

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia

Andréa Camila dos Santos Martins

**Métodos de otimização multiobjetivo em
problemas de despacho econômico e
ambiental de sistemas termo-eólico**

Bauru

2020

Andréa Camila dos Santos Martins

Métodos de otimização multiobjetivo em problemas de despacho econômico e ambiental de sistemas termo-eólico

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” — Campus de Bauru, Faculdade de Engenharia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Antonio Roberto Balbo

Coorientador: Phd Dylan Jones

Bauru

2020

M386m	Martins, Andréa Camila dos Santos Métodos de otimização multiobjetivo em problemas de despacho econômico e ambiental de sistemas termo-eólico / Andréa Camila dos Santos Martins. -- Bauru, 2020 153 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Antonio Roberto Balbo Coorientador: Dylan Jones 1. Energia Eólica. 2. Otimização Multiobjetivo. 3. Programação por metas. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ANDRÉA CAMILA DOS SANTOS MARTINS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 05 dias do mês de março do ano de 2020, às 14:00 horas, no(a) Sala de Reuniões do Departamento de Engenharia Elétrica, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO - Orientador(a) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof. Dr. LEONARDO NEPOMUCENO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof^a. Dr^a. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA do(a) Departamento de Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP, Prof. Dr. ANGELO ALIANO FILHO do(a) Departamento de Matemática / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Prof. Dr. WASHINGTON ALVES DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Pesquisa Operacional / Faculdade de Ciências Aplicadas da UNICAMP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de ANDRÉA CAMILA DOS SANTOS MARTINS, intitulada **MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO EM PROBLEMAS DE DESPACHO ECONÔMICO E AMBIENTAL DE SISTEMAS TERMO-EÓLICO**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APPROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO

Prof. Dr. LEONARDO NEPOMUCENO

Prof^a. Dr^a. HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO SILVA

Prof. Dr. ANGELO ALIANO FILHO

Prof. Dr. WASHINGTON ALVES DE OLIVEIRA

Dedico ao meu marido pelo apoio em todos esses anos.

Aos meus pais e irmãos que sempre acreditaram em mim e são a minha base.

Aos meus familiares e amigos que sempre me incentivam e ajudaram nessa jornada.

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer a Deus, pois nem mesmo nos meus pensamentos mais altos, jamais imaginei viver o que eu vivi nesses anos. Obrigada por me capacitar e poder completar mais essa etapa da minha vida.

Ao meu marido Thiago por estar sempre do meu lado nas horas mais difíceis, nos momentos mais inesperados e por acreditar, mais uma vez, nos meus sonhos.

Minha mãe, e meus irmãos Hellen Carolina e Carlos Jr que são as pessoas que vivi momentos mais difíceis e alegres, foi muito bom poder ter crescido junto com vocês. Eu não seria quem eu sou se não tivesse vivido o que vivi junto com vocês. Aos familiares e amigos, que são indispensáveis em minha vida, pois sei que sempre posso contar com vocês em apoio e oração.

Ao prof. Dr. Antonio Roberto Balbo por todas as vezes que me incentivou em voltar a estudar, pelo voto de confiança depositado em mim e pelo companheirismo em compartilhar o seu conhecimento com sabedoria e paciência.

Ao prof. Dylan Jones que aceitou participar dessa caminhada, auxiliando em todos os momentos que eu precisei.

À minha banca de defesa, em especial, a profa. Helenice que está na minha caminhada a algum tempo, sempre sendo útil com seus ensinamentos e conselhos e ao prof. Leonardo sempre paciente e gentil em tudo o que precisei.

Aos professores do Departamento de Matemática por contribuírem para minha formação acadêmica, por todo carinho, paciência e por terem me ajudado nessa jornada.

Aos funcionários da Seção Técnica de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia e do Departamento de Matemática, pela colaboração e atenção.

*“Muitos são os planos no coração do homem, mas o que prevalece é o propósito do
Senhor.”*

Provérbios 19:21

Resumo

A produção de energia eólica tem se destacado no Brasil e mostrado grande importância na questão ambiental, pois auxilia na redução da emissão dos gases poluentes na atmosfera, provenientes de outras fontes de energia. Neste trabalho é proposta uma modelagem matemática de otimização multiobjetivo a qual explora a produção de energia eólica em um problema de despacho econômico e ambiental termo-eólico. O principal objetivo é mostrar que uma metodologia determinística envolvendo os métodos de otimização multiobjetivo de restrições canalizadas progressivas e de técnicas de programação por metas ponderadas, em conjunto com o método de pontos interiores, é eficiente à resolução deste problema. É proposta uma nova técnica, a qual é uma combinação entre os métodos de otimização multiobjetivo citados. As soluções dos subproblemas gerados por estes métodos serão determinadas através de pacotes computacionais, onde são apresentados resultados de casos distintos de produção de energia, mostrando a influência da energia eólica nos custos operacionais da geração e no impacto ambiental.

Palavras-chave: Energia Eólica. Otimização Multiobjetivo. Programação por Metas.

Abstract

The production of wind energy has stood out in Brazil and has shown great importance in the environmental issue, as it assists to reduce of polluting gases in the atmosphere arising out of other sources of energy. In this work a mathematical modeling of optimization multiobjective is proposed, which explores the wind energy production in a thermal-wind environmental and economic dispatch problem. The main objective is to show that a deterministic methodology involving the multiobjective optimization methods, progressive bounded constraints and weighted goal programming techniques, together with an interior point method, is efficient to solve this problem. A new technique is proposed, which is a combination of the mentioned multiobjective optimization methods. The solutions of the generated subproblems by these methods will be determined through of computational package and the results of distinct cases of energy production will be presented, showing the influence of the wind power on the generation and on the environmental impact.

Keywords: Wind energy. Multiobjective optimization. Goal programming.

Lista de Figuras

2.1	Aerogerador com eixo vertical	35
2.2	Parques eólicos instalados em terra	36
2.3	Parques eólicos instaladas <i>offshore</i>	36
2.4	Componentes de uma turbina eólica com eixo horizontal	37
2.5	Capacidade mundial instalada de novas unidades eólicas (em MW) de 2001 a 2018	38
2.6	<i>Ranking</i> dos 10 países com a capacidade instalada de novas unidades em 2018	38
2.7	Matriz energética brasileira	40
2.8	Geração eólica do SIN entre os anos de 2016 e 2018 (em MW médio) . . .	40
2.9	Curva de entrada-saída idealizada	45
3.1	Parâmetro λ fixo	48
3.2	Parâmetro α fixo	49
3.3	Função densidade de probabilidade de <i>Weibull</i>	51
3.4	Comportamento da potência em relação a velocidade do vento	53
3.5	Probabilidade mista da potência de saída da função de distribuição de pro- babilidade de <i>Weibull</i> para a velocidade do vento.	56
3.6	Curva de entrada-saída de uma unidade geradora j com ponto de carrega- mento de válvula	62
5.1	Subintervalo para a função emissão de poluentes no MRCP	80
6.1	Resultados do PDEATE para o caso 1A	96
6.2	Resultados do PDEATE para o caso 1B	96
6.3	Resultados do PDEATE para o caso 1C	97

6.4	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C . . .	99
6.5	Resultados do PMDEATE - PV para o caso 1A	100
6.6	Resultados do PMDEATE - PV para o caso 1B	101
6.7	Resultados do PMDEATE - PV para o caso 1C	102
6.8	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C . . .	105
6.9	Resultados do PMDEATE - PPV para o caso 1A	106
6.10	Resultados do PMDEATE - PPV para o caso 1B	107
6.11	Resultados do PMDEATE - PPV para o caso 1C	108
6.12	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C . . .	111
6.13	Resultados do PMDEATEb para o caso 1A	112
6.14	Resultados do PMDEATEb para o caso 1B	112
6.15	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A e 1B	115
6.16	Resultados do PMDEATEb - PV para o caso 1A	115
6.17	Resultados do PMDEATEb - PV para o caso 1B	116
6.18	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A e 1B	118
6.19	Resultados do PMDEATEb - PPV para o caso 1A	119
6.20	Resultados do PMDEATEb - PPV para o caso 1B	119
6.21	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A e 1B	121
6.22	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C . . .	125
6.23	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C . . .	129
6.24	Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C . . .	133
A.1	Representação gráfica dos termos de um problema bi-objetivo	151

Lista de Tabelas

2.1	<i>Ranking</i> dos 10 primeiros países com a capacidade instalada das novas unidades em 2018	39
2.2	Classificação da viabilidade da implantação de uma usina eólica	41
2.3	Novas unidades liberadas para operação comercial e capacidade de geração	42
6.1	Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A, 1B e 1C . . .	97
6.2	Valores do custo total e emissão pela programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C	98
6.3	Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para PMDEATE	98
6.4	Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A, 1B e 1C . . .	103
6.5	Valores do custo total e emissão pela programação por metas para o PM-DEATE - PV	104
6.6	Variáveis de desvio da Programação por metas ponderadas para o PMDE-ATE - PV	104
6.7	Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A, 1B e 1C . . .	109
6.8	Valores do custo total e emissão pela programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C	110
6.9	Valor das variáveis de desvio da Programação por metas ponderadas para o PDEATE - PPV	110
6.10	Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A e 1B	113
6.11	Valores do custo total e emissão pela programação por metas para PMDE-ATEb	113
6.12	Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para o PMDEATEb	114
6.13	Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A e 1B	116

6.14	Valores do custo total e emissão pela programação por metas para o PMDEATEb - PV	117
6.15	Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para o PMDEATEb - PV	117
6.16	Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A e 1B	120
6.17	Valores do custo total e emissão pela programação por metas para PMDEATEb - PPV	120
6.18	Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para o PMDEATEb -PPV	121
6.19	Soluções de mínimo das funções para os casos 1A, 1B e 1C	122
6.20	PMDEATE ₃ para o caso 1A	123
6.21	PMDEATE ₃ para o caso 1B	123
6.22	PMDEATE ₃ para o caso 1C	124
6.23	Valores do custo e emissão pela programação por metas para PMDEATE ₃	125
6.24	Soluções de mínimo das funções para os casos 1A, 1B e 1C	126
6.25	PMDEATE ₃ - PV para o caso 1A	126
6.26	PMDEATE ₃ - PV para o caso 1B	127
6.27	PMDEATE ₃ - PV para o caso 1C	127
6.28	Valores do custo e emissão pela programação por metas para PMDEATE ₃ - PV	128
6.29	Soluções de mínimo das funções para os casos 1A, 1B e 1C	130
6.30	PMDEATE ₃ - PPV para o caso 1A	130
6.31	PMDEATE ₃ - PPV para o caso 1B	131
6.32	PMDEATE ₃ - PPV para o caso 1C	131
6.33	Valores do custo e emissão encontrados pela programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C	132
B.1	Dados dos geradores termoeletrônicos	153
B.2	Dados dos geradores eólicos	153

Lista de abreviaturas e siglas

AG - Algoritmo Genético

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

COA - Coyote Optimization Algorithm

fdp - função de densidade de probabilidade

FDP - função de distribuição de probabilidade

GPBNI - Generalized piecewise normal boundary intersection

GWEC - Global Wind Energy Council

MRCP - Método de restrições canalizadas progressivas

NSGA-II - Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

PMDEATE - Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico

PMDEATE_b - Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com variáveis binárias

PMDEATE₃ - Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 03 objetivos

PMPRCP - Programação por metas ponderadas com restrições canalizadas progressivas

SMODE - Summation based multi-objective differential evolution

SIN - Sistema Interligado Nacional

WECS - Wind Energy Conversion Systems

Sumário

1. Introdução	27
1.1 Revisão bibliográfica - despacho econômico e produção eólica	30
1.2 Organização da Tese	32
2. Geração de energia elétrica	33
2.1 Energia eólica	34
2.1.1 A produção de energia eólica	34
2.1.2 A energia eólica no mundo	37
2.1.3 A energia eólica no Brasil	39
2.2 Energia termoeletrica	43
2.2.1 Aspectos econômicos da geração de energia termoeletrica	44
2.2.2 Aspectos ambientais da geração de energia termoeletrica	46
3. Funções objetivo do problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico	47
3.1 Funções associadas as unidades eólicas	47
3.1.1 Função Gama	48
3.1.2 Função de distribuição de probabilidade de <i>Weibull</i>	49
3.1.3 Caracterização da velocidade do vento	53
3.1.4 Funções custo associados a geração de energia eólica	57
3.2 Funções associadas as unidades termoeletricas	60
3.2.1 Função de custos de combustíveis	60
3.2.2 Função de emissão de poluentes	63

3.3	Funções de despacho econômico e ambiental termo-eólico com inserção de variáveis binárias	64
4.	<i>Problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico</i>	67
4.1	Notação utilizada na formulação dos PMDEATE	68
4.2	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 2 objetivos	69
4.2.1	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico - PMDEATE	69
4.2.2	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com ponto de carregamento de válvula - PMDEATE - PV . .	70
4.2.3	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula - PMDEATE - PPV	72
4.3	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 2 objetivos e inserção das variáveis binárias	73
4.3.1	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com a inserção das variáveis binárias e representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula - PMDEATEb - PPV	74
4.4	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 3 objetivos	74
4.4.1	Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula - PMDEATE ₃ - PPV	75
5.	<i>Metodologia de resolução de problemas multiobjetivo</i>	77
5.1	Método de restrições canalizadas progressivas	79
5.2	Métodos de pontos interiores	81
5.3	Programação por metas	82
5.4	Programação por metas ponderadas	86
5.4.1	Formulação do PMDEATE - PPV	86
5.4.2	Formulação do PMDEATEb - PPV	87

5.4.3	Formulação do PMDEATE ₃ - PPV	88
5.5	Programação por metas ponderadas com restrições canalizadas progressivas (PMPRCP)	89
5.5.1	Formulação do PMDEATE - PPV por PMPRCP	90
6.	<i>Resultados</i>	93
6.1	Resolução dos problemas com 2 objetivos	95
6.1.1	Resultados para o PMDEATE	95
6.1.2	Resultados para o PMDEATE - PV	99
6.1.3	Resultados para o PMDEATE - PPV	105
6.2	Resolução dos problemas com 2 objetivos e com a inserção das variáveis binárias	111
6.2.1	Resultados para o PMDEATEb	111
6.2.2	Resultados para o PMDEATEb - PV	115
6.2.3	Resultados para o PMDEATEb - PPV	118
6.3	Resolução dos problemas com 3 objetivos	122
6.3.1	Resultados para o PMDEATE ₃	122
6.3.2	Resultados para o PMDEATE ₃ - PV	125
6.3.3	Resultados para o PMDEATE ₃ - PPV	129
7.	<i>Conclusões</i>	135
	<i>Referências</i>	137
	<i>Apêndice</i>	147
A.	<i>Terminologia dos problemas multiobjetivo</i>	149
B.	<i>Dados utilizados</i>	153

Introdução

Atualmente a questão energética tem sido um dos maiores problemas mundiais, pois grande parte da energia elétrica utilizada é de fonte não renovável, isto é, os recursos não podem ser repostos em um prazo hábil e uma nova fonte de matéria prima pode demorar milhares ou milhões de anos para estar disponível novamente. Assim, tem-se buscado as fontes de energia renováveis como a energia eólica, solar e de biomassa. A geração de energia eólica tem apresentado um crescimento por ser uma fonte renovável, limpa e eficiente de energia, associada a poucos efeitos ambientais.

Essa geração de energia é obtida pela ação do vento nas pás da turbina eólica, que ao girar, dão origem à energia mecânica e acionam o rotor do aerogerador, que posteriormente produz eletricidade. As primeiras tentativas de geração de eletricidade através da energia eólica ocorreram no final do século XIX, mas somente depois da crise do petróleo (na década 70) houve o investimento e desenvolvimento de equipamentos de geração de energia eólica em escala comercial e até o ano de 2020, estima-se que o planeta terá 12% da geração de energia proveniente da energia eólica (ANEEL (2002)).

No Brasil a geração eólica ocupa a 2^a posição na matriz energética onde o maior potencial eólico brasileiro está localizado na região Nordeste. Um dos maiores incentivos para a produção da energia eólica é a possibilidade de complementar com a geração hidrelétrica, que para esta região, nos períodos de menor disponibilidade hídrica, faz com que a demanda local continue sendo atendida. A escolha desse tipo de fonte energética apresenta algumas vantagens: as unidades eólicas têm custos de operação e manutenção menores que as outras fontes de energia, mesmo tendo custo inicial elevado em comparação com outras fontes; locais onde são instalados os parques eólicos podem ser utilizadas também para outros meios (agricultura e criação de gado); baixo impacto ambiental e diminuição

da necessidade de construção de reservatórios hídricos, reduzindo o risco de falta de água nos períodos de seca (sazonalidade hidrológica) (Rocha et al. (1999)). Como o impacto ambiental para a instalação dos parques eólicos é baixo e a região pode continuar sendo utilizada para outras atividades, o aumento da produção de energia eólica tem auxiliado significativamente na redução da emissão dos gases poluentes. De acordo com Boletim Anual de Geração Eólica, em 2016 foram evitadas a emissão de 17,81 milhões de toneladas de gases poluentes e segundo a ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica), em 2017 essa redução atingiu mais 20 milhões de toneladas.

Na geração de energia termoeletrica, os problemas de despacho de geração são utilizados para calcular a geração com base nos aspectos econômicos e ambientais, respeitando o atendimento da demanda de energia e as restrições operacionais dos geradores. O despacho econômico e ambiental para o sistema de geração termoeletrica tem como objetivo minimizar, respectivamente, o custo dos combustíveis e a emissão dos poluentes, os quais ocorrem através da queima de combustíveis fósseis, sujeitos à restrições operacionais do problema. A minimização dos custos de geração e da emissão dos poluentes na geração da energia termoeletrica são dois objetivos conflitantes entre si.

A produção de energia eólica tem como objetivo minimizar os custos de geração, porém como esses custos estão relacionados a fatores climáticos, tais como a velocidade dos ventos, que é uma variável aleatória, este deve ser tratado de forma probabilística e estocástica. Assim, o modelo é estocástico por conta da influência do comportamento do vento, que apresenta variação de velocidade em intervalos curtos de tempo. Devido a este fato, nos modelos que analisam a produção eólica de energia, a função de distribuição de probabilidade de *Weibull* é considerada, por sua capacidade de fazer previsões de ventos utilizando pouca quantidade de dados.

