem with discrete and continuous control variables.** Applied soft computing, v. 22, p. 126-140, 2014. ISSN 1568-4946.

GHASEMI, M. et al. **Application of imperialist competitive algorithm with its modified techniques for multi-objective optimal power flow problem: a comparative study.** Information Sciences, v. 281, p. 225-247, 2014. ISSN 0020-0255.

GHASEMI, M. et al. **Solving optimal reactive power dispatch problem using a novel teaching–learning-based optimization algorithm.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 39, p. 100-108, 2015. ISSN 0952-1976.

GHERBI, Y. A.; BOUZEBODJA, H.; GHERBI, F. Z. **The combined economic environmental dispatch using new hybrid metaheuristic.** Energy, v. 115, Part 1, p. 468-477, 11/15/ 2016. ISSN 0360-5442. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216311926>>.

GOPALAKRISHNAN, H.; KOSANOVIC, D. **Operational planning of combined heat and power plants through genetic algorithms for mixed 0–1 nonlinear programming.** Computers & Operations Research, v. 56, p. 51-67, 2015. ISSN 0305-0548.

GRANDE-ACOSTA, G.; ISLAS-SAMPERIO, J. **Towards a low-carbon electric power system in Mexico.** Energy for Sustainable Development, v. 37, p. 99-109, 2017. ISSN 0973-0826.

GRANELLI, G. et al. **Emission constrained dynamic dispatch.** Electric Power Systems Research, v. 24, n. 1, p. 55-64, 1992. ISSN 0378-7796.

GREEN, D. W. **Perry's chemical engineering handbook.** McGrawHill Professional Publ, 2007.

H.Y. YAMIN; Q. EI-DWAIRI; SHAHIDEHPOUR, S. M. **A new approach for GenCos profit based unit commitment in day-ahead competitive electricity markets considering reserve uncertainty.** Electrical Power and Energy Systems, v. 29, p. pp. 609-616, 2007.

HAGHRAH, A.; NAZARI-HERIS, M.; MOHAMMADI-IVATLOO, B. **Solving combined heat and power economic dispatch problem using real coded genetic algorithm with improved Mühlenbein mutation.** Applied Thermal Engineering, v. 99, p. 465-475, 4/25/

2016. ISSN 1359-4311. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116000272>>.

HAMEDI, H. **Solving the combined economic load and emission dispatch problems using new heuristic algorithm.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 46, p. 10-16, 2013. ISSN 0142-0615.

HASSLER, B. et al. **The application of long-term observations of NO<sub>x</sub> and CO to constrain a global emissions inventory.** IGAC 2016 Science Conference (International Global Atmospheric Chemistry), 2016.

HENNEMAN, L. R. F. et al. **Assessing emissions levels and costs associated with climate and air pollution policies in South Africa.** Energy Policy, v. 89, p. 160-170, 2// 2016. ISSN 0301-4215. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515302044>>.

HESLIN, J. S.; HOBBS, B. F. **A multiobjective production costing model for analyzing emissions dispatching and fuel switching [of power stations].** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 4, n. 3, p. 836-842, 1989. ISSN 0885-8950.

HOLLADAY, J. S.; LARIVIERE, J. **The impact of cheap natural gas on marginal emissions from electricity generation and implications for energy policy.** Journal of Environmental Economics and Management, v. 85, p. 205-227, 9// 2017. ISSN 0095-0696. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069617303893> >.

HONG, B.; SLATICK, E. **Carbon dioxide emission factors for coal.** Quarterly Coal Report, v. 7, 1994.

HOWARD, B.; WAITE, M.; MODI, V. **Current and near-term GHG emissions factors from electricity production for New York State and New York City.** Applied Energy, v. 187, p. 255-271, 2/1/ 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916316464>>.

HSIAO, Y.-T. et al. **A computer package for optimal multi-objective VAR planning in large scale power systems.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 9, n. 2, p. 668-676, 1994. ISSN 0885-8950.

I. KOCKAR; A. CONEJO; MCDONALD, R. **Influence of the Emissions Trading Scheme on generation scheduling.** Electrical Power and Energy Systems, v. vol. 3 1, p. pp. 465-473, 2009.

JANA, D.; MANDAL, K. K. **A New Optimal Solution to Environmentally Constrained Economic Dispatch Using Modified Real Coded Genetic Algorithm.** Proceedings of the International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications (FICTA), 2013, Springer. p.329-337.

JEBARAJ, L. et al. **Application of differential evolution algorithm in static and dynamic economic or emission dispatch problem: A review.** Renewable and Sustainable Energy

Reviews, v. 77, p. 1206-1220, 9// 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304331> >.

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. ISSN 0196-8904.

JIANG, S. et al. **Committed CO2 emissions of China's coal-fired power generators from 1993 to 2013.** Energy Policy, v. 104, p. 295-302, 5// 2017. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517300769> >.

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. ISSN 0142-0615.

JIANG, X. et al. **Dynamic environmental economic dispatch using multiobjective differential evolution algorithm with expanded double selection and adaptive random restart.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 49, p. 399-407, 2013. ISSN 0142-0615.

JIN, X. et al. **Dynamic economic dispatch of a hybrid energy microgrid considering building based virtual energy storage system.** Applied Energy, v. 194, p. 386-398, 5/15/ 2017. ISSN 0306-2619. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916310212> >.

JUBRIL, A. et al. **Economic-emission dispatch problem: A semi-definite programming approach.** Applied Energy, v. 134, p. 446-455, 2014. ISSN 0306-2619.

JUBRIL, A. M. et al. **Economic-emission dispatch problem: A semi-definite programming approach.** Applied Energy, v. 134, p. 446-455, 2014.

KARABOGA, D. **An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization.** (TECHNICAL REPORT-TR06) Erciyes University, Engineering Faculty Computer Engineering Department Kayseri/Türkiye, 2005.

KASMAEI, M. P. **Despacho ótimo de potências ativa e reativa de sistema elétricos multi-áreas considerando restrições físicas, econômicas e ambientais:** Environmentally constrained active-reactive optimal power flow-a compromising strategy for economic-emission dispatch and a multi-area paradigm. 2015.

KERMANSHAHI, B. S. et al. **Environmental marginal cost evaluation by non-inferiority surface [power systems].** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 5, n. 4, p. 1151-1159, 1990. ISSN 0885-8950.

KHADANGA, R. K.; SATAPATHY, J. K. **Time delay approach for PSS and SSSC based coordinated controller design using hybrid PSO-GSA algorithm.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 71, p. 262-273, 2015. ISSN 0142-0615.

KHAN, N. A. et al. **Combined emission economic dispatch of power system including solar photo voltaic generation.** Energy Conversion and Management, v. 92, p. 82-91, 2015. ISSN 0196-8904.

KHERFANE, R. et al. **Solving economic dispatch problem using hybrid GA-MGA.** Energy Procedia, v. 50, p. 937-944, 2014. ISSN 1876-6102.

KHESHTI, M. et al. **An effective Lightning Flash Algorithm solution to large scale non-convex economic dispatch with valve-point and multiple fuel options on generation units.** Energy, v. 129, p. 1-15, 6/15/ 2017. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217306473> >.

KIM, S. H. **Evaluation of negative environmental impacts of electricity generation: Neoclassical and institutional approaches.** Energy Policy, v. 35, p. 413–423., 2007.

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. ISSN 0885-8950.

KÖK, A. G.; SHANG, K.; YÜCEL, Ş. **Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions.** Management Science, 2016. ISSN 0025-1909.

KOPSAKANGAS-SAVOLAINEN, M. et al. **Hourly-based greenhouse gas emissions of electricity – cases demonstrating possibilities for households and companies to DEcrease their emissions.** Journal of Cleaner Production, v. 153, p. 384-396, 6/1/ 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261501656X> >.

LAU, E. T. et al. **Optimisation of costs and carbon savings in relation to the economic dispatch problem as associated with power system operation.** Electric Power Systems Research, v. 140, p. 173-183, 11// 2016. ISSN 0378-7796. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616302334> >.

LEKSHMI, M.; EEE, A.; NAGARAJ, M. **Development of an Online Static Power System Security Assessment Module Using Artificial Neural Networks in 118-Bus Test System.** Development, v. 2, n. 6, 2014.

LI, Y. et al. **An improved multiobjective estimation of distribution algorithm for environmental economic dispatch of hydrothermal power systems.** Applied Soft Computing, v. 28, p. 559-568, 2015. ISSN 1568-4946.

LI, Y.; LI, M.; WU, Q. **Energy saving dispatch with complex constraints: Prohibited zones, valve point effect and carbon tax.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 63, p. 657-666, 2014. ISSN 0142-0615.

LIANG, Y.-C.; JUAREZ, J. R. C. **A normalization method for solving the combined economic and emission dispatch problem with meta-heuristic algorithms.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 54, p. 163-186, 2014. ISSN 0142-0615.

LIU, T. et al. **Cultural quantum-behaved particle swarm optimization for environmental/economic dispatch.** Applied Soft Computing, v. 48, p. 597-611, 11// 2016. ISSN 1568-4946. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494616301697> >.

LIU, X.; LIN, B.; ZHANG, Y. **Sulfur dioxide emission reduction of power plants in China: current policies and implications.** Journal of Cleaner Production, v. 113, p. 133-143, 2/1/ 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615018703> >.

LOBOS, G. et al. **El Mercado de los Bonos de Carbono (“bonos verdes”): Una Revisión.** RIAT, v. 1, n. 1, 2005.

LU, P. et al. **Chaotic differential bee colony optimization algorithm for dynamic economic dispatch problem with valve-point effects.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 62, p. 130-143, 2014. ISSN 0142-0615.

LU, Z. et al. **Robust economic/emission dispatch considering wind power uncertainties and flexible operation of carbon capture and storage.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 63, p. 285-292, 2014. ISSN 0142-0615.

LUJANO-ROJAS, J. M.; OSÓRIO, G. J.; CATALÃO, J. P. S. **New probabilistic method for solving economic dispatch and unit commitment problems incorporating uncertainty due to renewable energy integration.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 78, p. 61-71, 6// 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515004950> >.

LUJANO-ROJAS, J. M. et al. **A heuristic methodology to economic dispatch problem incorporating renewable power forecasting error and system reliability.** Renewable Energy, v. 87, Part 1, p. 731-743, 3// 2016. ISSN 0960-1481. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115304316> >.

MA, H. et al. **Multi-objective biogeography-based optimization for dynamic economic emission load dispatch considering plug-in electric vehicles charging.** Energy, v. 135, p. 101-111, 9/15/ 2017. ISSN 0360-5442. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421731099X> >.

MA, X.; WANG, Y.; WANG, C. **Low-carbon development of China's thermal power industry based on an international comparison: Review, analysis and forecast.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 80, p. 942-970, 12// 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117307487> >.

MA, Z. et al. **The application of a generator coherency identification method based on linearization in complex power system.** Electricity Distribution (CICED), 2016 China International Conference on, 2016, IEEE. p.1-5.

MAGESHVARAN, R.; JAYABARATHI, T. **GSO based optimization of steady state load shedding in power systems to mitigate blackout during generation contingencies.** Ain Shams Engineering Journal, v. 6, n. 1, p. 145-160, 2015. ISSN 2090-4479.

MAHDI, F. P. et al. **A holistic review on optimization strategies for combined economic emission dispatch problem.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117310523>>.

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. ISSN 0142-0615.

MANDAL, K. et al. **Non-convex emission constrained economic dispatch using a new self-adaptive particle swarm optimization technique.** *Applied Soft Computing*, v. 28, p. 188-195, 2015. ISSN 1568-4946.

MASON, K.; DUGGAN, J.; HOWLEY, E. **Multi-objective dynamic economic emission dispatch using particle swarm optimisation variants.** *Neurocomputing*, 2017. ISSN 0925-2312. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231217310767>>.

MOAREFDOOST, M. M.; LAMADRID, A. J.; ZULUAGA, L. F. **A robust model for the ramp-constrained economic dispatch problem with uncertain renewable energy.** *Energy Economics*, v. 56, p. 310-325, 5// 2016. ISSN 0140-9883. Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988316000098>>.

MODIRI-DELSHAD, M.; RAHIM, N. A. **Solving non-convex economic dispatch problem via backtracking search algorithm.** *Energy*, v. 77, p. 372-381, 2014. ISSN 0360-5442.

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. ISSN 0142-0615.

MORSALI, R. et al. **A new multiobjective procedure for solving nonconvex environmental/economic power dispatch.** *Complexity*, v. 20, n. 2, p. 47-62, 2014. ISSN 1099-0526.

MORSHED, M. J.; ASGHARPOUR, A. **Hybrid imperialist competitive-sequential quadratic programming (HIC-SQP) algorithm for solving economic load dispatch with incorporating stochastic wind power: A comparative study on heuristic optimization techniques.** *Energy Conversion and Management*, v. 84, p. 30-40, 2014. ISSN 0196-8904.

MUELA, E.; SECUE, J. **Environmental economic dispatch with fuzzy and possibilistic entities.** *Revista Facultad de Ingeniería*, n. 59, p. 227-236, 2012. ISSN 2422-2844.

MUSLU, M. **Economic dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates.** *Electric Power System Research*, v. 71, n. 2, p. 153–158. , 2004.

MUSTAFA-MORAES, N. et al. **The emission index as a parameter for assessing the environmental pollution from thermal power plants.** Case study. Dyna, v. 83, n. 199, 2016. ISSN 0012-7353.

MUTHUSWAMY, R. et al. **Environmental and economic power dispatch of thermal generators using modified NSGA-II algorithm.** International Transactions on Electrical Energy Systems, v. Volume 25, n. Issue 8, p. 17, August 2015 2015.

NADERI, E. et al. **A comprehensive study of practical economic dispatch problems by a new hybrid evolutionary algorithm.** Applied Soft Computing, 2017. ISSN 1568-4946. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494617303848> >.

NANDA, J.; KOTHARI, D.; LINGAMURTHY, K. **Economic-emission load dispatch through goal programming techniques.** 1988.

NAZARI-HERIS, M.; MOHAMMADI-IVATLOO, B.; GHAREHPETIAN, G. B. **A comprehensive review of heuristic optimization algorithms for optimal combined heat and power dispatch from economic and environmental perspectives.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. ISSN 1364-0321. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309668> >.

NEVES, D.; SILVA, C. A. **Optimal electricity dispatch on isolated mini-grids using a demand response strategy for thermal storage backup with genetic algorithms.** Energy, v. 82, p. 436-445, 2015. ISSN 0360-5442.

NIKNAM, T. **A new fuzzy adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm for non-linear, non-smooth and non-convex economic dispatch problem.** Applied Energy, v. 87, n. 1, p. 327-339, 2010. ISSN 0306-2619.