Neste trabalho é proposto um modelo matemático baseado na combinação do despacho econômico e ambiental das usinas termoeletricas e na produção das unidades eólicas definindo assim um modelo multiobjetivo, que minimiza simultaneamente os custos de produção e a emissão dos gases poluentes, atendendo a uma demanda de produção determinada e restrições operacionais dos geradores termoeletricos e eólicos. A junção desses problemas em um único modelo é denominada de Problema Multiobjetivo de Despacho Econômico e Ambiental Termo-Eólico, abreviada por PMDEATE. O PMDEATE, inicialmente formulado com 2 objetivos também foi modelado considerando 3 objetivos, a função

custo dos combustíveis, a função custo dos geradores eólicos e a função custo de emissão de poluentes separadamente denominado assim o PMDEATE₃ e como um problema de programação binária mista onde a resolução deste problema determina quantas e quais unidades geradoras entrarão em operação para o atendimento da demanda prevista. Esse problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com variáveis binárias é denominado PMDEATEb.

A metodologia determinística proposta para a resolução do PMDEATE explora métodos de solução de problemas multiobjetivo, o Método de Restrições Canalizadas Progressivas (MRCP) desenvolvidos em Santos (2016) e Gonçalves et al. (2019), e a técnica de Programação por Metas (PMP) em Jones e Tamiz (2010) e Charnes et al. (1955), os quais são utilizados em conjunto com métodos de pontos interiores desenvolvidos, entre outros, em Mehrotra (1992) e Bertsekas (1999), disponibilizados no *software GAMS*, para a resolução do problema em destaque.

O MRCP transforma o problema original em um conjunto de subproblemas mono-objetivos, mantendo uma das funções como objetivo do problema, acrescentando a outra função objetivo nas restrições sendo limitada superiormente e inferiormente, onde as resoluções dos subproblemas foi realizada explorando a técnica MRCP.

A técnica PMP possibilita a determinação de soluções de compromisso do problema, as quais são definidas a partir de parâmetros de peso que estabelecem quais das metas tem maior ou menor importância. Baseando-se nas técnicas MRCP e PMP foi proposto neste trabalho uma nova técnica denominada de Programação por Metas Ponderadas com Restrições Canalizadas Progressivas (PMPRCP).

Os objetivos principais deste trabalho são: (1) a formulação de um problema multiobjetivo PMDEATE e suas variações PMDEATE₃ e PMDEATEb; (2) a utilização da metodologia de técnicas determinísticas e multiobjetivo MRCP e PMP para a resolução do PMDEATE; (3) a proposição da nova técnica PMPRCP obtida através do MRCP e PMP, a qual será explorada à resolução do PMDEATE e PMDEATEb.

No que segue, são citados os principais trabalhos divulgados na literatura, com modelos que abordaram o despacho econômico e produção eólica, aos quais os modelos propostos neste trabalho foram baseados.

1.1 Revisão bibliográfica - despacho econômico e produção eólica

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura que utilizam um modelo similar ao PMDEATE, abordam modelos que não são multiobjetivos e não utilizam métodos determinísticos para sua resolução, o qual é um dos objetivos centrais deste trabalho. A seguir destacamos os principais trabalhos encontrados e explorados neste.

Em Qu et al. (2016), é proposto um modelo multiobjetivo, o qual minimiza as funções custo dos combustíveis e emissão de poluentes dos geradores termoeletricos e as restrições do modelo são a geração das unidades termoeletricas e eolicas que devem atender a demanda e as perdas de transmissão de energia, a capacidade de reserva do sistema e os limites de produção dos geradores termoeletricos. Para resolução do modelo foram utilizados os métodos heurísticos NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) baseado no conceito de dominância e preservação da diversidade da curva de soluções e o método SMODE (*Summation based multi-objective differential evolution*), o qual é um método heurístico, para resolução de problemas multi-objetivos baseado em algoritmos de evolução diferencial. Uma outra abordagem de um modelo multiobjetivo apresentado em Zhang et al. (2018) apresenta três funções objetivos: a função custo apresentada em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008), que soma a função custo de combustíveis dos geradores termoeletricos e função custo dos geradores eolicos, a função custo de emissão de poluentes e a função de perdas na rede de transmissão onde as restrições estão relacionadas ao balanço de energia e restrição de segurança. O problema multiobjetivo é transformado em subproblemas mono-objetivos, que são resolvidos por uma nova abordagem do algoritmo de evolução diferencial denominada por GPBNI (*Generalized Piecewise Normal Boundary Intersection*), onde a comparação dos seus resultados são feitos com outros trabalhos encontrados na literatura.

Em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008) foi proposto um modelo de despacho econômico termoeletrico e eólico com o objetivo de minimizar os custos dos combustíveis das usinas termoeletrica e os custos de geração eólica, os quais são considerados de forma conjunta, atendendo a uma demanda e respeitando os limites operacionais dos geradores termoeletricos e eolicos. No artigo citado, a consideração conjunta das funções custo de geração termoeletrico e eólico e a desconsideração da função de emissão de poluentes no modelo proposto, permitiu aos autores solucioná-lo como um problema mono-objetivo. Não foi

apresentada propriamente a resolução do despacho econômico devido às integrais definidas que aparecem na função eólica, mas uma explicação de alguns casos distintos relacionados aos coeficientes de custo associadas a estas integrais, apresentando o comportamento dos geradores eólicos e termoeletricos em relação à variação destes.

Em Güvenç e Kaymaz (2019), assim como em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008) também é proposto um modelo de despacho econômico termoeletrico e eólico com o objetivo de minimizar os custos dos combustíveis das usinas termoeletricas e os custos de geração eólica de forma conjunta, atendendo a uma demanda, com a inserção das perdas na transmissão do sistema elétrico de potência. A resolução foi feita pelo COA (*Coyote Optimization Algorithm*), que é um novo algoritmo heurístico baseado na inteligência da população e do enxame, em que a principal inspiração é o comportamento dos coiotes. Seus resultados foram comparados com resultados de Algoritmo Genético (AG) e o algoritmo de enxame de partículas.

Outra abordagem de um modelo multiobjetivo apresentado em Zhang et al. (2018) apresenta três funções objetivos: a função econômica apresentada em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008), que soma a função custo dos geradores termoeletricos e eólicos, a função emissão de poluentes e a função de perdas na rede de transmissão na qual as restrições estão relacionadas ao balanço de energia e restrição de segurança. O problema multiobjetivo é transformado em subproblemas mono-objetivos, que são resolvidos por uma nova abordagem do algoritmo de evolução diferencial denominada por GPBNI (*generalized piecewise normal boundary intersection*), onde a comparação dos seus resultados são feitos com outros trabalhos encontrados na literatura.

As preocupações com a questão ambiental e econômica na produção de energia são recentes de acordo com Rajagopalan et al. (2019), Zhu et al. (2019) e Singh e Mishra (2019). De acordo com Zhu et al. (2019), devido à aleatoriedade da produção de energia eólica é mais complicado utilizá-la em um problema de otimização, por conta da questão da estocasticidade do problema devido a velocidade dos ventos. Uma forma de tratar a estocasticidade do problema é transformá-lo em um problema determinístico equivalente, como encontrado em Yin & Zhao (2019), que transforma-o em um problema de programação inteira misto. Para problemas multiobjetivos, uma das estratégias em sua estrutura é mesclar dois objetivos em uma função objetivo única usando o método da soma ponderada, conforme utilizado em El Sehiemy, Rizk e Attia (2019).

O trabalho desenvolvido, cuja organização consta a seguir, baseou-se nos autores citados.

1.2 Organização da Tese

O trabalho está dividido e organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentadas as gerações de energia eólica e termoelétrica, destacando os seus aspectos técnicos, econômicos e ambientais no Brasil e no mundo.

No Capítulo 3, apresenta-se o desenvolvimento da função custo das unidades eólicas, a qual torna o PMDEATE em um modelo estocástico, devido a velocidade dos ventos ser uma variável aleatória.

No Capítulo 4 são apresentadas as abordagens para a resolução do PMDEATE, PMDEATE_b e PMDEATE₃ e a representação das perdas na transmissão.

O Capítulo 5 apresenta uma revisão do método de restrições canalizadas progressivas, o qual transforma um problema multiobjetivo em subproblemas mono-objetivo.

No Capítulo 6 os resultados obtidos para os PMDEATE's são apresentados para diferentes casos em um sistema de geração de energia. Conclui-se o trabalho com as considerações finais, as referências e os apêndices necessários à sua realização.

Geração de energia elétrica

Atualmente, o papel da geração de energia não está apenas em atender as demandas decorrentes do crescimento e expansão mundial, mas também aos problemas ambientais considerados no processo de produção de energia.

No contexto de produção de energia e impacto ambiental, a produção de energia eólica tem obtido um crescimento gradativo nos últimos anos. Por ser uma fonte de energia limpa, renovável e com impacto ambiental reduzido, é uma alternativa eficiente para suprir algumas necessidades ou desvantagens provenientes de outras fontes de energia. As desvantagens da produção de energia eólica são referentes à inconstância da velocidade dos ventos, o impacto visual que gera modificação na paisagem, impacto na migração das aves que passam pelo local e podem colidir com as pás das turbinas e o impacto sonoro devido ao constante ruído do vento com as pás. Uma das fontes de produção de energia mais utilizada no mundo é a energia termoeletrica, que representa cerca de 70% da produção mundial. Por ser a mais utilizada, principalmente pelos países desenvolvidos, os recursos naturais e meio ambiente estão sendo prejudicados pelo uso dessa fonte de energia, fazendo com que estudos e pesquisas nesta área sejam realizados para controlar essa situação e determinar meios de geração de energia que preservem o meio ambiente.

Neste capítulo, a produção da energia eólica no cenário energético mundial e brasileiro e seus aspectos econômicos e ambientais, serão descritos na Seção 2.1. Na Seção 2.2, a geração de energia termoeletrica e os aspectos econômicos e ambientais da sua geração são abordados. Os modelos propostos e investigados neste trabalho estão baseados na geração dessas duas fontes de energia.

2.1 Energia eólica

2.1.1 A produção de energia eólica

A utilização da energia eólica pela humanidade iniciou-se a partir de 1700 a.C. através da utilização dos moinhos de vento (Gash e Twele (2011)). O pioneirismo desse tipo de energia ocorreu através da moagem de grãos e bombeamento de água. Posteriormente esta foi utilizada na navegação, durante as descobertas de novos continentes, em que era explorada a energia vinda dos ventos como alternativa de eletricidade. Atualmente, a energia eólica é considerada uma fonte de energia renovável que apresenta um desenvolvimento econômico, social e ambiental promissores para a produção de energia (De Vries et al. (2007)).

O desenvolvimento das turbinas eólicas de grande porte ocorreu inicialmente na Rússia em 1931, onde um aerogerador de $100kW$ foi conectado à uma linha de transmissão de $6,3kV$ com $30km$ de extensão, a uma usina termoeétrica de $20MW$, sendo considerada a primeira tentativa bem sucedida de geração de energia eólica. A segunda guerra mundial foi outro momento que contribuiu fortemente para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, pois os países passaram a querer economizar combustíveis fósseis na geração de energia através das usinas termoeétricas. Entretanto, com o fim da segunda guerra, os combustíveis fósseis existiam em abundância e economicamente não compensava o investimento em aerogeradores, assim eles foram construídos apenas para fins de pesquisa (Dutra (2019)).

Atualmente, através de pesquisas realizadas e significativos avanços na produção da energia eólica, essa fonte de energia está crescendo e representa um bom desempenho para o atendimento da demanda existente e cada vez mais tem obtido investimentos para um melhor aproveitamento do seu potencial.

A produção de energia eólica é baseada na conversão da energia cinética em energia mecânica e é obtida através do uso de aerogeradores. Os aerogeradores são geradores elétricos integrado ao eixo de um cata-vento, que convertem energia eólica em energia elétrica. A implantação do aerogerador pode ser feita no solo ou no mar (*offshore*), onde geralmente a velocidade do vento é mais regular. Os tipos de rotores existentes são de eixo vertical e horizontal e se diferem em seu custo de produção e eficiência. A Figura 2.1 apresenta os aerogeradores de eixo vertical, que são geralmente mais caros e apresentam

desempenho inferior ao aerogerador de eixo horizontal.

Figura 2.1: Aerogerador com eixo vertical



Fonte: Energias Renováveis (2016)

Os aerogeradores mais conhecidos são os aerogeradores com eixo horizontal, que são mais utilizados pela sua maior eficiência na geração de energia elétrica em larga escala. Seus rotores podem ter 2 ou 3 pás e são popularmente conhecidos como turbinas eólicas.

Os tipos de aerogeradores encontrados são os de baixa e alta tensão, que são utilizados para uso doméstico e em parques eólicos, respectivamente. A instalação dos aerogeradores para uso doméstico é feita em habitações ou micro-indústrias, que geralmente estão localizadas distantes de uma rede de transmissão. Para o uso em parques eólicos, os quais contém centenas de aerogeradores, é feito um estudo sobre a viabilidade econômica e o impacto ambiental que eles podem causar no local que serão instalados, devido aos inconvenientes provocados pelo ruído e pela poluição da paisagem. Geralmente são instalados em áreas onde a velocidade do vento é constante para que haja uma rentabilidade econômica e suprimento de demanda de energia para o local. As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam turbinas de parques eólicos em terra e *offshore*, respectivamente.

Figura 2.2: Parques eólicos instalados em terra



Fonte: O Petróleo (2019)

Figura 2.3: Parques eólicos instaladas offshore



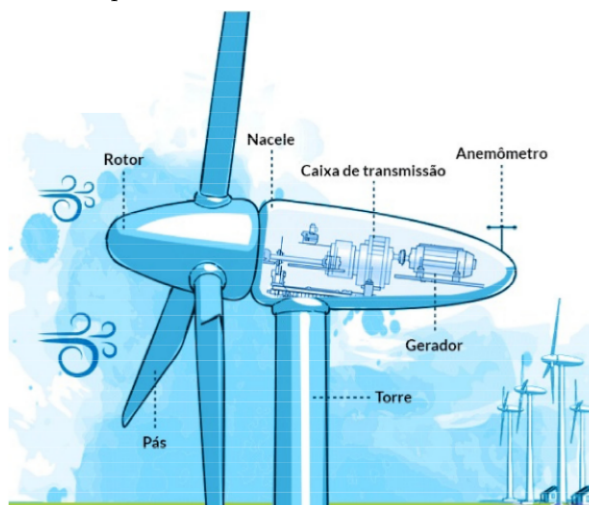
Fonte: Ambiente magazine (2016)

As turbinas eólicas são compostas basicamente pelos seguintes componentes:

- **pás:** servem para captar o vento, fazendo a conversão da potência ao centro do rotor. São construídas praticamente de materiais como o plástico e a fibra de vidro.
- **rotor:** é o elemento de fixação das pás onde se transmite o movimento de rotação para o eixo de movimento.
- **nacele:** é o compartimento instalado no alto da torre onde são abrigados os componentes como a caixa de transmissão e o gerador.
- **torre:** sustenta o rotor e a nacelle na altura apropriada para o seu funcionamento. Originalmente são de aço, mas atualmente já existem modelos em concreto e outros materiais.
- **caixa de transmissão:** transforma as rotações de baixa velocidade (19 a 30 rpm) que as pás transmitem ao eixo, produzindo rotações de alta velocidade (1.500 rpm), para que o gerador funcione.
- **gerador:** converte a energia mecânica do eixo em energia elétrica.
- **anemômetro:** mede a intensidade, a velocidade e a direção do vento, garantindo o posicionamento mais adequado para a turbina.

A Figura 2.4 ilustra esses componentes descritos.

Figura 2.4: Componentes de uma turbina eólica com eixo horizontal



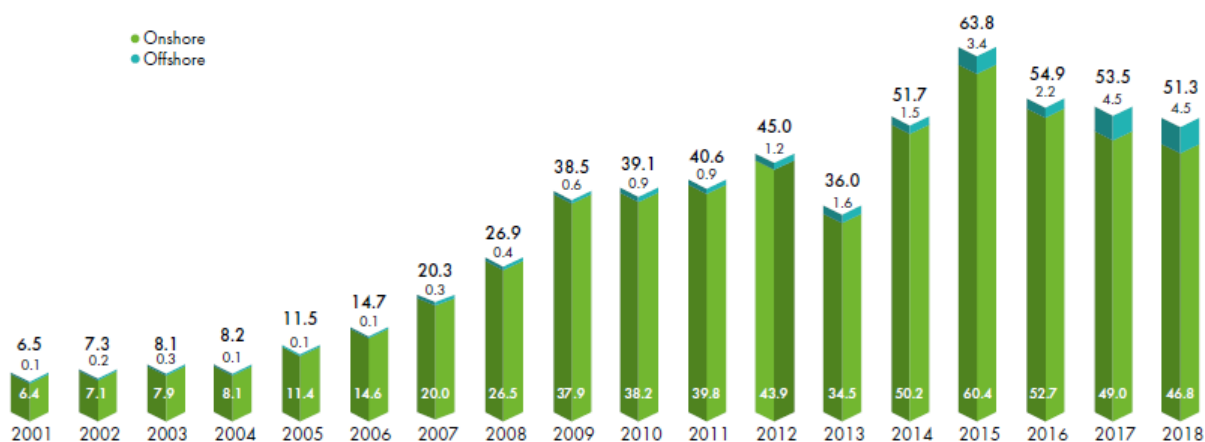
Fonte: Atlantic Energias Renováveis (2016)

Para o funcionamento de uma turbina eólica, as pás, que giram com a força do vento, fazem o eixo do rotor girar, ou seja, gerando a energia cinética do vento. Essa energia é transformada em energia mecânica e depois, através do gerador ligado ao eixo do rotor, a energia mecânica é convertida em energia elétrica. E finalmente, a energia elétrica produzida pelo parque eólico é injetada na rede elétrica.

2.1.2 A energia eólica no mundo

De acordo com os dados apresentados pela *Global Wind Energy Council - GWEC* (Conselho Global de Energia Eólica), a geração de energia eólica tem crescido mundialmente. Como essa fonte de energia é renovável e limpa, não produz a emissão de gases na atmosfera, que geram o efeito estufa, assim o impacto ambiental de instalação e geração é bem menor comparado com outras fontes de energia. Houve um crescimento mundial da capacidade instalada (em MW) a partir de novas usinas instaladas durante o anos de 2001 a 2018 (GWEC (2017)). A Figura 2.5 mostra anualmente esse crescimento representando as novas unidades geradoras de usinas eólicas instaladas naquele ano. Assim, mesmo que em alguns anos não se obteve um resultado tão expressivo quanto no ano anterior ou posterior, como no caso de 2013, houve um crescimento na capacidade eólica mundial, pois todas as barras apresentam a quantidade instalada ano após ano.

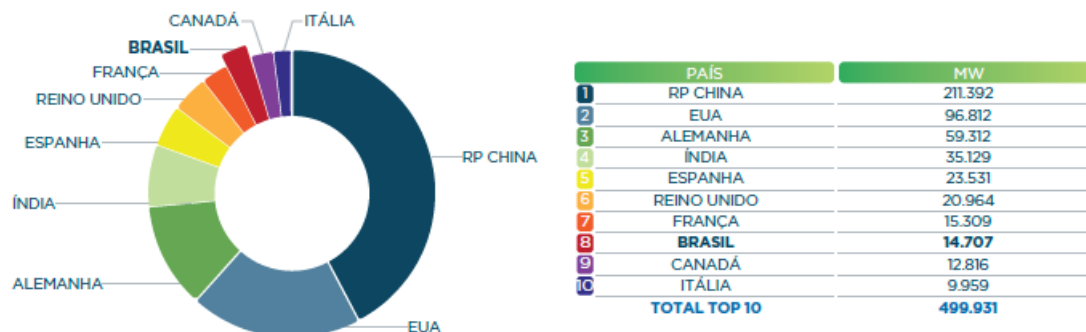
Figura 2.5: Capacidade mundial instalada de novas unidades eólicas (em MW) de 2001 a 2018



Fonte adaptada de GWEC (2018)

Desde 2009 o continente asiático apresenta a maior capacidade instalada de energia eólica, seguido pela Europa e América do Norte. No ano de 2018, a China tem se destacado como o país com maior capacidade instalada com 23000 W e também como maior produtor de energia eólica, com 211.392 MW gerados (GWEC (2018)). A Figura 2.6 mostra o *ranking* dos 10 primeiros países de acordo com a capacidade eólica acumulada em 2018 e a Tabela 2.1 apresenta os dados da capacidade instalada, (em MW) de acordo com os dados apresentados pela GWEC (2018).

Figura 2.6: Ranking dos 10 países com a capacidade instalada de novas unidades em 2018



Fonte: Boletim Anual (2018)

Tabela 2.1 - *Ranking* dos 10 primeiros países com a capacidade instalada das novas unidades em 2018

posição	país	capacidade instalada (em W)
1	China	23000
2	Estados Unidos	7588
3	Alemanha	3371
4	Índia	2191
5	Brasil	1939
6	Reino Unido	1901
7	França	1565
8	México	929
9	Suécia	720
10	Canadá	566
total	-	43770

Fonte: Boletim Anual (2018)

De acordo com a Tabela 2.1, em 2018 o Brasil está na 5^a posição dos países com novas unidades eólicas instaladas, apresentando um grande potencial eólico proveniente das suas condições climáticas e extensão territorial.

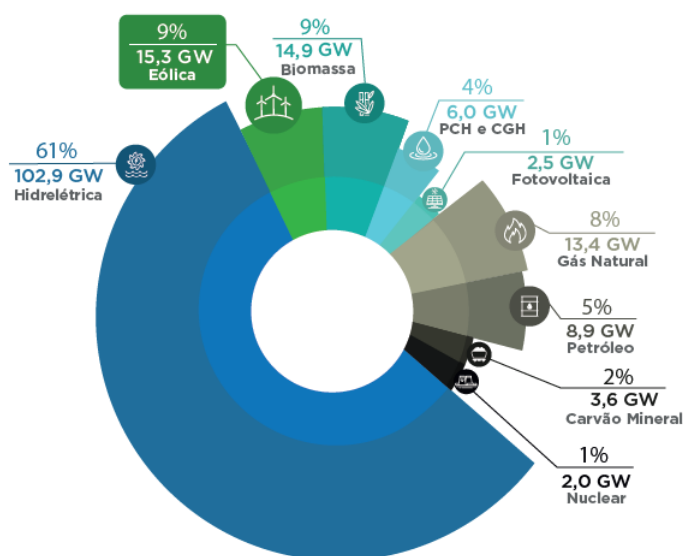
2.1.3 A energia eólica no Brasil

De acordo com o Boletim Anual (2018) o Brasil atingiu a 8^a posição no *ranking* mundial em capacidade instalada de energia eólica. A capacidade energética brasileira, fez com que a geração de energia eólica ocupasse o 2^a lugar na sua matriz energética, onde o destaque é a produção hidroelétrica, que representa 61% da matriz energética brasileira. A Figura 2.7 apresenta o cenário brasileiro da sua matriz energética para cada uma das fontes de energia.

Em 2018 a capacidade instalada no Brasil foi de 15,03 GW com 583 parques eólicos instalados distribuídos em 12 estados brasileiros, destacando as regiões Nordeste e Sul do país. A geração de energia eólica foi de 48,42 TWh, com um crescimento de 14,6% em relação ao mesmo período do ano de 2018 (InfoVento - ABEEólica (2018)).

Esses dados mostram que o potencial eólico brasileiro tem crescido significativamente e apresentado ótimos resultados no SIN (Sistema Interligado Nacional). O fator de capacidade é um termo importante na produção eólica, pois é a proporção entre a energia produzida em um determinado período e a capacidade total instalada. No Brasil o fator

Figura 2.7: Matriz energética brasileira

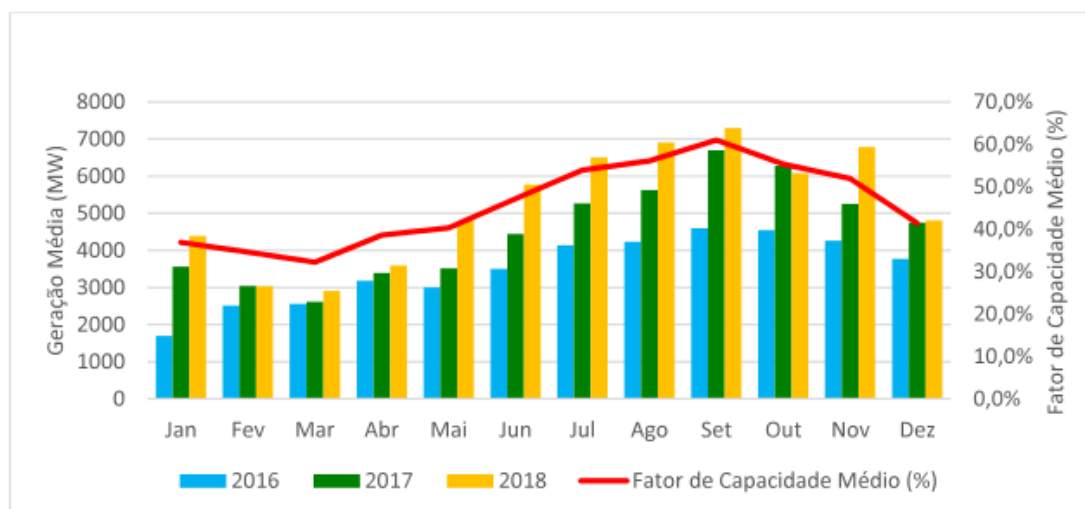


Fonte: InfoVento - ABEEólica (2019)

de capacidade médio das usinas consideradas pelo SIN foi de 34,41%, e em 2018, o valor médio foi de 42,2%.

A Figura 2.8 apresenta o aumento da capacidade instalada da geração de energia eólica no Brasil nos últimos 3 anos e o fator de capacidade, o qual é calculado como a relação entre a geração média e a potência instalada.

Figura 2.8: Geração eólica do SIN entre os anos de 2016 e 2018 (em MW médio)



Fonte: Boletim dez. 2018 - ONS (2018)

O crescimento apresentado no gráfico de barras na Figura 2.8 mostra que, não somente a capacidade instalada foi crescente no Brasil, mas também a produção desta energia dentro do SIN, desde que, os parques eólicos que foram inseridos ao SIN aumentaram, fazendo assim com que a geração de energia aumentasse. Esses parques eólicos são divididos em 3 categorias: aptos a operar, operando em teste e operando comercialmente.

O Brasil apresenta condições favoráveis para o crescimento da produção de energia eólica, onde as melhores condições estão no litoral da regiões Nordeste e Sul do país, que apresentam ventos unidirecionais, constantes e estáveis (InfoVento - ABEEólica (2018)).

Para a instalação de novas unidades, além das condições do vento, as características do local que serão instaladas é estudado. Como o território brasileiro apresenta diferentes tipos de condições topográficas (zona costeira, campo aberto, mata, morro e montanha), é necessária uma avaliação detalhada para a implantação de um novo parque eólico (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica).

Segundo a ANEEL (2015) seriam implantadas no país 486 novas usinas de energia eólica liberadas para operação comercial, entre os anos de 2015 e 2019. A Superintendência de Fiscalização dos Serviços de Geração - SFG, que tem como objetivo acompanhar e avaliar o crescimento da implantação dessas novas unidades, apresenta uma classificação para as usinas instaladas de acordo com cada fase. A Tabela 2.2 apresenta como essa classificação é realizada.

Tabela 2.2 - Classificação da viabilidade da implantação de uma usina eólica

Classificação	Critério de classificação
<i>Alta</i>	Usinas com licença ambiental de instalação vigente e obras civis em andamento, não havendo impedimentos para implantação da usina
<i>Média</i>	Usinas com obras não iniciadas ou com licenciamento ambiental não finalizado, não havendo impedimentos para implantação da usina
<i>Baixa</i>	Usinas com suspensão do processo de licenciamento ambiental ou declaração de inviabilidade ambiental, processo de revogação em análise, demandas judiciais ou graves problemas que impeçam a implantação da usina.

Durante os anos de 2019 a 2026, dentro da classificação das usinas dadas na Tabela 2.2, está prevista a instalação de 171 novas usinas com mais de 3 mil *MW* de potência instalada. A Tabela 2.3 apresenta a quantidade dessas usinas quanto à sua classificação nos anos apresentados.

As novas unidades de parques eólicos que poderão ser instalados, conforme mostra a Tabela 2.3, pode sofrer alterações quanto à quantidade de usinas e a classificação à qual ela foi colocada, mas mesmo assim o país está com ótimas perspectivas de crescimento para o setor eólico nos próximos anos.

Tabela 2.3 - Novas unidades liberadas para operação comercial e capacidade de geração

Classificação	Quantidade de usinas	2019 (em MW)	2020 (em MW)	2021 (em MW)	2022 (em MW)	2023 (em MW)	sem precisão (em MW)
Alta	41	598.80	58.00	20.00	0.00	30.00	0.00
Média	99	0.00	819.20	138.70	538.98	1007.47	0.00
Baixa	31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	561.95
Total anual	(em MW)	598.80	877.20	158.30	538.98	1037.47	561.95

Assim, por conta do crescimento da consciência mundial sobre a importância da utilização das energias renováveis e os benefícios que elas trazem ao meio ambiente, a produção de energia eólica tem ganhado destaque e papel importante no sistema de geração de energia. Para instalação de novos parques eólicos, o impacto ambiental é baixo e a região utilizada pode ser reaproveitada para outras atividades. As vantagens apresentadas por essa fonte de energia são:

- ser uma fonte renovável, possuir baixo impacto ambiental e não emitir CO_2 ;
- o local de instalação continua sendo utilizado pelo proprietário com outras atividades, como plantações ou criação de animais;
- a terra passa a ser arrendada para colocação das torres, gerando assim renda e melhoria de vida para seus proprietários;
- capacitação de mão de obra local com geração de emprego, possibilitando assim a fixação do homem no seu local de origem;
- melhor custo-benefício na tarifa de energia.

Com expressiva representação na região Nordeste do Brasil, um dos maiores incentivos do uso da energia eólica é a possibilidade de complementar a geração hidrelétrica durante o período de menor disponibilidade hídrica. As vantagens da escolha da produção de energia eólica são muitas, mas algumas desvantagens também devem ser consideradas. As

desvantagens apontadas são: a alteração da paisagem natural, poluição sonora feita pelo ruído dos rotores, interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão, celulares, entre outros), bem como nas rotas de migração de aves (Araújo (2000), Boyle (2004)).

A produção eólica dentro da matriz energética brasileira tem contribuído com a redução da emissão de CO_2 . Com o objetivo de investigar o impacto ambiental e a redução da emissão de poluentes na natureza, em comparação com a fonte termoelétrica. Na Seção 2.2 é apresentada as características da fonte termoelétrica na produção de energia e seus aspectos econômicos e ambientais.

2.2 Energia termoelétrica

A geração de energia termoelétrica é a forma mais comum de geração de energia no mundo. A maioria dos países tem essa fonte como principal meio de geração de energia elétrica, pois são mais rápidas de serem construídas e podem ser instaladas em locais próximos às estações de transmissão, reduzindo o custo com as linhas de transmissão.

Essa fonte é gerada através da produção de calor, resultante da queima de algum tipo de combustível fóssil, renovável ou não, como o carvão, óleo ou gás natural e atualmente, a biomassa. As usinas termelétricas passam a funcionar com o objetivo de transformar a água em vapor através do calor gerado na caldeira. O movimento das turbinas ocorre por causa da alta pressão do vapor, acionando assim os rotores do gerador elétrico e convertendo a energia mecânica em energia elétrica. Essa energia é conduzida às linhas de transmissão através dos cabos que saem dos terminais do gerador e vão até o transformador, passando pelas centrais que controlam e distribuem a energia produzida para ser consumida. As primeiras estações de geração termoelétrica começaram a funcionar no final do século XIX, através da queima do carvão que era a única fonte utilizada.

Segundo Matsumura (2003), mesmo com as usinas hidrelétricas sendo a fonte de energia mais utilizada no Brasil, na década de 90 foram criados incentivos ao investimento privado esperando um crescente número de usinas termoelétricas.

No Brasil, a geração de energia termoelétrica à carvão não foi considerada expressiva, pois as características do carvão nacional é de baixa qualidade, limitando a sua aplicação para geração de energia elétrica. Com a importação do gás natural da Bolívia, a geração

termoelétrica a gás no país cresceu, pois metade do gás boliviano é empregado na geração de energia elétrica (Silva (2014)). Nos lugares onde a fonte de energia hidráulica não supre a necessidade demandada, as usinas termelétricas tem operado com sua capacidade máxima, mas quando a situação hidrológica é favorável, o despacho das usinas termoelétricas passa a ser mínimo, atendendo apenas os limites de operação (ANEEL (2015)).

Como qualquer fonte de energia, a geração de energia termoelétrica apresenta vantagens e desvantagens. Uma vantagem econômica está relacionada à construção e implantação simples e rápidas quando comparada às usinas hidrelétricas, podendo ser instaladas próximas dos centros consumidores, o que diminui as perdas e gastos com a transmissão da energia elétrica produzida. Uma vantagem da utilização dessa fonte de energia no âmbito social, é a utilização em regiões isoladas do país não alcançadas pelo SIN (Stan-zani (2012)). O custo elevado dos combustíveis fósseis e emissão de gases na atmosfera são as principais desvantagens apresentadas na geração da energia termoelétrica.

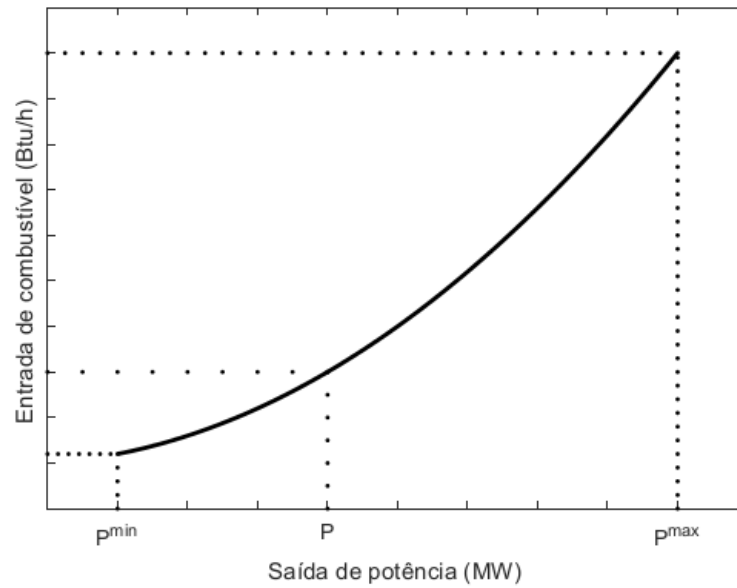
2.2.1 Aspectos econômicos da geração de energia termoelétrica

A geração de uma unidade termoelétrica é realizada através da conversão da energia termoelétrica em energia mecânica e, conseqüentemente, energia mecânica em energia elétrica. A transformação da energia mecânica em energia elétrica é feita através de algum fluido que produzirá trabalho nas turbinas termoelétricas, ligadas a um gerador. O processo de geração de energia consiste na queima de algum combustível fóssil, que transforma a água em vapor utilizando calor, e através da alta pressão deste vapor, giram as turbinas que acionam o gerador elétrico. O vapor é condensado retornando a água na caldeira e finalizando assim o ciclo.

Segundo Miller (1987), a relação entre a entrada de combustível e a saída de energia elétrica permite a obtenção de curvas de entrada-saída, que expressam a eficiência das unidades termoelétricas. Essas curvas são obtidas através de cálculos de projetos ou testes de taxa de calor. Conforme a Figura 2.9, essas curvas de entrada-saída são convexas e suaves, mas essa suavização não ocorre quando os testes de taxa de calor são utilizados para determinar a curva (Silva (2014)).

Para determinar o custo dos combustíveis empregados na geração de energia termoelétrica, pode ser realizada uma conversão da entrada de combustível, considerando a curva de entrada-saída de combustível na Figura 2.9, multiplicando a entrada de com-

Figura 2.9: Curva de entrada-saída idealizada



Fonte adaptada de Silva (2014)

bustível, dada em Btu/h , pelo equivalente custo de combustível, dado em $\$/Btu$, onde $\$$ representa a unidade monetária. Tendo em vista que o carregamento das unidades geradoras afeta o custo dos combustíveis, considera-se que exista uma função que relaciona o custo e a potência gerada.

De acordo com Silva (2014), o custo do combustível de uma unidade termoeletrica é considerado instável e controlado pelos operadores do sistema, podendo variar de acordo com as taxas de combustíveis, pelos requisitos diários de carga e/ou até pela compra e venda de energia. Essa instabilidade faz com que os responsáveis pela operação do sistema não tenham um controle total dos custos, por conta da variação dos diferentes fatores relacionados a ele. O carregamento das usinas termoeletricas afeta diretamente o custo dos combustíveis, assim uma função de custo que relaciona o custo e a potência gerada, é apresentada no Capítulo 3, onde a função relacionada ao problema proposto tem como objetivo minimizar o custo dos combustíveis fósseis utilizados na geração de energia termoeletrica.