NIKNAM, T.; AZIZIPANAH-ABARGHOOEE, R.; AGHAEI, J. **A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 28, n. 2, p. 749-763, 2013. ISSN 0885-8950.

NIU, Q. et al. **An efficient harmony search with new pitch adjustment for dynamic economic dispatch.** Energy, v. 65, p. 25-43, 2014. ISSN 0360-5442.

NIU, Q. et al. **A hybrid harmony search with arithmetic crossover operation for economic dispatch.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 62, p. 237-257, 2014. ISSN 0142-0615.

NOEL, L. et al. **Cost minimization of generation, storage, and new loads, comparing costs with and without externalities.** Applied Energy, v. 189, p. 110-121, 2017. ISSN 0306-2619.

NWULU, N. I.; XIA, X. **Multi-objective dynamic economic emission dispatch of electric power generation integrated with game theory based demand response programs.** Energy Conversion and Management, v. 89, n. 0, p. 963-974, 1/1/ 2015. ISSN 0196-8904. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414009510> >.

NWULU, N. I.; XIA, X. **Multi-objective dynamic economic emission dispatch of electric power generation integrated with game theory based demand response programs.** Energy Conversion and Management, v. 89, p. 963-974, 2015. ISSN 0196-8904.

OMMEN, T.; MARKUSSEN, W. B.; ELMGAARD, B. **Comparison of linear, mixed integer and non-linear programming methods in energy system dispatch modelling.** Energy, v. 74, p. 109-118, 2014. ISSN 0360-5442.

OSÓRIO, G. et al. **A probabilistic approach to solve the economic dispatch problem with intermittent renewable energy sources.** Energy, v. 82, p. 949-959, 2015. ISSN 0360-5442.

PANDIT, M.; SRIVASTAVA, L.; SHARMA, M. **Environmental economic dispatch in multi-area power system employing improved differential evolution with fuzzy selection.** Applied Soft Computing, v. 28, p. 498-510, 2015. ISSN 1568-4946.

PAVIĆ, I.; CAPUDER, T.; KUZLE, I. **Low carbon technologies as providers of operational flexibility in future power systems.** Applied Energy, v. 168, p. 724-738, 4/15/2016. ISSN 0306-2619. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916301118> >.

PEREIRA COSTA, DULCE HELENA. **Uma Abordagem Evolutiva Multiobjetivo para o Problema de Compensação de Energia Reactiva em Redes de Distribuição de Energia Eléctrica.** Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, 2011.

PROCTER, R. J. **Cutting carbon emissions from electricity generation.** The Electricity Journal, v. 30, n. 2, p. 41-46, 3// 2017. ISSN 1040-6190. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619017300118> >.

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.

QI, Z. et al. **The Power System Environmental Optimal Dispatch Containing Air Quality Forecast.** Energy Procedia, v. 105, p. 3623-3628, 5// 2017. ISSN 1876-6102. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217311736> >.

QU, B. Y. et al. **Economic emission dispatch problems with stochastic wind power using summation based multi-objective evolutionary algorithm.** Information Sciences, v. 351, p. 48-66, 7/10/ 2016. ISSN 0020-0255. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025516300172> >.

QU, B. Y. et al. **A survey on multi-objective evolutionary algorithms for the solution of the environmental/economic dispatch problems.** Swarm and Evolutionary Computation, 2017. ISSN 2210-6502. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650216301493> >.

RAGLEND, I. J. et al. **Comparison of AI techniques to solve combined economic emission dispatch problem with line flow constraints.** *Electrical Power and Energy Systems* v. 32, p. 592–598, 2010.

RAHUL DOGRA, N. G., HARSHA SAROA. **Economic Load Dispatch Problem and Matlab Programming of Different Methods.** *International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014)*, 2014.

RAJAN, A.; MALAKAR, T. **Optimal reactive power dispatch using hybrid Nelder–Mead simplex based firefly algorithm.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 66, p. 9-24, 2015. ISSN 0142-0615.

RAJAN, A.; MALAKAR, T. Optimum economic and emission dispatch using exchange market algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 82, p. 545-560, 11// 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516306597> >.

REBENNACK, S. et al. **Stochastic Hydro-Thermal Scheduling Under  $\{\rm CO\}_2$  Emissions Constraints.** *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 27, n. 1, p. 58-68, 2012. ISSN 0885-8950.

REVATHY, K.; NITHIYANANDHAM. “**Economic dispatch using particle swarm optimization,**”. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, Special Issue 59-66., 2014.

RHODES, J. D. et al. **A geographically resolved method to estimate levelized power plant costs with environmental externalities.** *Energy Policy*, v. 102, p. 491-499, 3// 2017. ISSN 0301-4215. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516306875> >.

RODRÍGUEZ-PIÑERO, P. T. **Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones.** Universidad Rey Juan Carlos, Servicio de Publicaciones, 2003. ISBN 8468818739.

RONG, A.; FIGUEIRA, J. R.; LAHDELMA, R. **An efficient algorithm for bi-objective combined heat and power production planning under the emission trading scheme.** *Energy Conversion and Management*, v. 88, p. 525-534, 2014. ISSN 0196-8904.

ROY, P.; ROY, P.; CHAKRABARTI, A. **Modified shuffled frog leaping algorithm with genetic algorithm crossover for solving economic load dispatch problem with valve-point effect.** *Applied Soft Computing*, v. 13, n. 11, p. 4244-4252, 2013. ISSN 1568-4946.

SAHOO, S. et al. **Comparative analysis of optimal load dispatch through evolutionary algorithms.** *Ain Shams Engineering Journal*, v. 6, n. 1, p. 107-120, 3// 2015. ISSN 2090-4479. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447914001166> >.

SALHI, S. **Handbook of Metaheuristics.** *Journal of the Operational Research Society*, v. 65, n. 2, p. 320-320, 2014.

SANTOS, M. R. B. D. **Métodos de pontos interiores/exteriores, de restrições canalizadas progressivas e de suavização arco tangente, em problemas de despacho econômico e ambiental.** 2016.

SASTRY, K.; GOLDBERG, D. E.; KENDALL, G. **Genetic algorithms.** In: (Ed.). **Search methodologies:** Springer, 2014. p.93-117.

SAYAH, S.; HAMOUDA, A.; BEKRAR, A. **Efficient hybrid optimization approach for emission constrained economic dispatch with nonsmooth cost curves.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 56, p. 127-139, 2014. ISSN 0142-0615.

SECUI, D. C. **A new modified artificial bee colony algorithm for the economic dispatch problem.** Energy Conversion and Management, v. 89, p. 43-62, 2015. ISSN 0196-8904.

SHARMA, P. K.; VERMA, C. P. **Carbon Credit Accounting.** Dear Academicians & Research Scholars, Journal of Management Value & Ethics consistently stepping up towards their target groups day by day. Our Journal published many research papers from across the world, some of them from USA, Thailand, Indonesia, Saudi Arabia and other counties. Some of the most renowned academic personalities from USA, Uzbekistan, 2013.

SHAYEGHI, H.; GHASEMI, A. **A modified artificial bee colony based on chaos theory for solving non-convex emission/economic dispatch.** Energy Conversion and Management, v. 79, p. 344-354, 2014. ISSN 0196-8904.

SHESHADRI, ARAVIND. **NSGA-II source code available in.** <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm/content/NSGA-II/>. Acesso em 23 de outubro de 2012.

SIKIRU, T. H. et al. **Transmission dispatch for loss minimisation using linearised power flow equations in mixed integer programming.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 62, p. 855-861, 2014. ISSN 0142-0615.