2.2.2 Aspectos ambientais da geração de energia termoelétrica

Como a preocupação com os aspectos ambientais tem aumentado nos últimos anos e sido uma das maiores preocupações mundiais, a produção de energia passou a utilizar e desenvolver processos de fontes sustentáveis oriundos de recursos renováveis (Jannuzzi e Swisher (1997)). Os gases que são liberados na queima dos combustíveis são: o dióxido de enxofre (SO_2), que presente na atmosfera produz o ácido sulfúrico, que está diretamente relacionada à elevação da acidez das chuvas; os óxidos de nitrogênio (NO_x), que baixa o pH da chuva, neblina e neve, ameaçando a vida aquática e das plantas de todo o planeta e o dióxido de carbono (CO_2) que pode causar danos à vida dos humanos, à flora, à fauna, aos recursos hídricos e mudanças climáticas em proporções mundiais.

Foram desenvolvidas tecnologias para reduzir a quantidade de poluentes emitidos no processo de geração de energia, destacando-se o problema de despacho ambiental. A função de custo de emissão dos poluentes, que será utilizada na formulação do modelo proposto, é apresentada no Capítulo 3, cujo objetivo é minimizar a quantidade de poluentes emitidos na geração de energia das usinas termoelétricas.

Devido as desvantagens em relação ao uso das usinas termoelétricas, principalmente relacionado ao impacto ambiental, neste trabalho é investigado um problema multiobjetivo envolvendo aspectos econômicos e ambientais na produção de energia. O problema de despacho econômico e ambiental termo-eólico será apresentado no Capítulo 4. Este tem o objetivo de minimizar os custos de produção de energia eólica em conjunto com o custo dos combustíveis de produção de energia termoelétrica e minimizar a emissão dos poluentes que ocorrem através da queima de combustíveis fósseis.

A função custo das unidades eólicas, função custo de combustíveis e função emissão de poluentes de energia termoelétrica serão apresentadas no Capítulo 3.

Funções objetivo do problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico

Neste capítulo serão apresentadas as funções objetivo do PMDEATE. Na seção 3, a função associada ao custo das unidades eólicas é baseada em uma função de distribuição de probabilidade de *Weibull*, que é uma variante da distribuição de probabilidade Gama. As outras funções, que compõem o despacho econômico e ambiental de geração de energia termoeletrica são apresentadas na Seção 3.2, as quais são a função custo dos combustíveis (com e sem a inserção de pontos de carregamento de válvula) e a função emissão de poluentes.

3.1 Funções associadas as unidades eólicas

O modelo das unidades eólicas que caracteriza a produção de energia tem como objetivo minimizar os custos de geração de energia. A velocidade dos ventos é uma variável muito importante, mas como apresenta alterações em curtos intervalos de tempo é considerada uma variável aleatória, tornando o modelo estocástico.

Um estudo do potencial eólico do local de instalação das usinas é realizado através de um levantamento das características da velocidade média do vento, permitindo assim determinar quais os modelos probabilísticos vão reproduzir dados mais consistentes.

A distribuição de probabilidade de *Weibull* é a mais utilizada para caracterização das curvas de frequência de velocidade do vento devido a sua representação gráfica simples e a função de densidade de probabilidade variante da distribuição de probabilidade Gama (Silva (2003), Gabriel et al. (2011)).

Para o desenvolvimento do modelo das usinas eólicas foi estudada a função de proba-

bilidade Gama, a função de distribuição de probabilidade de *Weibull*, a caracterização da velocidade do vento e as funções custo associadas a geração de energia eólica.

3.1.1 Função Gama

A função densidade de probabilidade gama ($f_X(x)$) é representada da seguinte forma:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\lambda x) x^{\alpha-1} & x \geq 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.1)$$

em que:

- α é o parâmetro de forma ($\alpha > 0$), que indica o formato da curva;
- λ é o parâmetro de escala ($\lambda > 0$), que indica o escalonamento da curva, ou seja, o quanto ela “estica” ou “encolhe” para cima (eixo y).

A função Gama $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty \exp(-u) u^{\alpha-1} du$ é definida através de uma integral imprópria. Se α for um número inteiro, ela pode ser considerada uma generalização da expressão fatorial $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$

A representação gráfica da função Gama tem um comportamento incomum, de tal forma que a sua representação para valores $x < 0$ implicam em uma forma descontínua desta, assim não será considerada nas Figuras 3.1 e 3.2, que mostram o comportamento da função gama apenas para os números positivos, os quais são de maior interesse para este trabalho.

Figura 3.1: Parâmetro λ fixo

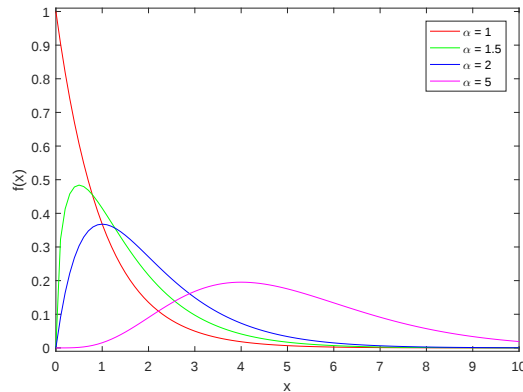
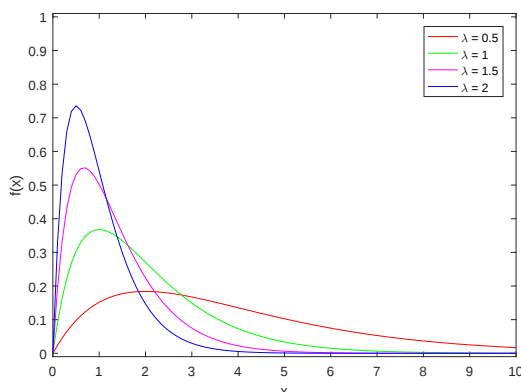


Figura 3.2: Parâmetro α fixo

Na Figura 3.1 é apresentado, no primeiro caso, o comportamento da função gama primeiramente com o parâmetro λ fixo e variação do parâmetro α . Nota-se que no segundo caso, na Figura 3.2, o parâmetro α foi fixado e o parâmetro λ variou. Quanto maior o valor de λ , mais rapidamente a função de densidade de probabilidade gama tende a zero (Alves (2006)).

O sistema de conversão de energia eólica, o qual será indicado utilizando-se a sigla *WECS* (*Wind Energy Conversion Systems*) apresentado em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008) utiliza a função de distribuição de probabilidade de *Weibull* para a análise do aproveitamento da energia eólica.

3.1.2 Função de distribuição de probabilidade de *Weibull*

A função de distribuição de *Weibull* tem um campo vasto de aplicação e abrange as áreas da física, biologia, saúde, entre outros, apresentando diversas aplicações tais como: magnitude de terremotos (Huillet e Raynaud (1999)), dinâmica de biomassa da folhagem do pinheiro escocês (Fleming (2001)) e incidência do câncer de pulmão em fumantes (Whittemore e Altshuler (1976)). Devido a necessidade de assegurarem a confiabilidade dos dados, a análise de Weibull aparece como uma importante e poderosa ferramenta para o uso da distribuição de velocidades do vento (Al-Hasan e Nigmatullin (2003), Nascimento et al. (2018)).

A função de densidade de probabilidade (fdp) de Weibull é um caso particular da função densidade de probabilidade gama, pois esta utiliza dois parâmetros para o cálculo da distribuição da velocidade do vento, e é representada por:

$$fV(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{c}\right)^k, \quad 0 < v < \infty \quad (3.2)$$

em que:

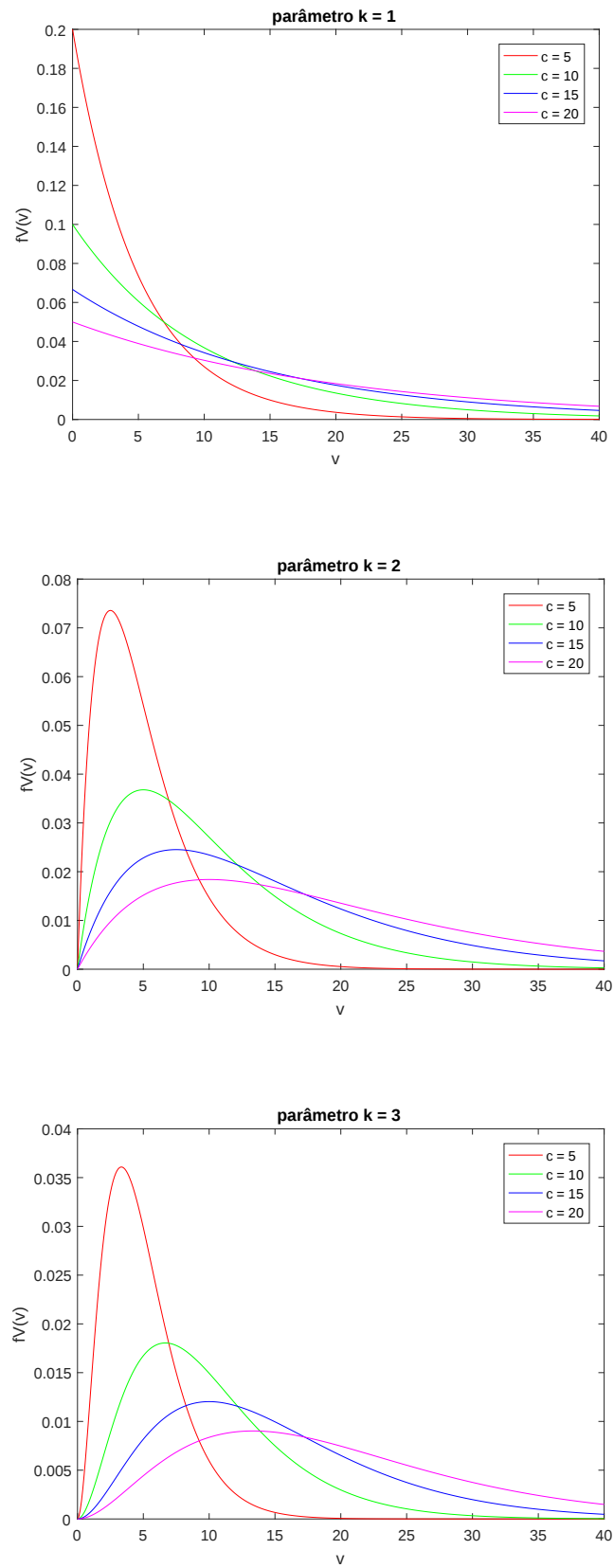
- v : velocidade do vento;
- c : fator de escala de um local (com unidade de medida igual ao da velocidade do vento);
- k : fator de forma de um local (adimensional).

O fator de escala c apresentado em 3.2 está diretamente relacionado com a velocidade média do vento e classifica a velocidade do vento onde a usina eólica está instalada. Sua alteração influencia no valor de pico da curva da distribuição, como é visto na Figura 3.3. O fator de forma k refere-se à uniformidade da distribuição dos valores da velocidade do vento e é conhecido como a inclinação da distribuição (Rocha et al. (2012)).

Diferentes valores do parâmetro de forma k podem indicar efeitos no comportamento da distribuição. De certa forma, alguns valores atribuídos a este parâmetro farão com que as funções de distribuição de *Weibull* se reduzam a outras funções de distribuição. Para $k = 1$, a função (3.3) é conhecida como distribuição exponencial e para $k = 2$ esta mesma função é conhecida como função de distribuição de *Rayleigh*, que foi muito usada na Europa e Estados Unidos, pois representa eficientemente dados de velocidade do vento em locais de média-alta latitude. No Brasil, os dados de velocidade do vento são melhores representados pela distribuição de *Weibull* (Rocha et al. (2012)).

A Figura 3.3 ilustra esta função para diferentes valores de c e k .

Figura 3.3: Função densidade de probabilidade de Weibull



A utilização da função (3.2) no *WECS* é dada através da função de distribuição de probabilidade (FDP):

$$FV(v) = \int_0^v fV(\Gamma) d\Gamma = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.3)$$

A função (3.3) apresenta um bom ajuste nos dados da velocidade do vento e os parâmetros c e k podem ser estimados com a utilização de diferentes métodos, como por exemplo: análise por mínimos quadrados para a distribuição observada, método de velocidades de vento média e quartis e método da correlação de k com velocidade média (Silva (2003)).

Segundo Silva (2003), o método dos momentos é uma das técnicas mais utilizadas na estimativa dos parâmetros da função densidade de probabilidade de *Weibull* e baseia-se na iteração numérica da velocidade média e no desvio padrão da velocidade (Chagg (2011), Pishgar-Komleh et al. (2015)). Através deste método os parâmetros c e k são calculados para uma coleção de dados da velocidade do vento feitas ao longo de um período de tempo (Kwon (2010)), como em (3.4):

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad \text{e} \quad c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3.4)$$

onde:

- $\bar{V}$: é a velocidade média do vento no período considerado.
- σ_v : é o desvio padrão da velocidade do vento.

Devido às características da velocidade do vento, a função de distribuição das usinas eólicas no *WECS* se tornará função de distribuição discreta ou contínua. Isso ocorre devido a uma transformação, onde é realizada uma análise para determinar a potência de saída de geração de energia, a qual será explorada na Seção 3.1.3.

3.1.3 Caracterização da velocidade do vento

Para determinar a potência saída de geração do sistema é realizada uma transformação linear da função de densidade de probabilidade (3.2) em relação à velocidade do vento (m/s), apresentada a seguir:

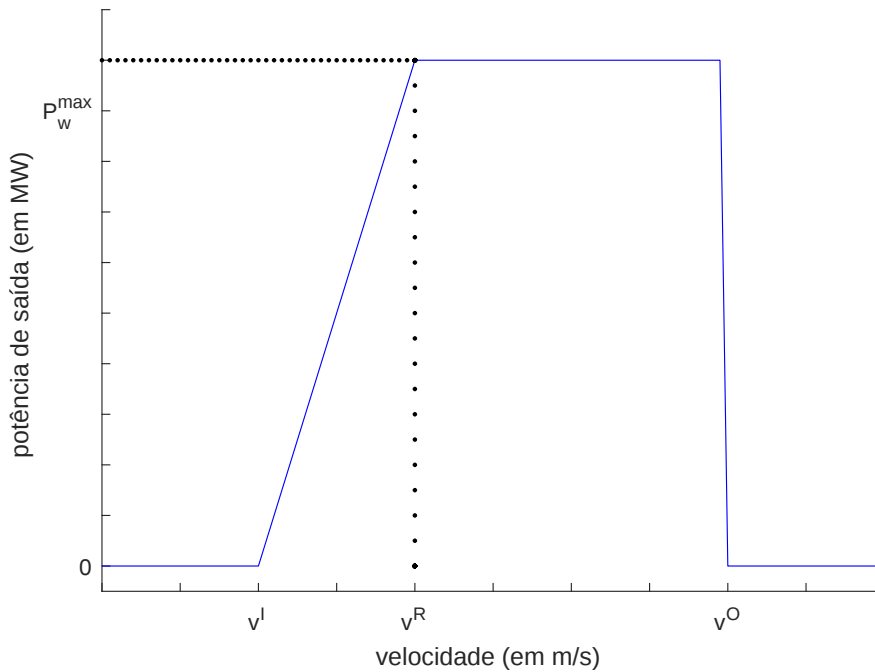
$$P_w = \begin{cases} 0 & , para \quad v < v^I \text{ e } v > v^O \\ P_w^{max} \frac{(v - v^I)}{(v^R - v^I)} & , para \quad v^I \leq v \leq v^R \\ P_w^{max} & , para \quad v^R \leq v \leq v^O \end{cases} \quad (3.5a)$$

$$(3.5b)$$

$$(3.5c)$$

A Figura 3.4 mostra como a variação da velocidade do vento determina a potência de saída de energia gerada de acordo com as equações (3.5a), (3.5b) e (3.5c).

Figura 3.4: Comportamento da potência em relação a velocidade do vento



De acordo com a Figura 3.4, consideramos que alguns limitantes de velocidade do vento são necessários para que o gerador eólico realize a produção de energia. Inicialmente não temos uma potência de saída de energia gerada, pois para que as turbinas iniciem o seu

funcionamento é necessário atingir uma velocidade inicial (v^I). Quando a velocidade do vento está entre a velocidade inicial (v^I) e a velocidade nominal (v^R), essa relação é linear, onde a potência gerada aumenta gradativamente até atingir a sua potência nominal (P_w^{max}). A velocidade v^R é determinada velocidade nominal por causa da potência nominal (P_w^{max}) que representa o limite da capacidade do gerador eólico. A potência nominal permanece constante entre os intervalos da velocidade nominal (v^R) até atingir a velocidade de corte (v^O), que serve para cessar a produção de energia do gerador eólico, a fim de evitar danos estruturais nas turbinas. A potência de saída (P_w) para o *WECS* é uma variável aleatória mista, pois é contínua na faixa de velocidade de vento dada na equação (3.5b) e uma variável discreta nas faixas de velocidade de vento dadas nas equações (3.5a) e (3.5c). A representação desta função para o caso discreto, não explorado neste trabalho pode ser vista em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008).

Utilizando a função (3.3) de distribuição de probabilidade da velocidade do vento, é necessário uma transformação dessa distribuição para que se torne compatível para o *WECS*, ou seja, a função é transformada para não depender mais da incidência da velocidade do vento e considerar somente sua expressão em relação à potência de saída dos geradores eólicos.

De acordo com Bailey & Dell (1973), o método de regressão linear é o método mais simples de ser utilizado na linearização da função (3.3), a qual é dada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 FV(v) &= 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \\
 1 - FV(v) &= \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \\
 \ln\{1 - FV(v)\} &= \ln\left\{\exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)\right\} \\
 \ln\{1 - FV(v)\} &= -\left(\frac{v}{c}\right)^k \\
 -\ln\{1 - FV(v)\} &= \left(\frac{v}{c}\right)^k \\
 \ln\{-\ln\{1 - FV(v)\}\} &= \ln\left(\frac{v}{c}\right)^k \\
 \ln\{-\ln\{1 - FV(v)\}\} &= k \ln v - k \ln c
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Escrevendo na forma linear a função (3.6), temos:

$$W(V) = T(V) = aV + b$$

onde:

W : variável aleatória de energia eólica, dada por: $W = \ln \{-\ln \{1 - FV(v)\}\}$

a : coeficiente angular, dado por: $a = k$

V : variável aleatória de velocidade do vento, dado por: $V = \ln v$

b : coeficiente linear, dado por: $b = -k \ln c$

A função de distribuição de probabilidade para o *WECS* no intervalo contínuo terá como variáveis a velocidade inicial (v^I), velocidade nominal (v^R), potência nominal (P_w^{max}) e a potência de saída de energia gerada (P_w). A função descrita em (3.9), não apresenta em sua formulação a velocidade do vento como uma variável aleatória. Da equação (3.5b), podemos escrever a variável v como:

$$\begin{aligned} v &= v^I + \frac{P_w}{P_w^{max}} (v^R - v^I) = v^I + \rho (v^R - v^I) \\ v &= v^I + \rho (v^R - v^I) \frac{v^I}{v^I} = \left[\left(1 + \rho \left(\frac{v^R - v^I}{v^I} \right) \right) \right] v^I \\ v &= (1 + \rho l) v^I \end{aligned} \tag{3.7}$$

em que:

$l = \frac{(v^R - v^I)}{v^I}$: é a relação entre a faixa linear da velocidade do vento e a velocidade de corte;

$$\rho = \frac{P_w}{P_w^{max}} \tag{3.8}$$

onde ρ é a relação entre a potência de saída e a potência nominal, que corresponde ao valor em p.u. da potência.