SINGH, R. P.; MUKHERJEE, V.; GHOSHAL, S. **Optimal reactive power dispatch by particle swarm optimization with an aging leader and challengers.** Applied Soft Computing, v. 29, p. 298-309, 2015. ISSN 1568-4946.

SIVARAJ, R.; RAVICHANDRAN, T. **A review of selection methods in genetic algorithm.** International journal of engineering science and technology, v. 1, n. 3, p. 3792-3797, 2011. ISSN 0975-5462.

SNYDER, W. L.; POWEL, H. D.; J.C. RAYBURN. **Dynamic programming approach to unit commitment.** IEEE Trans. Power Syst., v. 2, n. 2, p. 339-350, 1987.

TALAQ, J.; EL-HAWARY, F.; EL-HAWARY, M. **A summary of environmental/economic dispatch algorithms.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 9, n. 3, p. 1508-1516, 1994. ISSN 0885-8950.

THAO, N. T. P.; THANG, N. T. **Environmental economic load dispatch with quadratic fuel cost function using cuckoo search algorithm.** International Journal of u-and e-Service, Science and Technology, v. 7, n. 2, p. 199-210, 2014. ISSN 2005-4246.

TIAN, J.; WEI, H.; TAN, J. **Global optimization for power dispatch problems based on theory of moments.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 71, p. 184-194, 2015. ISSN 0142-0615.

TOACHE, V. L. et al. **Bonos de carbono: financierización del medioambiente en México** Carbon credits: Mexico's environment financialization. Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, v. 25, n. 47, p. 189-214, 2016. ISSN 2395-9169.

VERBRUGGEN, A. **Electric Power System Transition and the “Polluter Pays Principle”.** In: (Ed.). Towards 100% Renewable Energy: Springer, 2017. p.419-434.

VICTOR, D. G.; HOUSE, J. C.; JOY, S. **A Madisonian approach to climate policy.** Science, v. 309, n. 5742, p. 1820-1821, 2005. ISSN 0036-8075.

WANG, C.; VITTAL, V.; SUN, K. **OBDD-based sectionalizing strategies for parallel power system restoration.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, n. 3, p. 1426-1433, 2011. ISSN 0885-8950.

WANG, J. et al. **An improved partheno genetic algorithm for multi-objective economic dispatch in cascaded hydropower systems.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 67, p. 591-597, 2015. ISSN 0142-0615.

WANG, K.; WEI, Y.-M.; HUANG, Z. **Potential gains from carbon emissions trading in China: A DEA based estimation on abatement cost savings.** Omega, v. 63, p. 48-59, 2016. ISSN 0305-0483.

WANG, K. P.; YURYEVICH, J. **Evolutionary-programming-based algorithm for environmentally-constrained economic dispatch.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 13, n. 2, p. 301-306, 1998a. ISSN 0885-8950.

\_\_\_\_\_. **Evolutionary-programming-based algorithm for environmentally-constrained economic dispatch.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 13, n. 2, p. 301-306, 1998b. ISSN 0885-8950.

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. ISSN 0142-0615.

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. ISSN 0378-7796. 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](http://ac.els-cdn.com/S0378779606002859/1-s2.0-S0378779606002859-main.pdf?_tid=9dea0210-cce4-11e4-aa87-00000aacb35d&acdnat=1426624480_378a4297c0fd67420a157aa134874b02) >.

WANG XIN et al. **Short term environmental/economic generation scheduling based on chaos genetic hybrid optimization algorithm** In: CSEE, P. O., CSEE, 2006. p.128-133, Jun. 2006.

WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. **Power generation, operation, and control.** John Wiley & Sons, 2012. ISBN 111858595X.

XIAO, L. et al. **A combined model based on data pre-analysis and weight coefficients optimization for electrical load forecasting.** Energy, v. 82, p. 524-549, 2015. ISSN 0360-5442.

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.

YANG, X.-S.; HOSSEINI, S. S. S.; GANDOMI, A. H. **Firefly algorithm for solving non-convex economic dispatch problems with valve loading effect.** Applied Soft Computing, v. 12, n. 3, p. 1180-1186, 2012. ISSN 1568-4946.

YOKOYAMA, R. et al. **Multiobjective optimal generation dispatch based on probability security criteria.** Power Systems, IEEE Transactions on, v. 3, n. 1, p. 317-324, 1988. ISSN 0885-8950.

YUAN, X. et al. **An extended NSGA-III for solution multi-objective hydro-thermal-wind scheduling considering wind power cost.** Energy Conversion and Management, v. 96, p. 568-578, 2015. ISSN 0196-8904.

YUAN, X. E. A. **An extended nsga-iii for solution multi-objective hydro-thermal-wind scheduling considering wind power cost.** Energy Conversion and Management v. 96, n. , p. 568-578, 2015. ISSN ISSN 0196-8904. .

ZHANG, R. et al. **Economic environmental dispatch using an enhanced multi-objective cultural algorithm.** Electric Power Systems Research, v. 99, p. 18-29, 2013. ISSN 0378-7796.

ZHANG, Y.; GONG, D.-W.; DING, Z. **A bare-bones multi-objective particle swarm optimization algorithm for environmental/economic dispatch.** Information sciences, v. 192, p. 213-227, 2012. ISSN 0020-0255.

ZHIJIAN ZHU; WANG, J.; BALOCH, M. H. **Dynamic economic emission dispatch using modified NSGA-II.** International Transactions on Electrical Energy Systems, 22 JUN 2016.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### DADOS DO SISTEMA DE TESTE

No presente anexo mostram-se os dados do sistema de teste 118-barras do IEEE utilizado pelo programa de otimização:

U	Bus No.	Unit Cost Coefficients			Pmax (MW)	Pmin (MW)
		a (MBtu)	b (MBtu/ MW)	c (MBtu/MW <sup>2</sup> )		
1	4	31.67	26.2438	0.069663	30	5
2	6	31.67	26.2438	0.069663	30	5
3	8	31.67	26.2438	0.069663	30	5
4	10	6.78	12.8875	0.010875	300	150
5	12	6.78	12.8875	0.010875	300	100
6	15	31.67	26.2438	0.069663	30	10
7	18	10.15	17.8200	0.012800	100	25
8	19	31.67	26.2438	0.069663	30	5
9	24	31.67	26.2438	0.069663	30	5
10	25	6.78	12.8875	0.010875	300	100
11	26	32.96	10.7600	0.003000	350	100
12	27	31.67	26.2438	0.069663	30	8
13	31	31.67	26.2438	0.069663	30	8
14	32	10.15	17.8200	0.012800	100	25
15	34	31.67	26.2438	0.069663	30	8
16	36	10.15	17.8200	0.012800	100	25
17	40	31.67	26.2438	0.069663	30	8
18	42	31.67	26.2438	0.069663	30	8
19	46	10.15	17.8200	0.012800	100	25
20	49	28	12.3299	0.002401	250	50
21	54	28	12.3299	0.002401	250	50
22	55	10.15	17.8200	0.012800	100	25
23	56	10.15	17.8200	0.012800	100	25
24	59	39	13.2900	0.004400	200	50
25	61	39	13.2900	0.004400	200	50
26	62	10.15	17.8200	0.012800	100	25
27	65	64.16	8.3391	0.010590	420	100
28	66	64.16	8.3391	0.010590	420	100
29	69	6.78	12.8875	0.010875	300	80
30	70	74.33	15.4708	0.045923	80	30
31	72	31.67	26.2438	0.069663	30	10
32	73	31.67	26.2438	0.069663	30	5
33	74	17.95	37.6968	0.028302	20	5
34	76	10.15	17.8200	0.012800	100	25
35	77	10.15	17.8200	0.012800	100	25
36	80	6.78	12.8875	0.010875	300	150
37	82	10.15	17.8200	0.012800	100	25
38	85	31.67	26.2438	0.069663	30	10
39	87	32.96	10.7600	0.003000	300	100
40	89	6.78	12.8875	0.010875	200	50