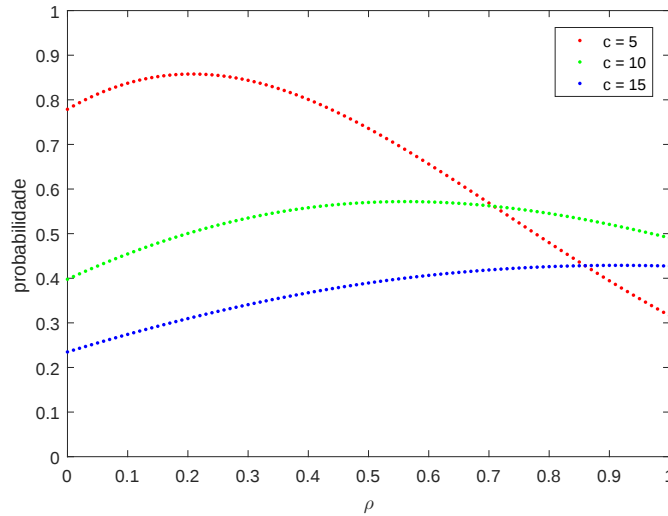
Assim, substituindo (3.7) na função (3.2) obtemos a função de distribuição de probabilidade de *Weibull* para o *WECS*, representada em (3.9):

$$fW(P_w) = \frac{k l v^I}{c} \left(\frac{(1 + \rho l) v^I}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{(1 + \rho l) v^I}{c} \right)^k \right) \quad (3.9)$$

Observe que em (3.9), fW é expressa em função da potência eólica P_w pois ρ é expressa em função desta variável em (3.8), por simplificação de notação.

A relação entre os valores críticos de velocidade do vento relacionados à potência de saída do gerador do *WECS* e os valores críticos que definem os parâmetros c e k da função (3.9) são analisados na Figura 3.5, utilizando os seguintes dados da turbina eólica: $v^I = 5m/s$, $v^R = 15m/s$ e $v^O = 45m/s$.

Figura 3.5: Probabilidade mista da potência de saída da função de distribuição de probabilidade de *Weibull* para a velocidade do vento.



A Figura 3.5 descreve as partes discretas e contínuas da função (3.9) com os parâmetros $k = 2$ e $c = 10m/s, 15m/s$ e $20m/s$.

Após estabelecer essas correlações entre a velocidade do vento e a potência eólica gerada, o custo de geração de energia será mostrado na Seção 3.1.4.

3.1.4 Funções custo associados a geração de energia eólica

O custo para a produção da energia eólica é baixo comparado a outras fontes de energia, sendo assim, é gerada a maior quantidade de energia eólica possível, de acordo com as limitações dos geradores. Entretanto, a incerteza quanto a velocidade do vento disponível faz com que a função custo de geração das unidades eólicas ($C_w(P_w)$) tenha determinadas características quanto à sua formulação.

O custo para a produção de energia eólica está relacionado a 3 tipos diferentes de custo (Hetzer, Yu e Bhattacharai (2008)):

1. custo linear ($C_l(P_w)$): está diretamente ligado ao custo de produção de energia de cada gerador eólico, relativo aos custos operacionais de geração (produção, manutenção, etc);
2. custo de penalização ($C_p(P_w)$): é o custo por não utilizar toda a energia disponível pelo gerador eólico, devido às incertezas associadas à velocidade do vento disponível;
3. custo reserva ($C_r(P_w)$): é o custo relacionado à incerteza da disponibilidade da geração de energia eólica, que depende diretamente da velocidade do vento.

Assim a função custo associado a produção de energia eólica é dada por:

$$C_w(P_w) = \sum_{i=1}^n C_{w_i}(P_{w_i}) = C_l(P_w) + C_p(P_w) + C_r(P_w) \quad (3.10)$$

em que:

- n : é o número de unidades eólicas.

As funções custo penalidade e reserva estão relacionadas à função (3.9).

Custo linear

A função de custo linear é dada por:

$$C_l(P_w) = \sum_{i=1}^n C_{l_i}(P_{w_i}) = \sum_{i=1}^n d_i \cdot P_{w_i} \quad (3.11)$$

em que:

- $C_l(P_w)$: é a função custo linear para o gerador i , expresso em $\$/MW$;
- d_i : é o coeficiente de custo direto para o gerador i , expresso em $\$/MW$;
- P_{w_i} : é potência eólica produzida pelo gerador i , determinada em MW ;
- n : é o número de unidades eólicas.

Custo penalidade

Quanto ao custo penalidade, quando a potência eólica disponível não for utilizada será calculada a diferença entre a potência eólica disponível e a potência eólica que foi utilizada. Assim a função de custo penalidade terá a seguinte forma:

$$C_p(P_w) = \sum_{i=1}^n C_{p_i}(P_{w_i}) = \sum_{i=1}^n k_{p_i} (Pd_{w_i} - P_{w_i})$$

A potência eólica disponível Pd_{w_i} é uma variável aleatória, com intervalo $0 \leq Pd_{w_i} \leq P_{w_i}^{max}$, associada à potência de saída apresentada na Figura 3.4, então:

$$C_p(P_w) = \sum_{i=1}^n k_{p_i} \int_{P_{w_i}}^{P_{w_i}^{max}} (P_w - P_{w_i}) fW(P_w) dw$$

$$C_p(P_w) = \sum_{i=1}^n k_{p_i} \left(\int_{P_{w_i}}^{P_{w_i}^{max}} P_w fW(P_w) dw - P_{w_i} \int_{P_{w_i}}^{P_{w_i}^{max}} fW(P_w) dw \right) \quad (3.12)$$

em que:

- $C_p(P_w)$: é a função custo de penalização do gerador i , expresso em $\$/MW$;

- $P_{w_i}^{max}$: potência nominal do gerador i , expresso em MW ;
- k_{p_i} : coeficiente do custo penalidade do gerador i ;

Custo reserva

O custo reserva está associado à potência eólica disponível ser menor do que a potência eólica programada, definindo assim o custo associado aos geradores por não atingirem a demanda esperada pela produção de energia eólica. Esse custo é proporcional à diferença entre a potência eólica prevista e a potência eólica disponível.

$$C_r(P_w) = \sum_{i=1}^n C_{r_i}(P_{w_i}) = \sum_{i=1}^n k_{r_i} (P_{w_i} - P_{d_{w_i}})$$

Da mesma forma que no custo penalidade, a potência eólica disponível $P_{d_{w_i}}$ é uma variável aleatória, com intervalo $0 \leq P_{d_{w_i}} \leq P_{w_i}^{max}$, associada à potência de saída apresentada na Figura 3.4, então:

$$C_r(P_w) = \sum_{i=1}^n k_{r_i} \int_0^{P_{w_i}} (P_{w_i} - P_w) fW(P_w) dw$$

$$C_r(P_w) = \sum_{i=1}^n k_{r_i} \left(P_{w_i} \int_0^{P_{w_i}} fW(P_w) dw - \int_0^{P_{w_i}} P_w fW(P_w) dw \right) \quad (3.13)$$

em que:

- $C_r(P_w)$: é a função custo reserva do gerador i , expresso em $\$/MW$.
- k_{r_i} : é o coeficiente do custo reserva do gerador i ;

Para o cálculo das integrais que aparece na função eólica $C_w(P_w)$, definidas em (3.12) e (3.13), foi utilizado uma aproximação da função de *Weibull* para determinar valores dessas integrais, pois não há métodos exatos de resolução para estes. Primeiramente elas são resolvidas como integrais indefinidas, e a partir desta resolução as funções $C_p(P_w)$

e $C_r(P_w)$ são inseridas na função custo associado a geração de energia eólica. Para a integral $\int fW(w)dw$, em que $fW(w)$ foi definida em (3.9), foi utilizado o comando *int* do *software Matlab* para calculá-la, de forma intrínseca a este. Diferentemente da integral de $\int w fW(w)dw$, por não ter uma solução explícita, foi utilizada uma aproximação por séries de Taylor, também realizada por um comando do *software Matlab*.

O modelo proposto neste trabalho utiliza a função custo associado à geração de energia eólica, ressaltando assim um modelo estocástico pois as componentes das funções (3.12) e (3.13) do *WECS* utilizam na sua formulação a velocidade do vento como variável aleatória na produção de energia eólica, a qual é calculada pela função de probabilidade (3.9).

Os problemas de despacho econômico e ambiental, em conjunto com o problema de produção de energia eólica, são importantes para o sistema de geração de energia. As funções que caracterizam esses problemas são apresnetadas na Seção 3.2.

3.2 Funções associadas as unidades termoelétricas

Segundo Gent & Lamont (1971), a geração de energia termoelétrica não considerava o impacto ambiental causado, priorizando assim somente os critérios econômicos envolvidos no problema. Com o crescimento da preocupação ambiental, foi incorporado ao sistema de geração de energia das usinas termoelétricas uma função referente ao impacto ambiental, pois a emissão de gases como o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2), o óxido de nitrogênio (NO_x), entre outros, que aparecem em países onde o combustível fóssil é utilizado, traz consequências negativas para os seres vivos, afetando a qualidade de vida, gerando grandes impactos nas vegetações e sérias alterações climáticas.

Na Seção 3.2.1 é apresentada a função custo de combustíveis, e na Seção 3.2.2, a função emissão de poluentes, ambas associadas à geração de energia térmica.

3.2.1 Função de custos de combustíveis

O objetivo do problema de despacho econômico clássico é reduzir o custo de produção de energia de cada unidade geradora ligada à rede, suprimindo a necessidade de geração com o menor custo possível. De acordo com Happ (1977) o problema de despacho econômico surgiu por conta da necessidade de destinar a produção de energia para duas ou mais

unidades geradoras, onde o operador escolhe a melhor forma de dividir a carga entre elas, para suprir a carga total demandada pelo sistema. Os primeiros métodos que surgiram para resolver esse problema foram o carregamento por ordem de mérito e o critério dos custos incrementais (Steinberg e Smith). Como um sistema elétrico é atendido por diversas unidades geradoras, a função custo total é obtida a partir da soma dos custos individuais de cada uma das unidades.

A função de custos de combustíveis das unidades termoeletricas, denominada por $C_c(P_t)$, foi proposta por Steinberg & Smith (1943), onde o custo de produção total da rede é igual ao somatório da função de custo de combustível de cada gerador, como dado em (3.14):

$$C_c(P_t) = \sum_{j=1}^m C_{c_j}(P_{t_j}) = \sum_{j=1}^m \left[a_j P_{t_j}^2 + b_j P_{t_j} + c_j \right] \quad (3.14)$$

A função utilizada para o cálculo do custo total considerando o ponto de carregamento de válvula é dada por (3.15):

$$C_c(P_t) = \sum_{j=1}^m C_{c_j}(P_{t_j}) = \sum_{j=1}^m \left[a_j P_{t_j}^2 + b_j P_{t_j} + c_j + |e_j \sin(f_j (P_{t_j}^{min} - P_{t_j}))| \right] \quad (3.15)$$

em que:

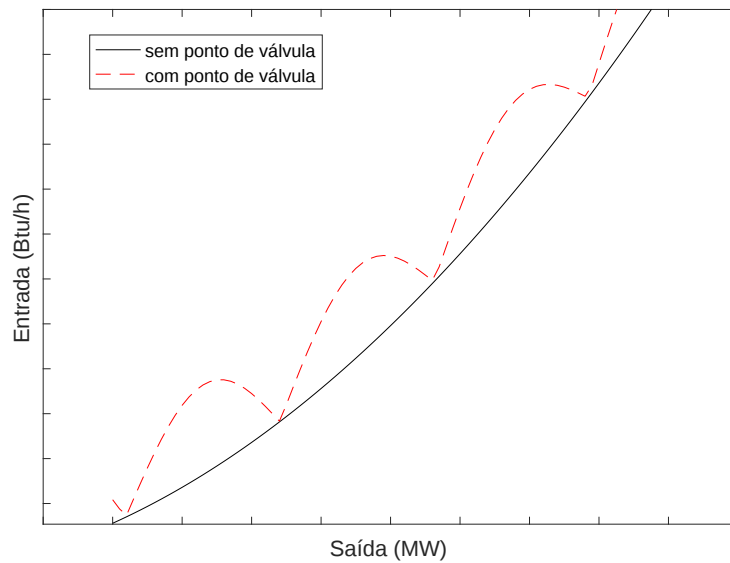
- $C_c(P_t)$: é a função de custos de combustíveis das unidades termoeletricas;
- a_j, b_j, c_j, e_j e f_j : são os coeficientes da função de custos de combustíveis da unidade geradora j ;
- P_{t_j} : é a potência gerada pela unidade termoeletrica j ;
- $P_{t_j}^{min}$: é a potência mínima gerada pela unidade termoeletrica j ;
- m : é o número de unidades termoeletricas.

Para evitar as dificuldades provenientes de funções não-lineares complexas, os trabalhos que envolvem a resolução do problema de despacho econômico utilizam a função (3.14)

como uma aproximação quadrática das funções de custo dos geradores de um sistema elétrico é representada por uma curva obtida através de ensaios termoelétricos, onde os dados necessários para sua construção podem ser adquiridos através de cálculos de projetos ou de testes de taxa de calor.

A representação das curvas de entrada-saída por uma função quadrática não é a mais adequada para alguns geradores, porém de acordo com Happ (1977), no problema de despacho econômico clássico os custos incrementais são representados como monotonicamente crescentes e tal caracterização ignora as perdas nas válvulas parcialmente abertas. As perdas que ocorrem devido aos efeitos gerados em cada válvula de admissão de calor que se abre. A Figura 3.6 expressa a representação da curva obtida pela função (3.14) e o efeito conhecido como ponto de carregamento de válvula definido como o ponto imediatamente anterior a abertura da próxima válvula (Wood e Wollenberg (2012)), que será apresentada na função (3.15).

Figura 3.6: Curva de entrada-saída de uma unidade geradora j com ponto de carregamento de válvula



Com a inserção da função relativa ao ponto de carregamento de válvula em (3.14), obtêm-se a função $C_c(P_t)$ dada em (3.15) que é não convexa e não-diferenciável, inviabilizando a utilização de diversos métodos clássicos e determinísticos de otimização para a resolução do problema.

Para reduzir os impactos ambientais causados pela emissão de gases, que ocorrem com

a produção da energia de origem termoeletrica, tem-se a função emissão dos poluentes apresentada na Seção 3.2.2.

3.2.2 Função de emissão de poluentes

De acordo com Gent & Lamont (1971), por muito tempo a geração de energia termoeletrica levou em consideração apenas os custos de combustíveis, desprezando qualquer impacto ambiental causado. Em Sullivan & Hackett (1973) foi desenvolvida a técnica de despacho de mínima emissão de poluentes para diminuir o nível de concentração da emissão de gases na atmosfera, onde considerava-se as influências dos gases no meio ambiente e nas condições meteorológicas, mas somente na década de 90 ocorreu maiores avanços nesta área (Samed (2004)).

O objetivo do problema de despacho ambiental é reduzir a poluição do sistema de geração de energia e continuar fornecendo benefícios quanto ao custo de operação do sistema. A função de emissão de poluentes ($C_e(P_t)$) é modelada levando em consideração a relação entre a quantidade de cada poluente e a saída de potência da unidade j , onde os níveis de concentração resultantes são calculados (Samed (2004)). A função (3.17) apresentada por El-Hawary et al. (1992), despreza os termos polinomiais e exponenciais apresentados anteriormente por Gent & Lamont (1971), representada em (3.16), definido assim, uma função polinomial de segunda ordem, expressa em (3.17):

$$C_e(P_t) = \sum_{j=1}^m C_{e_j}(P_{t_j}) = \sum_{j=1}^m [\alpha_j P t_j^2 + \beta_j P t_j + \gamma_j + \sigma_i \exp(\varepsilon_i P t_j)] \quad (3.16)$$

$$C_e(P_t) = \sum_{j=1}^m C_{e_j}(P_{t_j}) = \sum_{j=1}^m [\alpha_j P t_j^2 + \beta_j P t_j + \gamma_j] \quad (3.17)$$

em que:

- $C_e(P_t)$: é a função de emissão de poluentes das unidades termoeletricas;
- $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \sigma_i$ e ε_i : são os valores dos coeficientes da função de emissão de poluentes da unidade geradora j ;

Ambas as funções definidas em (3.16) e (3.17) são função convexas.

A função (3.17) é a mais encontrada na literatura e será aplicada na formulação proposta neste trabalho.

Na formulação do PMDEATE com 2 objetivos, uma das funções objetivo correspondente aos custos de produção de energia é representada pela soma da função custo da geração de energia eólica, definida em (3.10) e pela função custo dos combustíveis da geração de energia termoeletrica, definida em (3.14). Essa função custo foi denominada de custo total e é definida por:

$$C_T(P_w, P_t) = C_w(P_w) + C_e(P_t) \quad (3.18)$$

A função custo dos combustíveis utilizada no custo total ($C_T(P_w, P_t)$) é a função considerada sem o carregamento de ponto de válvula, definida em (3.15).

3.3 Funções de despacho econômico e ambiental termo-eólico com inserção de variáveis binárias

Para a formulação do problema de programação não linear binária mista as potências geradas pelas unidades para o atendimento da demanda são variáveis reais canalizadas pelos limitantes operacionais inferior e superior de cada unidade geradora, assim essas funções são reformuladas considerando as seguintes variáveis binárias.