41	90	17.95	37.6968	0.028302	20	8
42	91	58.81	22.9423	0.009774	50	20
43	92	6.78	12.8875	0.010875	300	100
44	99	6.78	12.8875	0.010875	300	100
45	100	6.78	12.8875	0.010875	300	100
46	103	17.95	37.6968	0.028302	20	8
47	104	10.15	17.8200	0.012800	100	25
48	105	10.15	17.8200	0.012800	100	25
49	107	17.95	37.6968	0.028302	20	8
50	110	58.81	22.9423	0.009774	50	25
51	111	10.15	17.8200	0.012800	100	25
52	112	10.15	17.8200	0.012800	100	25
53	113	10.15	17.8200	0.012800	100	25
54	116	58.81	22.9423	0.009774	50	25

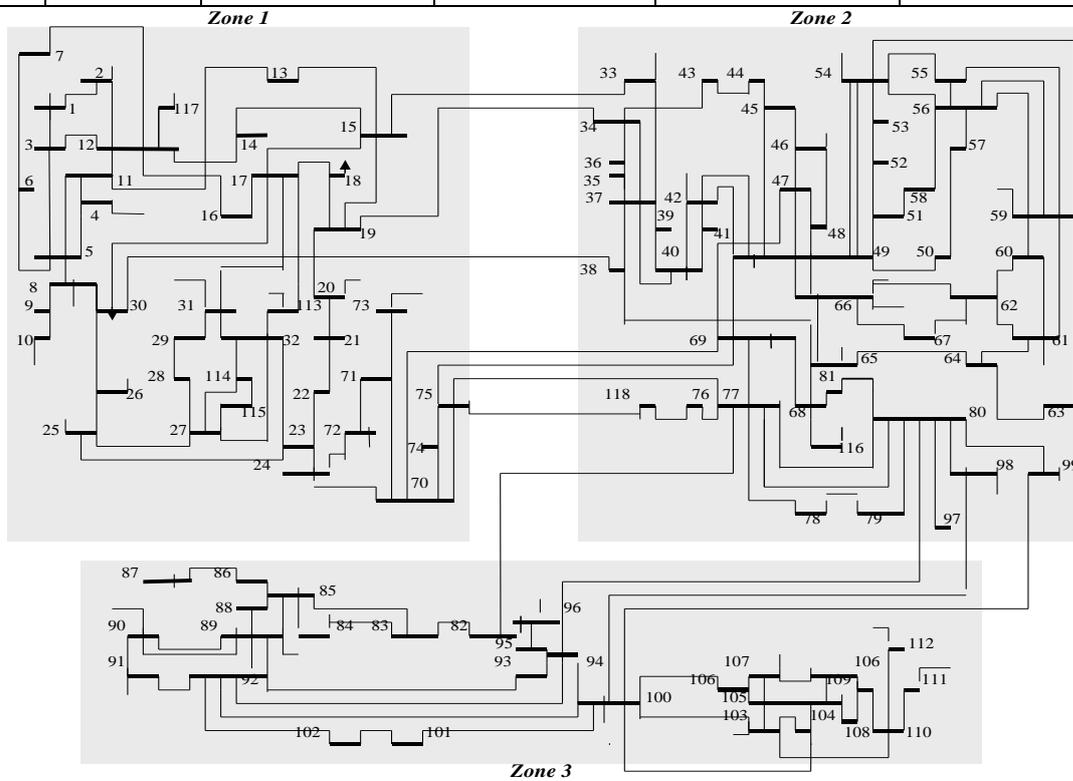


TABLE 1 GENERATOR DATA

U	Bus No.	Unit Cost Coefficients			Pmax (MW)	Pmin (MW)	Qmax (MVA R)	Qmin (MVA R)	Ini. State (h)	Min Off (h)	Min On (h)	Ramp (MW/h)	Start Up (MBtu)	Fuel Price (\$/MBtu)
		a (MBtu)	b (MBtu/MW)	c (MBtu/MW <sup>2</sup> )										
1	4	31.67	26.2438	0.069663	30	5	300	-300	1	1	1	15	40	1
2	6	31.67	26.2438	0.069663	30	5	50	-13	1	1	1	15	40	1
3	8	31.67	26.2438	0.069663	30	5	300	-300	1	1	1	15	40	1
4	10	6.78	12.8875	0.010875	300	150	200	-147	8	8	8	150	440	1
5	12	6.78	12.8875	0.010875	300	100	120	-35	8	8	8	150	110	1
6	15	31.67	26.2438	0.069663	30	10	30	-10	1	1	1	15	40	1
7	18	10.15	17.8200	0.012800	100	25	50	-16	5	5	5	50	50	1
8	19	31.67	26.2438	0.069663	30	5	24	-8	1	1	1	15	40	1
9	24	31.67	26.2438	0.069663	30	5	300	-300	1	1	1	15	40	1
10	25	6.78	12.8875	0.010875	300	100	140	-47	8	8	8	150	100	1

11	26	32.96	10.7600	0.003000	350	100	1000	-1000	8	8	8	175	100	1
12	27	31.67	26.2438	0.069663	30	8	300	-300	1	1	1	15	40	1
13	31	31.67	26.2438	0.069663	30	8	300	-300	1	1	1	15	40	1
14	32	10.15	17.8200	0.012800	100	25	42	-14	5	5	5	50	50	1
15	34	31.67	26.2438	0.069663	30	8	24	-8	1	1	1	15	40	1
16	36	10.15	17.8200	0.012800	100	25	24	-8	5	5	5	50	50	1
17	40	31.67	26.2438	0.069663	30	8	300	-300	1	1	1	15	40	1
18	42	31.67	26.2438	0.069663	30	8	300	-300	1	1	1	15	40	1
19	46	10.15	17.8200	0.012800	100	25	100	-100	5	5	5	50	59	1
20	49	28	12.3299	0.002401	250	50	210	-85	8	8	8	125	100	1
21	54	28	12.3299	0.002401	250	50	300	-300	8	8	8	125	100	1
22	55	10.15	17.8200	0.012800	100	25	23	-8	5	5	5	50	50	1
23	56	10.15	17.8200	0.012800	100	25	15	-8	5	5	5	50	50	1
24	59	39	13.2900	0.004400	200	50	180	-60	10	8	8	100	100	1
25	61	39	13.2900	0.004400	200	50	300	-100	10	8	8	100	100	1
26	62	10.15	17.8200	0.012800	100	25	20	-20	5	5	5	50	50	1
27	65	64.16	8.3391	0.010590	420	100	200	-67	10	10	10	210	250	1
28	66	64.16	8.3391	0.010590	420	100	200	-67	10	10	10	210	250	1
29	69	6.78	12.8875	0.010875	300	80	99999	99999	10	8	8	150	100	1
30	70	74.33	15.4708	0.045923	80	30	32	-10	4	4	4	40	45	1
31	72	31.67	26.2438	0.069663	30	10	100	-100	1	1	1	15	40	1
32	73	31.67	26.2438	0.069663	30	5	100	-100	1	1	1	15	40	1
33	74	17.95	37.6968	0.028302	20	5	9	-6	1	1	1	10	30	1
34	76	10.15	17.8200	0.012800	100	25	23	-8	5	5	5	50	50	1
35	77	10.15	17.8200	0.012800	100	25	70	-20	5	5	5	50	50	1
36	80	6.78	12.8875	0.010875	300	150	280	-165	10	8	8	150	440	1
37	82	10.15	17.8200	0.012800	100	25	9900	-9900	5	5	5	50	50	1
38	85	31.67	26.2438	0.069663	30	10	23	-8	1	1	1	15	40	1
39	87	32.96	10.7600	0.003000	300	100	1000	-100	10	8	8	150	440	1
40	89	6.78	12.8875	0.010875	200	50	300	-210	10	8	8	100	400	1
41	90	17.95	37.6968	0.028302	20	8	300	-300	1	1	1	10	30	1
42	91	58.81	22.9423	0.009774	50	20	100	-100	1	1	1	25	45	1
43	92	6.78	12.8875	0.010875	300	100	9	-3	8	8	8	150	100	1
44	99	6.78	12.8875	0.010875	300	100	100	-100	8	8	8	150	100	1
45	100	6.78	12.8875	0.010875	300	100	155	-50	8	8	8	150	110	1
46	103	17.95	37.6968	0.028302	20	8	40	-15	1	1	1	10	30	1
47	104	10.15	17.8200	0.012800	100	25	23	-8	5	5	5	50	50	1
48	105	10.15	17.8200	0.012800	100	25	23	-8	5	5	5	50	50	1
49	107	17.95	37.6968	0.028302	20	8	200	-200	1	1	1	10	30	1
50	110	58.81	22.9423	0.009774	50	25	23	-8	2	2	2	25	45	1
51	111	10.15	17.8200	0.012800	100	25	1000	-100	5	5	5	50	50	1
52	112	10.15	17.8200	0.012800	100	25	1000	-100	5	5	5	50	50	1
53	113	10.15	17.8200	0.012800	100	25	200	-100	5	5	5	50	50	1
54	116	58.81	22.9423	0.009774	50	25	1000	-1000	2	2	2	25	45	1

TABLE 2 BUS DATA

Bus No.	Voltage-Max (pu)	Voltage-Min (pu)
1	1.05	0.94
2	1.06	0.95
3	1.06	0.95
4	1.09	0.99
5	1.09	0.99
6	1.09	0.97
7	1.09	0.97
8	1.09	0.98
9	1.09	0.98
10	1.09	0.98
11	1.08	0.97
12	1.09	0.98
13	1.05	0.95
14	1.07	0.98
15	1.05	0.98
16	1.07	0.98
17	1.09	0.98

18	1.07	0.98
19	1.06	0.98
20	1.04	0.96
21	1.03	0.95
22	1.04	0.97
23	1.09	0.98
24	1.09	0.98
25	1.09	0.98
26	1.09	0.98
27	1.09	0.96
28	1.08	0.94
29	1.08	0.93
30	1.06	0.98
31	1.09	0.94
32	1.08	0.97
33	1.04	0.96
34	1.08	0.97
35	1.08	0.96
36	1.08	0.96
37	1.09	0.98
38	1.04	0.95
39	1.09	0.93
40	1.09	0.93
41	1.09	0.93
42	1.09	0.92
43	1.06	0.96
44	1.06	0.97
45	1.06	0.98
46	1.09	0.98
47	1.09	0.98
48	1.09	0.98
49	1.09	0.98
50	1.09	0.99
51	1.07	0.97
52	1.06	0.97
53	1.06	0.96
54	1.09	0.97
55	1.09	0.97
56	1.09	0.97
57	1.08	0.98
58	1.07	0.97
59	1.09	0.98
60	1.09	0.99
61	1.09	0.99
62	1.09	0.98
63	1.06	0.96
64	1.07	0.98
65	1.07	0.98
66	1.09	0.98
67	1.09	0.98
68	1.08	0.98
69	1.09	0.98
70	1.06	0.98
71	1.06	0.99
72	1.09	0.99
73	1.06	0.99
74	1.03	0.93
75	1.04	0.94
76	1.02	0.93
77	1.08	0.98
78	1.07	0.99
79	1.07	0.99
80	1.09	0.99
81	1.07	0.98
82	1.09	0.98
83	1.07	0.99

84	1.03	0.96
85	1.02	0.96
86	0.96	0.93
87	1.09	0.98
88	1.06	0.98
89	1.09	0.98
90	1.09	0.98
91	1.09	0.98
92	1.09	0.98
93	1.08	0.98
94	1.07	0.98
95	1.05	0.98
96	1.07	0.98
97	1.08	0.98
98	1.08	0.98
99	1.09	0.98
100	1.09	0.98
101	1.08	0.98
102	1.09	0.98
103	1.09	0.98
104	1.08	0.99
105	1.08	0.98
106	1.07	0.96
107	1.06	0.94
108	1.08	0.98
109	1.08	0.98
110	1.09	0.97
111	1.09	0.97
112	1.09	0.97
113	1.09	0.98
114	1.08	0.96
115	1.08	0.96
116	1.09	0.98
117	1.06	0.95
118	1.03	0.93

TABLE 3 TRANSMISSION LINE DATA

Line No.	From Bus	To Bus	Circuit ID	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Flow Limit (MW)
1	1	2	1	0.0303	0.0999	0.0254	175
2	1	3	1	0.0129	0.0424	0.01082	175
3	4	5	1	0.00176	0.00798	0.0021	500
4	3	5	1	0.0241	0.108	0.0284	175
5	5	6	1	0.0119	0.054	0.01426	175
6	6	7	1	0.00459	0.0208	0.0055	175
7	8	9	1	0.00244	0.0305	1.162	500
8	8	5	1	0	0.0267	0	500
9	9	10	1	0.00258	0.0322	1.23	500
10	4	11	1	0.0209	0.0688	0.01748	175
11	5	11	1	0.0203	0.0682	0.01738	175
12	11	12	1	0.00595	0.0196	0.00502	175
13	2	12	1	0.0187	0.0616	0.01572	175
14	3	12	1	0.0484	0.16	0.0406	175
15	7	12	1	0.00862	0.034	0.00874	175
16	11	13	1	0.02225	0.0731	0.01876	175
17	12	14	1	0.0215	0.0707	0.01816	175
18	13	15	1	0.0744	0.2444	0.06268	175
19	14	15	1	0.0595	0.195	0.0502	175
20	12	16	1	0.0212	0.0834	0.0214	175
21	15	17	1	0.0132	0.0437	0.0444	500
22	16	17	1	0.0454	0.1801	0.0466	175
23	17	18	1	0.0123	0.0505	0.01298	175
24	18	19	1	0.01119	0.0493	0.01142	175
25	19	20	1	0.0252	0.117	0.0298	175
26	15	19	1	0.012	0.0394	0.0101	175
27	20	21	1	0.0183	0.0849	0.0216	175