A função custo das unidades eólicas, baseada na função (3.10), é dada por:

$$C_w(P_w, x) = \sum_{i=1}^n C_{w_i}(P_{w_i}, x_i) = C_l(P_w, x) + C_p(P_w, x) + C_r(P_w, x)$$

As funções custo linear, custo penalidade e custo reserva, respectivamente baseadas nas funções (3.11), (3.12) e (3.13) são dadas por:

$$C_l(P_w, x) = \sum_{i=1}^n C_{l_i}(P_{w_i}, x_i) = \sum_{i=1}^n (d_i \cdot P_{w_i}) x_i$$

$$C_p(P_w, x) = \sum_{i=1}^n C_{p_i}(P_{w_i}, x_i) = \sum_{i=1}^n \left[\left(k_{p_i} \int_{P_{w_i}}^{w_{r_i}} w fW(w) dw - P_{w_i} \int_{P_{w_i}}^{w_{r_i}} fW(w) dw \right) x_i \right]$$

$$C_r(P_w, x) = \sum_{i=1}^n C_{r_i}(P_{w_i}, x_i) = \sum_{i=1}^n \left[\left(k_{r_i} P_{w_i} \int_0^{P_{w_i}} fW(w) dw - \int_0^{P_{w_i}} w fW(w) dw \right) x_i \right]$$

Quanto a reformulação da função custo de combustíveis, baseada nas funções (4.3) e (4.4), são dadas as funções:

$$C_c^1(P_t, y) = \sum_{j=1}^m (C_c^1)_j(P_{t_j}, y_j) = \sum_{j=1}^m \left[\left(a_j P_{t_j}^2 + b_j P_{t_j} + c_j \right) y_j \right]$$

$$C_c^2(P_t, y) = \sum_{j=1}^m (C_c^2)_j(P_{t_j}, y_j) = \sum_{j=1}^m \left[\left(e_j \sin(f_j (P_{t_j}^{min} - P_{t_j})) \right) y_j \right]$$

Baseada na função (3.17), com relação a reformulação da função custo de emissão dos poluentes é dada por:

$$C_e(P_t, y) = \sum_{j=1}^m (C_e)_j(P_{t_j}, y_j) = \sum_{j=1}^m \left[\left(\alpha_j P_{t_j}^2 + \beta_j P_{t_j} + \gamma_j \right) y_j \right]$$

As variáveis binárias são:

$$\bullet x_i = \begin{cases} 1, & \text{se a unidade eólica } i \text{ estiver em operação} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

em que $i = 1, 2, \dots, n$.

$$\bullet y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a unidade termoeletrica } j \text{ estiver em operação} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

em que $j = 1, 2, \dots, m$

Assim, todas as funções definidas nesta seção são utilizadas na formulação do PMDE-ATEb apresentado na Seção 4.3.

Todas as funções definidas neste capítulo serão consideradas nas formulações dos problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico propostos no Capítulo 4.

Problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico

Neste capítulo é apresentada a formulação dos diferentes Problemas Multiobjetivo de Despacho Econômico e Ambiental Termo-Eólico (PMDEATE), os quais têm como objetivos minimizar os custos de produção de energia eólica, utilizando a função custos das unidades eólicas ($C_w(P_w)$) descrita em (3.10), e simultaneamente minimizar os custos de combustíveis das unidades termoeletricas ($C_c(P_t)$) através das funções descritas em (3.14) e (3.15), e minimizar a emissão dos poluentes que ocorrem através da queima de combustíveis fósseis por meio da função emissão de poluentes ($C_e(P_t)$) descrita em (3.17). O problema deve ainda estar sujeito às restrições operacionais das unidades geradoras e o atendimento da demanda do sistema.

Serão apresentadas as formulações dos seguintes problemas: (i) na Seção 4.2 o problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 2 objetivos (PMDEATE); (ii) na Seção 4.3 o problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 2 objetivos e inserção das variáveis binárias de decisão sobre a operação das unidades eólicas e termoeletricas (PMDEATEb) e (iii) na Seção 4.4 o problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 3 objetivos (PMDEATE₃).

Na formulação dos problemas com 2 objetivos, uma das funções objetivo correspondente aos custos de produção de energia é representada pela soma da função custo da geração de energia eólica e a função custo dos combustíveis da geração de energia termoeletrica, a qual é denominada por custo total dada por ($C_T(P_w, P_t)$).

Para cada formulação dos problemas destacados de (i) a (iii), são consideradas três variações:

1. A função custo dos combustíveis da geração de energia termoeletrica sem a inserção de pontos de carregamento de válvula;
2. A função custo dos combustíveis da geração de energia termoeletrica com a inserção de pontos de carregamento de válvula;
3. O modelo que considera a representação das perdas nas linhas de transmissão.

Na Seção 4.1 apresenta os índices, parâmetros e variáveis contidas na formulação do PMDEATE.

4.1 Notação utilizada na formulação dos PMDEATE

Os índices da formulação da variação dos problemas PMDEATE são:

- i : é o índice dos geradores eólicos.
- j : é o índice dos geradores termoeletricos.
- n : é o número de unidades eólicas.
- m : é o número de unidades termoeletricas.

Os parâmetros são:

- D : é a potência total demandada pelo sistema em (MW);
- Pw_i^{max} : é o limite máximo de potência do gerador eólico i em (MW);
- Pt_j^{min} : é o limite mínimo de potência gerada pela unidade termoeletrica j em (MW);
- Pt_j^{max} : é o limite máximo de potência gerada pela unidade termoeletrica j em (MW);
- L : é a função quadrática que representa as perdas na transmissão.

E as variáveis são:

- Pw_i : é a potência produzida pelo unidade eólica i em (MW);
- Pt_j : é a potência produzida pela unidade termoeletrica j em (MW).

- v_j : é uma variável auxiliar para representar os custos adicionais com o carregamento de ponto de válvula.
- $x_i = \begin{cases} 1, & \text{se a unidade eólica } i \text{ estiver em operação} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $y_j = \begin{cases} 1, & \text{se a unidade termoeletrica } j \text{ estiver em operação} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- os índices i e j considerados nas expressões vistas são tais que $i = 1, 2, \dots, n$ e $j = 1, 2, \dots, m$.

4.2 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 2 objetivos

Para todos os PMDEATE, a função de custos é considerada como a soma da função custo de combustíveis e função custo das unidades eólicas.

4.2.1 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico - PMDEATE

O modelo (4.1) tem 2 objetivos: minimizar os custos de geração de energia termoeletrica e eólica e minimizar os impactos ambientais gerados pela produção termoeletrica.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } \{C_T(P_w, P_t), C_e(P_t)\} \\
 & \text{sujeito a } \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D \\
 & 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde as funções objetivos $C_T(P_w, P_t)$ está definida na função (3.18) e $C_e(P_t)$ está definida na função (3.17).

4.2.2 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com ponto de carregamento de válvula - PMDEATE - PV

A inserção do ponto de carregamento de válvula na função de custos de combustíveis transforma-a em não convexa e não-diferenciável. Para a utilização desta função em métodos clássicos e determinísticos de otimização é feita uma transformação baseada em Bazaraa et al. (2013), a qual é aplicada à função de custos de combustíveis (3.15) a qual é reescrita da seguinte forma:

$$C_c(P_t) = C_c^1(P_t) + C_c^2(P_t) \quad (4.2)$$

em que:

$$C_c^1(P_t) = \sum_{j=1}^m (C_c^1)_j(P_{t_j}) = \sum_{j=1}^m \left[a_j P_{t_j}^2 + b_j P_{t_j} + c_j \right] \quad (4.3)$$

$$C_c^2(P_t) = \sum_{j=1}^m (C_c^2)_j(P_{t_j}) = \sum_{j=1}^m \left[e_j \sin(f_j (P_{t_j}^{min} - P_{t_j})) \right] \quad (4.4)$$

para $j = 1, 2, \dots, m$.

A partir de (4.4), é considerado um problema irrestrito (4.5), expresso por:

$$\text{Minimizar } C_c^1(P_t) + |C_c^2(P_t)| \quad (4.5)$$

Baseando-se em Bazaraa et al. (2013), o problema irrestrito (4.5) é escrito como o problema restrito (4.6):

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } C_c^1(P_t) + \sum_{j=1}^m v_j \\ & \text{sujeito a } -v_j \leq (C_c^2)_j(P_{t_j}) \leq v_j \\ & v_j \in \Re \end{aligned} \quad (4.6)$$

A função objetivo do problema (4.6) torna-se a soma de uma função quadrática com outra linear, para isso a função valor absoluto senoidal é reescrita e canalizada nas restrições do problema.

Uma outra transformação, baseada em Bazaraa et al. (2013), para representar de forma equivalente o problema irrestrito (4.5), é dada por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } C_c^1(P_t) + \sum_{j=1}^m (z_j^1 + z_j^2) \\
 & \text{sujeito a } (C_c^2)_j(P_{t_j}) = (z_j^1 - z_j^2) \\
 & \quad z_j^1, z_j^2 \geq 0
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

A função objetivo do problema (4.7) é a soma de uma função quadrática com outra linear, em que z_j^1 e z_j^2 são variáveis não negativas, para tratar a função senoidal retificada $(C_c^2(P_t))$, em que:

- (i) se $z_j^1 \geq z_j^2$ então $(C_c^2)_j(P_{t_j}) \geq 0$;
- (ii) se $z_j^1 < z_j^2$ então $(C_c^2)_j(P_{t_j}) < 0$.

Além disso, nota-se que z^1 e z^2 são complementares entre si, tal que $z_j^1 \cdot z_j^2 = 0$.

Os problemas (4.6) e (4.7) realizados através das transformações propostas auxiliam na resolução do PMDEATE-PV e PMDEATE-PPV, respectivamente apresentados em (4.8) e (4.10), assim como as variações dos mesmos, possibilitando a utilização de métodos determinísticos clássicos à resolução deste.

De forma análoga ao problema (4.1), a soma da função representada pela função custo da geração de energia eólica $(C_w(P_w))$ e a função quadrática do custo dos combustíveis da geração de energia termoeletrica $(C_c^1(P_t))$ é denominada por custo total dada por $(C_T^1(P_w, P_t))$.

A formulação do PMDEATE - PV, considerando o problema equivalente em (4.6), determina o problema de otimização multiobjetivo (4.8) dado por:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar} \quad \left\{ C_T(P_w, P_t) + \sum_{j=1}^m v_j, C_e(P_t) \right\} \\
& \text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D \\
& (C_c^2)_j(P_{t_j}) - v_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& (C_c^2)_j(P_{t_j}) + v_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
& Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& v_j \in \Re \quad j = 1, 2, \dots, m
\end{aligned} \tag{4.8}$$

onde as funções objetivos $C_T(P_w, P_t)$ está definida na função (3.18) e $C_e(P_t)$ está definida na função (3.17).

A variável auxiliar $v_j \in \Re$, possibilita tratar o problema de despacho econômico com ponto de carregamento de válvula, representado com a função senoidal retificada, através do problema equivalente definido em (4.6).

4.2.3 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula - PMDEATE - PPV

Para representar as perdas na transmissão do sistema elétrico de potência no PMDEATE, é utilizada a fórmula de Kron, dada em (4.9), que representa as perdas através da matriz dos coeficientes-B (Silva (2014)). O cálculo das perdas são representadas pela fórmula de Kron, conforme a equação (4.9):

$$L = \sum_{q=1}^k \sum_{p=1}^k P_q B_{qp} P_p + \sum_{p=1}^k P_p B_{p0} + B_{00} \tag{4.9}$$

em que:

$k = m + n$: é a quantidade de geradores termoelétricos e eólicos;

$P_q, P_p \in P$, em que o conjunto $P = Pt \cup Pw$, P_t é o conjunto dos m geradores termoelétricos e Pw é o conjunto dos n geradores eólicos.

B_{qp} , B_{p0} e B_{00} são os coeficientes-B relacionados às perdas na linha de transmissão.

Ao considerar as perdas na transmissão no PMDEATE, a energia produzida pelos geradores deve ser suficiente para suprir a demanda ao sistema elétrico, assim o PMDEATE - PPV é representado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } \left\{ C_T(P_w, P_t) + \sum_{j=1}^m v_j, C_e(P_t) \right\} \\
 & \text{sujeito a } \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D + L \\
 & (C_c^2)_j(P_{t_j}) - v_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & (C_c^2)_j(P_{t_j}) + v_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & v_j \in \Re \quad j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

onde as funções objetivos $C_T(P_w, P_t)$ está definida na função (3.18) e $C_e(P_t)$ está definida na função (3.17).

A formulação dos problemas de PMDEATE-PV e PMDEATE-PPV podem ter uma outra formulação proposta, equivalente ao problema (4.7).

4.3 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 2 objetivos e inserção das variáveis binárias

Para o PMDEATEb definido em (4.11) consideram-se um conjunto de m geradores termoeletrica e um conjunto n geradores eólicos e respectivamente duas variáveis binárias (x_i para $i = 1, 2, \dots, n$ e y_j para $j = 1, 2, \dots, m$) correspondentes a esses conjuntos. O objetivo é verificar quais unidades geradoras termoeletrica e eólicas estão ligadas ($x_i = 1$ e $y_j = 1$) ao sistema de geração de energia, para atender a demanda de geração, respeitando os limites operacionais de produção dos geradores.

Esse problema é de programação não linear binária mista, pois as potências geradas pelas unidades para o atendimento da demanda são variáveis reais canalizadas pelos li-

mitantes operacionais inferior e superior de cada unidade geradora. A reformulação das funções utilizadas para o PMDEATEb são apresentadas na Seção 3.3.

4.3.1 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com a inserção das variáveis binárias e representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula - PMDEATEb - PPV

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad \left\{ C_c^1(P_t, y) + \sum_{j=1}^m v_j + C_w(P_w, x), C_e(P_t, y) \right\} \\
 & \text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^n Pw_i x_i + \sum_{j=1}^m Pt_j y_j = D + L \\
 & \quad (C_c^2)_j(P_{t_j}, y_j) - v_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad (C_c^2)_j(P_{t_j}, y_j) + v_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad 0 \leq Pw_i \cdot x_i \leq Pw_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad Pt_j^{min} \leq Pt_j \cdot y_j \leq Pt_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad v_j \in \Re \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad x_i \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad y_j \in \{0, 1\} \quad j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

onde as funções com variáveis binárias $C_c(P_t, y)$, $C_e(P_t, y)$ e $C_w(P_w, x)$ estão definidas na Seção 3.3.

De forma análoga ao problema (4.11), o PMDEATE, definido em (4.1) e o PMDEATE - PV, definido em (4.8), podem ser formulados com a inserção das variáveis binárias e denominados respectivamente por PMDEATEb e PMDEATEb - PV.

4.4 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com 3 objetivos

Diferentemente dos problemas apresentados na Seção 4.2, o problema proposto em (4.12) define e trata separadamente as funções custo dos combustíveis, custo dos geradores eólicos e custo de emissão de poluentes, ou seja, esse problema multiobjetivo é definido considerando 3 objetivos distintos, denominado PMDEATE₃.

4.4.1 *Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental termo-eólico com representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula - PMDEATE₃ - PPV*

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} \quad \left\{ C_c^1(P_t) + \sum_{j=1}^m v_j, C_w(P_w), C_e(P_t) \right\} \\
 & \text{sujeito a} \quad \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D + L \\
 & \quad (C_c^2)_j(P_{t_j}) - v_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad (C_c^2)_j(P_{t_j}) + v_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & \quad Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m \\
 & \quad v_j \in \Re \quad j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

De forma análoga ao problema (4.12), o PMDEATE, definido em (4.1) e o PMDEATE - PV, definido em (4.8), podem ser formulados com 03 objetivos, denominados respectivamente por PMDEATE₃ e PMDEATE₃ - PV.

A resolução do problema (4.1), e os problemas análogos a este como os PMDEATEb e PMDEATE₃, serão realizadas transformando-os em subproblemas mono-objetivo gerados através do MRCP, encontrados em Santos (2016) e Gonçalves et al. (2019), que serão apresentados no Capítulo 5. Outra técnica que será utilizada para resolução do modelo (4.1) será a técnica de programação por metas encontrada em Jones e Tamiz (2010).

Uma nova técnica de resolução será apresentada, denominada PMPRCP, utilizada na resolução dos problemas (4.8) e (4.10), e os problemas análogos a este como os PMDEATEb e PMDEATE₃, onde foi realizada uma combinação do MRCP e da técnica de Programação por metas ponderadas, sendo apresentada no Capítulo 5.3. Essa estratégia foi utilizada devido à dificuldade na resolução dos problemas (4.8) e (4.10) que envolve funções convexas ($C_c^1(P_t)$) com restrições não-convexas ($C_c^2(P_t)$) em seu domínio, em relação à função valor absoluto senoidal que ocorre na função custo dos combustíveis ($C_c(P_t)$), como visto na função (3.15).

O MRCP, a técnica de programação por metas e a PMPRCP podem ser resolvidas por

métodos determinísticos ou heurísticos conhecidos na literatura, através da implementação destes ou da utilização de pacotes computacionais. Neste trabalho utilizamos a segunda opção dada e os resultados obtidos à resolução dos modelos são apresentados no Capítulo 6.

O Capítulo 5 apresenta o MRCP, onde a ideia consiste em otimizar uma das funções objetivo existentes do problema, enquanto as outras funções são incorporadas às restrições do problema sendo limitadas superior e inferiormente.

Metodologia de resolução de problemas multiobjetivo

Um problema de otimização que possui mais de um objetivo a ser alcançado é conhecido na literatura como problema de otimização multiobjetivo. Em geral os objetivos considerados nestes problemas são conflitantes, como ocorre no PMDEATE e PMDEATEb, apresentados nas Seções 4.2 e 4.3 do Capítulo 4, os quais apresentam conflitos na função custo de combustíveis e na função de emissão de poluentes. O conflito existente entre os objetivos do problema faz com que não seja possível determinar uma única solução ótima, de forma concomitante para todas as funções objetivo deste. Na literatura, métodos de otimização são definidos para investigar soluções de problemas multiobjetivo. Para definir os métodos de interesse deste trabalho à resolução do PMDEATE e PMDEATEb, a terminologia e definições apresentadas em Jones e Tamiz (2010) e Ehrgott (2005), com o objetivo de minimização da função do problema, podem ser melhores revistas no Apêndice A.

Os problemas multiobjetivos podem ser resolvidos por métodos determinísticos ou heurísticos, sendo escolhidos de acordo com a complexidade do modelo. A resolução de um problema multiobjetivo não é realizada de forma direta, por apresentar objetivos conflitantes. Em Santos (2016) e Gonçalves et al. (2019) são apresentadas estratégias que transformam o problema multiobjetivo em um conjunto de sub-problemas mono-objetivos, tornando possível a investigação das soluções ótimas desses sub-problemas. Alguns dos métodos clássicos encontrados na literatura são o método da soma ponderada, descrito em Haimes (1971) e o método ϵ -restrito, descrito em Miettinen (1999).

Esses métodos possibilitam transformar um problema multiobjetivo em um conjunto de subproblemas mono-objetivos, possibilitando a aplicação de algum método de otimização para sua resolução. A ideia principal do método ϵ -restrito é otimizar uma das funções

objetivo, enquanto as outras são incorporadas ao conjunto de restrições do problema. O método da soma ponderada é considerado a partir de pesos para estas funções definidas no problema, definindo um conjunto de subproblemas mono-objetivos.

Para a resolução do PMDEATE este trabalho utiliza o método de restrições canalizadas progressivas (MRCP), encontrados em Santos (2016) e Gonçalves et al. (2019), para encontrar as soluções eficientes que serão utilizadas para compor a curva de Pareto-ótima. Como visto nas Seções 4.2 e 4.3, a função custo de combustíveis $C_c(P_t)$ e a função custo das unidades eólicas $C_w(P_w)$ são consideradas de forma conjunta, onde os dois objetivos dos problemas propostos são $C_T(P_w, P_t)$ e $C_e(P_t)$. Para utilizar os métodos citados e gerar a curva de Pareto-ótima, são definidos os seguintes problemas:

$$\text{Minimizar } C_T(P_w, P_t) \text{ , sujeito às restrições do problema (4.1)} \quad (5.1)$$

e

$$\text{Minimizar } C_e(P_t) \text{ , sujeito às restrições do problema (4.1)} \quad (5.2)$$

Os problemas (5.1) e (5.2) são utilizados para determinar as soluções $(C_e(P_t))^{min}$, $(C_T(P_w, P_t))^{min}$, $(C_e(P_t))^{max}$ e $(C_T(P_w, P_t))^{max}$ que são encontradas da seguinte forma:

- Para a solução do problema (5.1) tem-se $(C_T(P_w, P_t))^{min}$, o qual é o valor mínimo da função custo e $(C_e(P_t))^{max}$, o qual é o valor máximo da função custo de emissão dos poluentes.
- Para a solução do problema (5.2) foi encontrado $(C_e(P_t))^{min}$, o qual é o valor mínimo da função custo de emissão dos poluentes e $(C_T(P_w, P_t))^{max}$, o qual é o valor máximo da função custo.

Essas soluções são chamadas soluções lexicográficas. A solução denominada ideal é definida pelo valor de $(C_T(P_w, P_t))^{min}$ do problema (5.1) e $(C_e(P_t))^{min}$ do problema (5.2).

Na Seção 5.1 é apresentado o método de restrições canalizadas progressivas, o qual transforma um problema multiobjetivo em um conjunto de subproblemas mono-objetivos, possibilitando a aplicação de métodos de otimização para sua resolução.

5.1 Método de restrições canalizadas progressivas

Nos problemas multiobjetivo, como nos problemas propostos, a minimização dos custos de geração de energia termoelétrica e eólica e a minimização da emissão de poluentes são objetivos conflitantes. Uma das estratégias de resolução de problemas de otimização multiobjetivo é o MRCP, o qual mantém uma das funções como função objetivo e incorpora a outra nas restrições do problema através de uma canalização definida por limites inferiores e superiores pré-definidos.

No caso do PMDEATE, a função custo $(C_T(P_w, P_t))$ é considerada, a função custo total é levada como objetivo do modelo escalarizado e a função custo de emissão dos poluentes $(C_e(P_t))$ é incorporada às restrições deste, sendo limitada superior e inferiormente para limites mínimos e máximos de emissão, de acordo com os N subproblemas mono-objetivos apresentados em (5.4), para cada subintervalo I_k , onde $I_k = [(C_e(P_t))_k^{min}, (C_e(P_t))_k^{max}] \subset I$, $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

Como a função custo de emissão de poluentes será utilizada como restrição do modelo, então considera-se o intervalo I , de possível variação desta função, tal que:

$I = [(C_e(P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{max}]$, em que:

1. $(C_e(P_t))^{min}$ é o valor obtido para $C_e(P_t)$ na solução do problema (5.2).
2. $(C_e(P_t))^{max}$ é o valor obtido para $C_e(P_t)$ na solução do problema (5.1).

Serão encontradas, possivelmente, N soluções eficientes, determinadas considerando cada subintervalo I_k .

O intervalo I é subdividido em N subintervalos igualmente espaçados e considerando

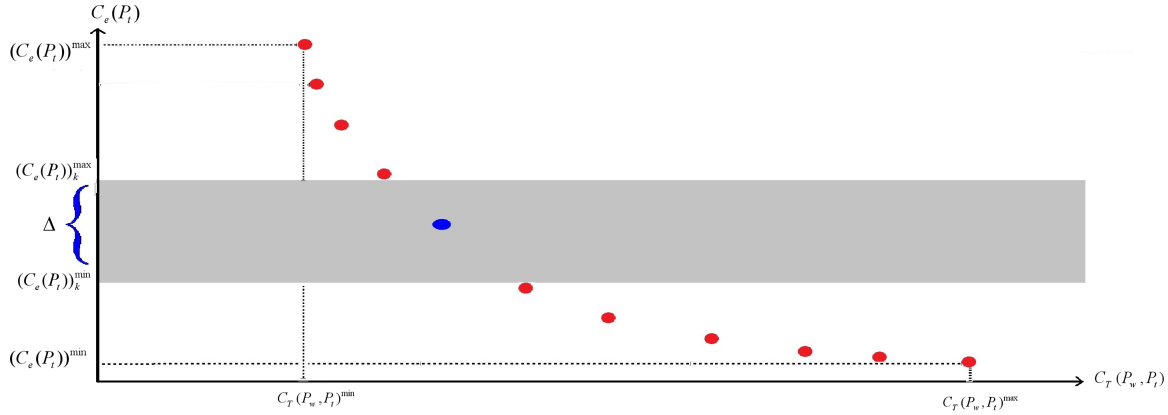
$\Delta = \frac{(C_e(P_t))^{max} - (C_e(P_t))^{min}}{N}$, temos que:

$$(C_e(P_t))_k^{min} = (C_e(P_t))^{min} + k \Delta \quad \text{e} \quad (C_e(P_t))_k^{max} = (C_e(P_t))^{min} + (k + 1) \Delta \quad (5.3)$$

em que: $(C_e(P_t))_0^{min} = (C_e(P_t))^{min}$ e $(C_e(P_t))_{N-1}^{max} = (C_e(P_t))^{max}$, onde $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

A Figura 5.1 apresenta esse procedimento que é utilizado no refinamento do MRCP para melhorar o preenchimento da curva.

Figura 5.1: Subintervalo para a função emissão de poluentes no MRCP



Fonte adaptada de Santos (2016)

A faixa de valores de $(C_e(P_t))_k^{max}$ e $(C_e(P_t))_k^{min}$ representa os limites superior e inferior da função $C_e(P_t)$, a qual será incorporada nos subproblemas mono-objetivos (5.4) como restrição canalizada. Segundo Santos (2016), para obter uma melhor distribuição de pontos na curva de Pareto-ótimo, maior deve ser a quantidade de subintervalos do conjunto I associados à função $C_e(P_t)$.

Com estas considerações, o conjunto de subproblemas mono-objetivos dados pelo MRCP, para o o PMDEATE (4.1) é dada em (5.4):

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } \{C_T(P_w, P_t)\} \\
 & \text{sujeito a } \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D \\
 & (C_e(P_t))_k^{min} \leq C_e(P_t) \leq (C_e(P_t))_k^{max} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \\
 & 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 & Pt_j^{min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{max} \quad j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

em que $(C_e(P_t))_k^{max}$ e $(C_e(P_t))_k^{min}$ estão definidas em (5.3)

Na formulação do modelo mono-objetivo (5.4), acrescenta-se a restrição de canalização da função custo de emissão dos poluentes $(C_e(P_t))$ definida em (3.17), consideradas pelos

limites inferiores de emissão $(C_e(P_t))_k^{min} \in I_k$ e limites superiores de emissão $(C_e(P_t))_k^{max} \in I_k$, para $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

Os problemas (4.8) e (4.10), por apresentarem a função senoidal retificada $(C_{c_2}(P_t))$ na função objetivo, não consideram em suas formulações a estratégia definida pelo MRCP à sua resolução, por estes problemas foi utilizada uma nova técnica denominada de PMPRCP, envolvendo a programação por metas ponderadas e o MRCP, apresentada na Seção 5.5.

A imagem das soluções também denominadas de soluções não-dominadas em Miettinen (1999) e Jones e Tamiz (2010), encontradas através da resolução de cada subproblema determinam a curva de Pareto-ótima (ou curva *trade-off*). O MRCP determina no máximo N soluções eficientes. Para a resolução dos N subproblemas mono-objetivo neste trabalho, será utilizado o método determinístico de pontos interiores.

5.2 Métodos de pontos interiores

Os métodos de pontos interiores têm sido amplamente investigados e utilizados na resolução de problemas de programação linear, quadrática e não-linear, demonstrando bom desempenho em problemas de grande porte.

Os métodos que apresentam melhor desempenho computacional, variante deste método, são aqueles inseridos na metodologia primal-dual de pontos interiores, muito explorados por Fang & Puthnpura (1993), e inicialmente investigados por Monteiro & Adler (1989) e Kojima et al. (1989). Os métodos que exploravam a função barreira logarítmica ou variantes dessa, passaram a ser utilizados possibilitando a prova de complexidade de tempo polinomial desses métodos. Em Mehrotra (1992), o método primal-dual previsor-corretor barreira logarítmica, em que a cada iteração é dado um passo previsor e um passo corretor à determinação das direções de movimento, resultando em direções de busca melhores que as apresentadas anteriormente.

Em trabalhos recentes como Pinheiro et al. (2015), foi desenvolvido um método primal-dual de pontos interiores e exteriores, de barreira logarítmica modificada, com estratégias de extrapolação cúbica e convergência global variante do método de Levenberg-Marquardt, o qual foi aplicado com sucesso à resolução de problemas de Fluxo de Potência Ótimo. Em Silva (2014), foi desenvolvido um método de pontos interiores/exteriores, com a estratégia de correção de inércia, que associado ao método de suavização de funções, obteve resultados

promissores à resolução do problema de despacho econômico com a inserção do carregamento de pontos de válvula. Para a resolução de problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental, destacamos Stanzani et al. (2014), que resolveu este problema sem a inserção de pontos de válvula e Gonçalves et al. (2019), que resolveu o mesmo problema com a inserção do carregamento de pontos de válvula.

Neste trabalho foi utilizado o pacote computacional *knitro*, do *software GAMS*, para resolução dos problemas propostos. Esse pacote computacional implementa o método de pontos de interiores para resolver problemas de otimização não-linear, utilizando o método de barreira logarítmica. O algoritmo usa regiões de confiança e uma função de mérito para promover a convergência, assim executando uma ou mais etapas de minimização em cada problema de barreira, diminuindo o parâmetro de barreira, e repetindo o processo até que o problema original seja resolvido com a precisão desejada (Gams).

O objetivo do trabalho é verificar como a inserção das unidades eólicas no sistema de geração de energia possibilita a redução da emissão dos gases poluentes. Para isso precisamos comparar as soluções encontradas para cada caso. O MRCP auxilia a determinação de uma curva de Pareto-ótima, em que é determinada as soluções dos sub-problemas, através de método de pontos interiores, utilizando o pacote computacional *knitro*. A técnica de programação por metas ponderadas será apresentada na Seção 5.3, com o objetivo de determinar soluções para cada caso proposto pelo problema.

5.3 Programação por metas

A programação por metas (*Goal programming*) é uma ferramenta para a otimização multiobjetivo que tem sido aplicada em uma variedade de problemas da área de engenharia, e é especialmente útil quando utilizada para analisar o equilíbrio entre os objetivos ambiental e econômico. O estado da arte na programação por metas foi sintetizado em Jones e Tamiz (2010), em que são detalhadas a modelagem e as técnicas de solução. Essa técnica permite ao tomador de decisões definir qual o melhor critério a ser utilizado para alcançar determinados objetivos ou metas de interesse a serem alcançadas.

A primeira abordagem por metas foi introduzida por Charnes et al. (1955) no contexto da remuneração dos executivos. Nesse ponto, o termo “programação por metas” não foi usado e o modelo foi visto como uma adaptação da programação linear. Uma teoria mais

formal da programação por metas foi definida por Charnes & Cooper (1957). Posteriormente, Lee et al. (1972) e Ignizio (1976) apresentaram a técnica como uma ferramenta de pesquisa operacional, levando a um grande número de aplicações descritas na literatura em meados dos anos 1970. Por apresentar uma formulação relativamente fácil, a técnica de programação por metas tornou-se uma ferramenta útil dentro do campo de tomada de decisões (Jones e Tamiz (2010)).

Alguns termos utilizados na formulação do modelo através da técnica de programação por metas são diferentes dos termos já conhecidos na formulação de problemas de otimização. Serão apresentados e definidos alguns dos termos utilizados para esta formulação da programação por metas:

- **tomador de decisão:** é quem decide ou pertence o problema. É o tomador de decisão que estabelece a meta e o critério que será considerado no problema, bem como se a solução encontrada é satisfatória de acordo com suas expectativas.
- **variáveis de desvio:** são variáveis que determinam o quanto acima ou abaixo da meta estabelecida a solução encontrada se desvia da meta estabelecida. Se o valor alcançado estiver acima do nível desejado, a diferença será dada pelo valor da variável de desvio positiva, caso o valor obtido estiver abaixo do nível desejado, a diferença será dada pelo valor da variável de desvio negativa.
- **critério:** é como será medida a meta a ser alcançada, isto é, a forma escolhida para encontrar a solução do problema. Existem diferentes critérios que podem ser utilizados. Um problema de decisão que possui mais de um critério é denominado problema de tomada de decisão com múltiplos critérios.
- **função critério:** é definida em função das variáveis de desvio e é formulada de acordo com o critério estabelecido pelo tomador de decisão.
- **meta:** refere-se a um critério e um nível numérico conhecido, também denominado como nível-alvo, ao qual o tomador de decisão deseja atingir nesse critério.
- **solução de compromisso:** são as soluções determinadas na resolução dos problemas pela técnica de programação por metas ponderadas, através de parâmetros de peso pré estabelecidos e impostos aos objetivos destes, escolhidos pelo tomador de decisão, e que, possivelmente, pertencem à curva de Pareto-ótimo.

A terminologia para a técnica de programação por metas é mais ampla, porém os conceitos apresentados acima são os básicos para o início da formulação de uma modelagem através desta técnica. As metas a serem alcançadas nem sempre são fáceis de serem atingidas, por isso é muito importante o tomador de decisão saber qual critério será adotado no problema a ser formulado.

Para a resolução dos problemas propostos apresentados no Capítulo 4, é considerada a técnica de programação por metas ponderadas (*Weigthed Goal Programming*), definida em Jones e Tamiz (2010), a qual utiliza parâmetros de peso impostos para determinar soluções de compromisso que pertençam à curva de Pareto-ótimo determinada pelo MRCP. As soluções de compromisso são definidas a partir de parâmetros de peso, os quais estabelecem quais das metas tem maior ou menor importância, auxiliando o tomador de decisão na busca de soluções de seu interesse.

Para uma melhor compreensão dos termos e da técnica de programação por metas será descrito a seguir um problema de otimização multiobjetivo em (5.5).

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} \quad \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\} \\
 &\text{Sujeito a} \quad Ax \leq b \\
 &\quad \quad \quad x \geq 0
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Utilizando a programação por metas ponderadas, a qual permite compensar diretamente todas as variáveis de desvio colocando-as em uma função critério ponderada e normalizada, tem-se a modelagem matemática em termos de programação por metas (5.5) é dada por:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} \quad w_1 \frac{p_1}{f_1^{\min}} + w_2 \frac{p_2}{f_2^{\min}} + w_3 \frac{p_3}{f_3^{\min}} \\
 &\text{Sujeito a} \quad Ax \leq b \\
 &\quad \quad \quad f_1(x) + n_1 - p_1 = f_1^{\min} \\
 &\quad \quad \quad f_2(x) + n_2 - p_2 = f_2^{\min} \\
 &\quad \quad \quad f_3(x) + n_3 - p_3 = f_3^{\min} \\
 &\quad \quad \quad x, n_1, n_2, n_3, p_1, p_2, p_3 \geq 0
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

em que:

- w_1 , w_2 e w_3 são os pesos ou ponderações dos objetivos, tais que w_1 , w_2 e $w_3 \in [0, 1]$ e $w_1 + w_2 + w_3 = 1$;
- f_1^{min} , f_2^{min} e f_3^{min} são as metas a serem alcançadas;
- n_1 , n_2 e n_3 as variáveis de desvio inferior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos f_1 , f_2 e f_3 ;
- p_1 , p_2 e p_3 as variáveis de desvio superior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos f_1 , f_2 e f_3 .

No problema (5.6), para as funções f_1 e f_2 , a função critério do problema minimizou as variáveis de desvio superior à meta e para a função f_3 a variável de desvio inferior, sendo assim, o tomador de decisão permite que as soluções encontradas possam ultrapassar o mínimo possível as metas estabelecidas para as funções f_1 e f_2 , enquanto para a função f_3 , permite que a solução encontrada não fique tão abaixo da meta estabelecida. Dizemos que os desvios positivos são indesejáveis nas f_1 e f_2 e na função f_3 a variável indesejável é o desvio negativo.

Os pesos auxiliam na determinação das soluções de compromisso do problema, as quais pertencem à curva de Pareto-ótimo. O tomador de decisão que determina para qual função será dada maior ou menor preferência, isto é, quanto maior o valor do peso associado a função, maior preferência será dada para esta função atingir a meta estabelecida.

As restrições já existentes anteriormente são mantidas no problema e são inseridas restrições adicionais referentes à diferença entre as variáveis de desvio inferior e superior, que são consideradas para verificar a melhor proximidade em relação às metas estabelecidas, em uma restrição de igualdade. Observe que $n_t \geq 0$ e $p_t \geq 0$, para $t = \{1, 2, 3\}$, mas essas são complementares entre si, ou seja, se $n_t > 0$ então $p_t = 0$ e vice-versa.

A solução é uma das soluções de compromisso encontradas e depende dos pesos w_1 e w_2 considerados pelo tomador de decisão, mas não é uma solução obtida facilmente devido às várias combinações de pesos possíveis.

A formulação da técnica de programação por metas ponderadas para o problema (4.1) será apresentada na Seção 5.4. Para a resolução do PMDEATE - PV e PMDEATE - PPV será apresentada uma técnica denominada de PMPRCP, envolvendo a programação por metas ponderadas e o MRCP, na Seção 5.5.

5.4 Programação por metas ponderadas

Será apresentada a formulação apenas do problema com representação das perdas nas linhas de transmissão e ponto de carregamento de válvula para a técnica de programação por metas ponderadas para o PMDEATE, PMDEATEb e PMDEATE₃, sendo que a formulação dos outros problemas é realizada de forma análoga. A função critério do problema (5.7) prioriza as variáveis de desvio superior, permitindo assim que as soluções encontradas possam estar acima das metas estabelecidas, dadas por $(C_T(P_w, P_t))^{min}$ e $(C_e(P_t))^{min}$.