28	21	22	1	0.0209	0.097	0.0246	175
29	22	23	1	0.0342	0.159	0.0404	175
30	23	24	1	0.0135	0.0492	0.0498	175
31	23	25	1	0.0156	0.08	0.0864	500
32	26	25	1	0	0.0382	0	500
33	25	27	1	0.0318	0.163	0.1764	500
34	27	28	1	0.01913	0.0855	0.0216	175
35	28	29	1	0.0237	0.0943	0.0238	175
36	30	17	1	0	0.0388	0	500
37	8	30	1	0.00431	0.0504	0.514	175
38	26	30	1	0.00799	0.086	0.908	500
39	17	31	1	0.0474	0.1563	0.0399	175
40	29	31	1	0.0108	0.0331	0.0083	175
41	23	32	1	0.0317	0.1153	0.1173	140
42	31	32	1	0.0298	0.0985	0.0251	175
43	27	32	1	0.0229	0.0755	0.01926	175
44	15	33	1	0.038	0.1244	0.03194	175
45	19	34	1	0.0752	0.247	0.0632	175
46	35	36	1	0.00224	0.0102	0.00268	175
47	35	37	1	0.011	0.0497	0.01318	175
48	33	37	1	0.0415	0.142	0.0366	175
49	34	36	1	0.00871	0.0268	0.00568	175
50	34	37	1	0.00256	0.0094	0.00984	500
51	38	37	1	0	0.0375	0	500
52	37	39	1	0.0321	0.106	0.027	175
53	37	40	1	0.0593	0.168	0.042	175
54	30	38	1	0.00464	0.054	0.422	175
55	39	40	1	0.0184	0.0605	0.01552	175
56	40	41	1	0.0145	0.0487	0.01222	175
57	40	42	1	0.0555	0.183	0.0466	175
58	41	42	1	0.041	0.135	0.0344	175
59	43	44	1	0.0608	0.2454	0.06068	175
60	34	43	1	0.0413	0.1681	0.04226	175
61	44	45	1	0.0224	0.0901	0.0224	175
62	45	46	1	0.04	0.1356	0.0332	175
63	46	47	1	0.038	0.127	0.0316	175
64	46	48	1	0.0601	0.189	0.0472	175
65	47	49	1	0.0191	0.0625	0.01604	175
66	42	49	1	0.0715	0.323	0.086	175
67	42	49	2	0.0715	0.323	0.086	175
68	45	49	1	0.0684	0.186	0.0444	175
69	48	49	1	0.0179	0.0505	0.01258	175
70	49	50	1	0.0267	0.0752	0.01874	175
71	49	51	1	0.0486	0.137	0.0342	175
72	51	52	1	0.0203	0.0588	0.01396	175
73	52	53	1	0.0405	0.1635	0.04058	175
74	53	54	1	0.0263	0.122	0.031	175
75	49	54	1	0.073	0.289	0.0738	175
76	49	54	2	0.0869	0.291	0.073	175
77	54	55	1	0.0169	0.0707	0.0202	175
78	54	56	1	0.00275	0.00955	0.00732	175
79	55	56	1	0.00488	0.0151	0.00374	175
80	56	57	1	0.0343	0.0966	0.0242	175
81	50	57	1	0.0474	0.134	0.0332	175
82	56	58	1	0.0343	0.0966	0.0242	175
83	51	58	1	0.0255	0.0719	0.01788	175
84	54	59	1	0.0503	0.2293	0.0598	175
85	56	59	1	0.0825	0.251	0.0569	175
86	56	59	2	0.0803	0.239	0.0536	175
87	55	59	1	0.04739	0.2158	0.05646	175
88	59	60	1	0.0317	0.145	0.0376	175
89	59	61	1	0.0328	0.15	0.0388	175
90	60	61	1	0.00264	0.0135	0.01456	500
91	60	62	1	0.0123	0.0561	0.01468	175
92	61	62	1	0.00824	0.0376	0.0098	175
93	63	59	1	0	0.0386	0	500

94	63	64	1	0.00172	0.02	0.216	500
95	64	61	1	0	0.0268	0	500
96	38	65	1	0.00901	0.0986	1.046	500
97	64	65	1	0.00269	0.0302	0.38	500
98	49	66	1	0.018	0.0919	0.0248	500
99	49	66	2	0.018	0.0919	0.0248	500
100	62	66	1	0.0482	0.218	0.0578	175
101	62	67	1	0.0258	0.117	0.031	175
102	65	66	1	0	0.037	0	500
103	66	67	1	0.0224	0.1015	0.02682	175
104	65	68	1	0.00138	0.016	0.638	500
105	47	69	1	0.0844	0.2778	0.07092	175
106	49	69	1	0.0985	0.324	0.0828	175
107	68	69	1	0	0.037	0	500
108	69	70	1	0.03	0.127	0.122	500
109	24	70	1	0.00221	0.4115	0.10198	175
110	70	71	1	0.00882	0.0355	0.00878	175
111	24	72	1	0.0488	0.196	0.0488	175
112	71	72	1	0.0446	0.18	0.04444	175
113	71	73	1	0.00866	0.0454	0.01178	175
114	70	74	1	0.0401	0.1323	0.03368	175
115	70	75	1	0.0428	0.141	0.036	175
116	69	75	1	0.0405	0.122	0.124	500
117	74	75	1	0.0123	0.0406	0.01034	175
118	76	77	1	0.0444	0.148	0.0368	175
119	69	77	1	0.0309	0.101	0.1038	175
120	75	77	1	0.0601	0.1999	0.04978	175
121	77	78	1	0.00376	0.0124	0.01264	175
122	78	79	1	0.00546	0.0244	0.00648	175
123	77	80	1	0.017	0.0485	0.0472	500
124	77	80	2	0.0294	0.105	0.0228	500
125	79	80	1	0.0156	0.0704	0.0187	175
126	68	81	1	0.00175	0.0202	0.808	500
127	81	80	1	0	0.037	0	500
128	77	82	1	0.0298	0.0853	0.08174	200
129	82	83	1	0.0112	0.03665	0.03796	200
130	83	84	1	0.0625	0.132	0.0258	175
131	83	85	1	0.043	0.148	0.0348	175
132	84	85	1	0.0302	0.0641	0.01234	175
133	85	86	1	0.035	0.123	0.0276	500
134	86	87	1	0.02828	0.2074	0.0445	500
135	85	88	1	0.02	0.102	0.0276	175
136	85	89	1	0.0239	0.173	0.047	175
137	88	89	1	0.0139	0.0712	0.01934	500
138	89	90	1	0.0518	0.188	0.0528	500
139	89	90	2	0.0238	0.0997	0.106	500
140	90	91	1	0.0254	0.0836	0.0214	175
141	89	92	1	0.0099	0.0505	0.0548	500
142	89	92	2	0.0393	0.1581	0.0414	500
143	91	92	1	0.0387	0.1272	0.03268	175
144	92	93	1	0.0258	0.0848	0.0218	175
145	92	94	1	0.0481	0.158	0.0406	175
146	93	94	1	0.0223	0.0732	0.01876	175
147	94	95	1	0.0132	0.0434	0.0111	175
148	80	96	1	0.0356	0.182	0.0494	175
149	82	96	1	0.0162	0.053	0.0544	175
150	94	96	1	0.0269	0.0869	0.023	175
151	80	97	1	0.0183	0.0934	0.0254	175
152	80	98	1	0.0238	0.108	0.0286	175
153	80	99	1	0.0454	0.206	0.0546	200
154	92	100	1	0.0648	0.295	0.0472	175
155	94	100	1	0.0178	0.058	0.0604	175
156	95	96	1	0.0171	0.0547	0.01474	175
157	96	97	1	0.0173	0.0885	0.024	175
158	98	100	1	0.0397	0.179	0.0476	175
159	99	100	1	0.018	0.0813	0.0216	175

160	100	101	1	0.0277	0.1262	0.0328	175
161	92	102	1	0.0123	0.0559	0.01464	175
162	101	102	1	0.0246	0.112	0.0294	175
163	100	103	1	0.016	0.0525	0.0536	500
164	100	104	1	0.0451	0.204	0.0541	175
165	103	104	1	0.0466	0.1584	0.0407	175
166	103	105	1	0.0535	0.1625	0.0408	175
167	100	106	1	0.0605	0.229	0.062	175
168	104	105	1	0.00994	0.0378	0.00986	175
169	105	106	1	0.014	0.0547	0.01434	175
170	105	107	1	0.053	0.183	0.0472	175
171	105	108	1	0.0261	0.0703	0.01844	175
172	106	107	1	0.053	0.183	0.0472	175
173	108	109	1	0.0105	0.0288	0.0076	175
174	103	110	1	0.03906	0.1813	0.0461	175
175	109	110	1	0.0278	0.0762	0.0202	175
176	110	111	1	0.022	0.0755	0.02	175
177	110	112	1	0.0247	0.064	0.062	175
178	17	113	1	0.00913	0.0301	0.00768	175
179	32	113	1	0.0615	0.203	0.0518	500
180	32	114	1	0.0135	0.0612	0.01628	175
181	27	115	1	0.0164	0.0741	0.01972	175
182	114	115	1	0.0023	0.0104	0.00276	175
183	68	116	1	0.00034	0.00405	0.164	500
184	12	117	1	0.0329	0.14	0.0358	175
185	75	118	1	0.0145	0.0481	0.01198	175
186	76	118	1	0.0164	0.0544	0.01356	175

TABLE 4 TAP CHANGING TRANSFORMER DATA

Transformer No.	From Bus	To Bus	Circuit ID	Tap Initial	Tap Max	Tap Min	Angle Initial	Angle Max	Angle Min
1	8	5	1	0.985	0	0	0	0	0
2	26	25	1	0.96	0	0	0	0	0
3	30	17	1	0.96	0	0	0	0	0
4	38	37	1	0.935	0	0	0	0	0
5	63	59	1	0.96	0	0	0	0	0
6	64	61	1	0.985	0	0	0	0	0
7	65	66	1	0.935	0	0	0	0	0
8	68	69	1	0.935	0	0	0	0	0
9	81	80	1	0.935	0	0	3.57	-15	15

TABLE 5 HOURLY LOAD AND ANCILLARY SERVICES

H	Real Load (MW)	Reactive Load (MVAR)	Regulation Down (MW)	Regulation Up (MW)	Spinning Reserve (MW)	Non-spinning Reserve (MW)	Operating Reserve (MW)
1	4200	1623.47	42	42	84	84	210
2	3960	1530.70	39.6	39.6	79.2	79.2	198
3	3480	1345.16	34.8	34.8	69.6	69.6	174
4	2400	927.70	24	24	48	48	120
5	3000	1159.62	30	30	60	60	150
6	3600	1391.54	36	36	72	72	180
7	4200	1623.47	42	42	84	84	210
8	4680	1809.01	46.8	46.8	93.6	93.6	234
9	4920	1901.78	49.2	49.2	98.4	98.4	246
10	5280	2040.93	52.8	52.8	105.6	105.6	264
11	5340	2064.12	53.4	53.4	106.8	106.8	267
12	5040	1948.16	50.4	50.4	100.8	100.8	252
13	4800	1855.39	48	48	96	96	240
14	4560	1762.62	45.6	45.6	91.2	91.2	228
15	5280	2040.93	52.8	52.8	105.6	105.6	264
16	5400	2087.31	54	54	108	108	270
17	5100	1971.35	51	51	102	102	255
18	5340	2064.12	53.4	53.4	106.8	106.8	267
19	5640	2180.08	56.4	56.4	112.8	112.8	282
20	5880	2272.85	58.8	58.8	117.6	117.6	294
21	6000	2319.24	60	60	120	120	300
22	5400	2087.31	54	54	108	108	270

23	5220	2017.74	52.2	52.2	104.4	104.4	261
24	4920	1901.78	49.2	49.2	98.4	98.4	246

TABLE 6 BUS LOAD DISTRIBUTION PROFILE

Bus No	Pd (MW)	Qd (MVAR)
1	54.14	8.66
2	21.23	9.55
3	41.4	10.62
4	31.85	12.74
6	55.2	23.35
7	20.17	2.12
11	74.31	24.42
12	49.89	10.62
13	36.09	16.99
14	14.86	1.06
15	95.54	31.85
16	26.54	10.62
17	11.68	3.18
18	63.69	36.09
19	47.77	26.54
20	19.11	3.18
21	14.86	8.49
22	10.62	5.31
23	7.43	3.18
27	65.82	13.8
28	18.05	7.43
29	25.48	4.25
31	45.65	28.66
32	62.63	24.42
33	24.42	9.55
34	62.63	27.6
35	35.03	9.55
36	32.91	18.05
39	27	11
40	20	23
41	37	10
42	37	23
43	18	7
44	16	8
45	53	22
46	28	10
47	34	0
48	20	11
49	87	30
50	17	4
51	17	8
52	18	5
53	23	11
54	113	32
55	63	22
56	84	18
57	12	3
58	12	3
59	277	113
60	78	3
62	77	14
66	39	18
67	28	7
70	66	20
74	68	27
75	47	11
76	68	36
77	61	28
78	71	26
79	39	32
80	130	26

82	54	27
83	20	10
84	11	7
85	24	15
86	21	10
88	48	10
90	78	42
92	65	10
93	12	7
94	30	16
95	42	31
96	38	15
97	15	9
98	34	8
100	37	18
101	22	15
102	5	3
103	23	16
104	38	25
105	31	26
106	43	16
107	28	12
108	2	1
109	8	3
110	39	30
112	25	13
114	8.49	3.18
115	23.35	7.43
117	21.23	8.49
118	33	15

TABLE 7 HOURLY ANCILLARY SERVICES DISPATCH

Hour	Regulation Up (MW)	Spinning Reserve (MW)	Non-spinning Reserve (MW)	Operating Reserve (MW)
1	68.8	260	91.17	0
2	76.8	275.2	44.05	0
3	76.8	271.19	0	0
4	96.8	143.2	0	0
5	76.8	223.18	0	0
6	76.8	275.2	7.96	0
7	68.8	260	91.17	0
8	98.8	363.1	6.07	0
9	98.8	312	81.19	0
10	98.8	312	117.27	0
11	98.8	312	123.21	0
12	98.8	312	93.19	0
13	98.8	325.34	55.89	0
14	98.8	357.2	0	0
15	100.8	320	107.27	0
16	100.8	320	119.22	0
17	100.8	320	89.16	0
18	100.8	320	113.24	0

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

### ARTIGO PUBLICADO RELACIONADO À TESE

Nadime Mustafa Moraes, Ubiratan Holanda Bezerra, Jorge Laureano Moya Rodríguez, Jandecy Cabral Leite. **The emission index as a parameter for assessing the environmental pollution from thermal power plants. Case study.** Dyna, Volumen 83, Número 199, p. 218-224, 2016. Revista A2 Qualis Capes, Engenharia IV.

### ARTIGO SUBMETIDO E APROVADO PARA PUBLICAÇÃO RELACIONADO À TESE

Nadime Mustafa Moraes, Ubiratan Holanda Bezerra, Jorge Laureano Moya Rodríguez, Manoel Henrique Reis Nascimento, Jandecy Cabral Leite. **A new approach to Economic – Emission load dispatch using NSGA II: Case study.** International Transactions on Electrical Energy Systems. Revista A2 Qualis Capes, Engenharia IV. Artigo Aprovado para Publicação em 2017.