Serão considerados os seguintes termos nesta formulação:

- w_1 e w_2 são os pesos ou ponderações dos objetivos, tais que $w_1, w_2 \in [0, 1]$ e $w_1 + w_2 = 1$;
- $(C_T(P_w, P_t))^{min}$ e $(C_e(P_t))^{min}$ são as metas a serem alcançadas, em que $(C_T(P_w, P_t))^{min}$ foi obtida resolvendo o problema (5.1) e $(C_e(P_t))^{min}$ com a resolução do problema (5.2).
- n_1 e n_2 são as variáveis de desvio inferior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos $(C_T(P_w, P_t))$ e $C_e(P_t)$;
- p_1 e p_2 as variáveis de desvio superior a meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos $(C_T(P_w, P_t))$ e $C_e(P_t)$, os quais estão sendo minimizados na função critério.

5.4.1 Formulação do PMDEATE - PPV

A formulação do modelo (4.10) por Programação por metas ponderadas é dada por:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar} \quad \frac{w_1 p_1}{(C_T(P_w, P_t))^{\min}} + \frac{w_2 p_2}{(C_e(P_t))^{\min}} \\
& \text{Sujeito a} \quad \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D + L \\
& C_c^1(P_t) + C_w(P_w) + n_1 - p_1 = (C_T(P_w, P_t))^{\min} \\
& C_e(P_t) + n_2 - p_2 = (C_e(P_t))^{\min} \\
& (C_c^2)_j(P_{t_j}) - v_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& (C_c^2)_j(P_{t_j}) + v_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\
& Pt_j^{\min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& v_j \in \Re \quad j = 1, 2, \dots, m \\
& n_1, n_2, p_1, p_2 \geq 0
\end{aligned} \tag{5.7}$$

De forma análoga ao problema (5.7), o PMDEATE, definido em (4.1) e o PMDEATE - PV, definido em (4.8) podem ser formulados da mesma forma.

5.4.2 Formulação do PMDEATEb - PPV

A formulação do modelo (5.8) por programação por metas ponderadas, onde as funções $C_{ec}(P_t, y)$, $C_w(P_w, x)$ e $C_{ec}(P_t, y)$, estão definidas na Seção 3.3, é dada por:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimizar} && \frac{w_1 p_1}{(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{\min}} + \frac{w_2 p_2}{(C_e(P_t, y))^{\min}} \\
& \text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n Pw_i \cdot x_i + \sum_{j=1}^m Pt_j \cdot y_j = D + L \\
& && C_c^1(P_t, y_j) + C_w(P_w, x_i) + n_1 - p_1 = (C_c(P_t, y_j) + C_w(P_w, x))^{\min} \\
& && C_e(P_t, y_j) + n_2 - p_2 = (C_e(P_t))^{\min} \\
& && (C_c^2)_j(P_t, y_j) - v_j \leq 0 && j = 1, 2, \dots, m \\
& && (C_c^2)_j(P_t, y_j) + v_j \geq 0 && j = 1, 2, \dots, m \\
& && 0 \leq Pw_i \cdot x_i \leq Pw_i^{\max} && i = 1, 2, \dots, n \\
& && Pt_j^{\min} \leq Pt_j \cdot y_j \leq Pt_j^{\max} && j = 1, 2, \dots, m \\
& && v_j \in \Re && j = 1, 2, \dots, m \\
& && x_i \in \{0, 1\} && i = 1, 2, \dots, n \\
& && y_j \in \{0, 1\} && j = 1, 2, \dots, m \\
& && n_1, n_2, p_1, p_2 \geq 0
\end{aligned} \tag{5.8}$$

onde as funções com variáveis binárias $C_c(P_t, y)$, $C_e(P_t, y)$ e $C_w(P_w, x)$ estão definidas na Seção 3.3.

De forma análoga ao problema (5.8), o PMDEATEb e o PMDEATEb - PV podem ser formulados da mesma forma.

5.4.3 Formulação do PMDEATE₃ - PPV

Diferentemente dos termos utilizados no PMDEATE e PMDEATEb, serão apresentados os termos utilizados para a resolução do PMDEATE₃ - PPV pela Programação por metas ponderadas.

- w_1 , w_2 e w_3 são os pesos ou ponderações dos objetivos, tais que $w_1, w_2, w_3 \in [0, 1]$ e $w_1 + w_2 + w_3 = 1$;
- $(C_c(P_t))^{\min}$, $(C_w(P_w))^{\min}$ e $(C_e(P_t))^{\min}$ são as metas a serem alcançadas.
- n_1 , n_2 e n_3 são as variáveis de desvio inferior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos $C_c(P_t)$, $C_w(P_w)$ e $C_e(P_t)$;

- p_1 , p_2 e p_3 as variáveis de desvio superior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos $C_c(P_t)$, $C_w(P_w)$ e $C_e(P_t)$, os quais estão sendo minimizados na função critério.

A formulação do modelo (4.12) por Programação por metas ponderadas é dada por:

$$\begin{aligned}
&\text{Minimizar} && \frac{w_1 p_1}{(C_c(P_t))^{\min}} + \frac{w_2 p_2}{(C_w(P_w))^{\min}} + \frac{w_3 p_3}{(C_e(P_t))^{\min}} \\
&\text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D + L \\
&&& C_c^1(P_t) + n_1 - p_1 = (C_c(P_t))^{\min} \\
&&& C_w(P_w) + n_2 - p_2 = (C_w(P_w))^{\min} \\
&&& C_e(P_t) + n_3 - p_3 = (C_e(P_t))^{\min} \\
&&& (C_c^2)_j(P_{t_j}) - v_j \leq 0 && j = 1, 2, \dots, m \\
&&& (C_c^2)_j(P_{t_j}) + v_j \geq 0 && j = 1, 2, \dots, m \\
&&& 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{\max} && i = 1, 2, \dots, n \\
&&& Pt_j^{\min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{\max} && j = 1, 2, \dots, m \\
&&& v_j \in \Re && j = 1, 2, \dots, m \\
&&& n_1, n_2, n_3, p_1, p_2, p_3 \geq 0
\end{aligned} \tag{5.9}$$

De forma análoga ao problema (5.9), o PMDEATE₃ e o PMDEATE₃ - PV podem ser formulados da mesma forma.

5.5 Programação por metas ponderadas com restrições canalizadas progressivas (PMPRCP)

A técnica de programação por metas ponderadas com restrições canalizadas progressivas (PMPRCP) é uma combinação do MRCP e a técnica de programação por metas ponderadas e surgiu devido à dificuldade apresentada na resolução do problema da técnica de programação por metas em relação à função valor absoluto senoidal, que ocorre na função custo de combustíveis ($C_c(P_t)$), vista em (3.15), estar na restrição do problema.

Com a mesma ideia apresentada nas transformações definidas no Capítulo 4, referente aos problemas (4.6) e (4.7), a função senoidal $(C_{c_2}(P_t))$ foi tratada como em (4.6) e (4.7).

Na Seção 5.5.1 uma nova formulação envolvendo o MRCP e a programação por metas ponderadas será apresentada.

5.5.1 Formulação do PMDEATE - PPV por PMPRCP

A modelagem do PMDEATE - PV utilizando a PMPRCP é dada por:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} && \frac{w_1 p_1}{(C_T(P_w, P_t))^{\min}} + \frac{w_2 p_2}{\frac{1}{2} ((C_e(P_t))_k^{\min} + (C_e(P_t))_k^{\max})} \\
 &\text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n Pw_i + \sum_{j=1}^m Pt_j = D + L \\
 &&& C_c^1(P_t) + C_w(P_w) + n_1 - p_1 = (C_T(P_w, P_t))^{\min} \\
 &&& C_e(P_t) + n_2 = (C_e(P_t))_k^{\max} \\
 &&& C_e(P_t) - p_2 = (C_e(P_t))_k^{\min} \\
 &&& (C_c^2)_j(P_{t_j}) - v_j \leq 0 && j = 1, 2, \dots, m \\
 &&& (C_c^2)_j(P_{t_j}) + v_j \geq 0 && j = 1, 2, \dots, m \\
 &&& 0 \leq Pw_i \leq Pw_i^{\max} && i = 1, 2, \dots, n \\
 &&& Pt_j^{\min} \leq Pt_j \leq Pt_j^{\max} && j = 1, 2, \dots, m \\
 &&& v_j \in \Re && j = 1, 2, \dots, m \\
 &&& n_1, n_2, p_1, p_2 \geq 0
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

De forma análoga ao problema (5.10), o PMDEATEb - PPV, definido em (4.11) pode ser formulado da mesma forma.

Para a resolução do PMDEATE, definido em (4.1), será utilizado o MRCP, através dos subproblemas mono-objetivos definidos em (5.4), para encontrar as soluções eficientes que compõem a curva de Pareto-ótimo. Para o PMDEATE - PV e PMDEATE -PPV, definidos respectivamente em (4.8) e (4.10), a resolução foi realizada com a utilização das técnicas de PMPRCP, definida em (5.10) devido à inserção da função senoidal retificada na função objetivo do problema, para encontrar as soluções eficientes que compõem a curva de Pareto-ótimo.

Os problemas PMDEATE – PPV. PMDEATEb – PPV e PMDEATE₃ – PPV, definidos

respectivamente em (5.7), (5.8) e (5.9) e formulados através da técnica de programação por metas ponderadas, são utilizados para determinar as soluções de compromisso para os PMDEATE's apresentados nas Seções 4.2, 4.3 e 4.4.

Para resolução dos problemas propostos foram realizadas simulações da geração de energia sem e com a utilização de usinas eólicas. Foram realizados casos onde o sistema apresenta somente as unidades termoeletricas e posteriormente as unidades eólicas são inseridas gradativamente ao sistema de geração, com o objetivo de verificar sua eficiência na redução da emissão dos gases poluentes na atmosfera, quanto na redução dos custos operacionais de geração de energia. As resoluções dos subproblemas mono-objetivos definidos neste capítulo foram realizadas através do *software GAMS* utilizando o pacote computacional *knitro*. Os resultados obtidos serão apresentados no Capítulo 6.

Resultados

Para analisarmos a importância da produção eólica na redução da emissão dos gases na atmosfera e nos custos operacionais de produção de energia, foi realizada uma comparação na quantidade de emissão que o sistema de energia produzia sem a inserção das usinas eólicas e, posteriormente, com a inserção das unidades eólicas.

A implementação foi realizada com o objetivo de apresentar a influência da utilização da energia eólica na questão ambiental, relativa à redução de poluentes, bem como nos custos de produção do sistema.

Os dados apresentados das usinas eólicas, os quais são: a quantidade de unidades em cada parque eólico e a potência máxima de cada unidade. Assim como o limitante máximo da potência do gerador eólico (Pw_i^{max}), o coeficiente de custo direto, os coeficientes de custo penalidade e custo reserva e os limitantes de velocidade do vento, associados às turbinas eólicas (v_i , v_r e v_0), serão apresentados no Apêndice B, para cada caso.

Os parâmetros c e k da função de densidade de probabilidade de *Weibull*, definida em (3.2), foram calculados com base na velocidade média do vento na região nordeste do Brasil, baseado nos dados apresentados em Silva (2003). A velocidade média adotada na simulação proposta foi de 7.5 m/s , assim os parâmetros c e k , calculados, respectivamente, de acordo com as equações em (3.4), dados por: $c = 8.47 \text{ m/s}$ e $k = 2.26$.

Os custos com combustíveis e emissão de poluentes são representados respectivamente em dólar por hora ($\$/h$) e quilograma por hora (Kg/h). Os dados utilizados nos testes com esses problemas foram, os coeficientes de custo e de emissão e os limites operacionais das unidades termoeletricas, que são apresentados no Apêndice B.

A resolução dos subproblemas foi realizada explorando as técnicas MRCP, programação por metas ponderadas para o PMDEATE, apresentado na Seção 4.2, o PMDEATEb, apre-

sentado na Seção 4.3 e o PMDEATE₃, apresentado na Seção 4.4 e a nova técnica denominada PMPRCP, para os problemas com ponto de carregamento de válvula e representação das perdas nas linhas de transmissão. Em todos os testes foi utilizado o *software knitro*.

As soluções obtidas são apresentadas graficamente com as seguintes representações:

1. solução ideal ($\times$): valores lexicográficos do problema $((C_T(P_w, P_t))^{min}, C_e(P_t)^{min})$ de acordo com as soluções do problema (5.1) e (5.2).
2. soluções eficientes (*): soluções dos subproblemas (5.4) resolvidos através do MRCP e dos subproblemas utilizando a técnica de PMPRCP, as quais determinam os valores que compõem a curva de Pareto-ótima.
3. soluções de compromisso ($\circ$): soluções determinadas para os problemas (5.7), (5.8) e (5.9) através da técnica de programação por metas ponderadas e do problema (5.10), determinadas a partir dos pesos w_1 e w_2 considerados.
4. solução da programação por metas ponderadas ($\square$): solução de compromisso escolhida pelo tomador de decisão, como a solução encontrada mais próxima da solução ideal. Essa solução foi determinada como a solução eficiente que minimizava a distância euclidiana com a solução ideal na curva Pareto ótima.

Os pontos que compõem as curvas das figuras que serão apresentadas para cada caso, são os valores encontrados para a função custo total $(C_T(P_w, P_t))$ e para a função de emissão de poluentes $(C_e(P_t))$, que compõem a curva de Pareto-ótima, relacionados às soluções eficientes determinadas para cada subproblema mono-objetivo, gerados através do MRCP e da PMPRCP e resolvidos pelo *software GAMS*. A solução encontrada pela técnica de programação por metas ponderada está contida nas curvas de Pareto-ótima vistas nas figuras citadas e, de acordo com o valor dado ao peso w_1 e w_2 na função critério dos modelos definida por esta técnica. Podemos encontrar sobre essa curva, as soluções de compromisso determinadas com os pesos relativos às metas impostas pelo tomador de decisão. Serão apresentadas em todas as Figuras, as soluções de compromisso com seus respectivos pesos. Obviamente, mais soluções de compromisso podem ser determinadas se outros pesos forem impostos. É observado que a solução mais próxima possível da solução ideal, a qual é o menor valor da função custo total $(C_T(P_w, P_t))$ e o menor valor da função função de emissão de poluentes $(C_e(P_t))$, representada nas figuras, é a solução de compromisso que

melhor otimiza ambas as funções objetivo, mas que, não necessariamente, é de interesse do tomador de decisão. Ressalta-se que, esta solução não é obtida de forma simples, pois dependem de uma combinação de pesos, entre a infinidade de escolhas possíveis em $[0, 1]$.

Foram resolvidas, para cada caso, os problemas (5.1) e (5.2), observando-se as soluções lexicográficas, dadas por $(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{max}$ e $(C_T(P_w, P_t))^{max}, (C_e(P_t))^{min}$.

A solução ideal e o conjunto $I = [(C_e(P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{max}]$, utilizado para determinar as soluções eficientes do MRCP e PMPRCP. Para a construção da curva de Pareto-ótima, as soluções eficientes são obtidas considerando uma partição em N subintervalos contidos em I , $I_k \subset I$, para $k = 0, 1, \dots, N - 1$, definidas no Capítulo 5.1.

Caso 1: Sistema 30 Barras - 6 geradores termoeletricos

Os dados para a os testes com os problemas (4.1), (4.8) e (4.10) associado ao sistema de 30 barras, são encontrados em Silva (2014). Os coeficientes de custo das unidades termoeletricas são apresentados na Tabela B.1 e os dados referentes às unidades eólicas estão na Tabela B.2, encontrada no Apêndice B.

Foram investigados os seguintes casos:

1A: 6 geradores termoeletricos.

1B: 6 geradores termoeletricos e unidade eólica 1.

1C: 6 geradores termoeletricos e unidade eólica 1 e 2.

Em todos os casos a demanda de produção de potência gerada é $D = 283.4MW$.

6.1 Resolução dos problemas com 2 objetivos

6.1.1 Resultados para o PMDEATE

Nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 são apresentadas as soluções eficientes dos subproblemas mono-objetivo (5.4) obtidas utilizando a estratégia de MRCP e a técnica de programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C.

Figura 6.1: Resultados do PDEATE para o caso 1A

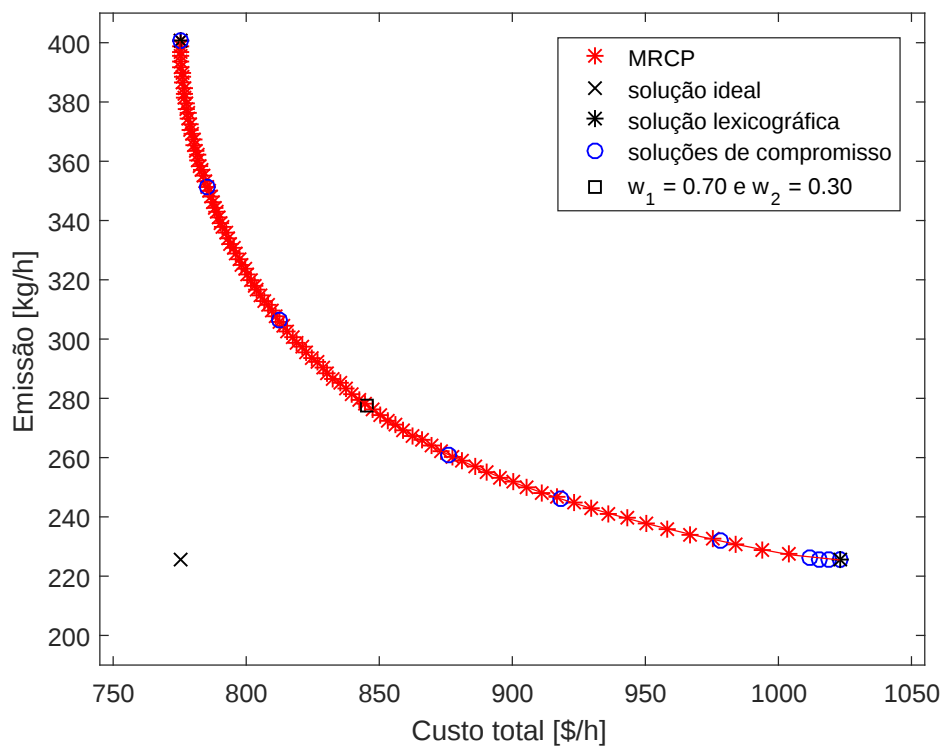


Figura 6.2: Resultados do PDEATE para o caso 1B

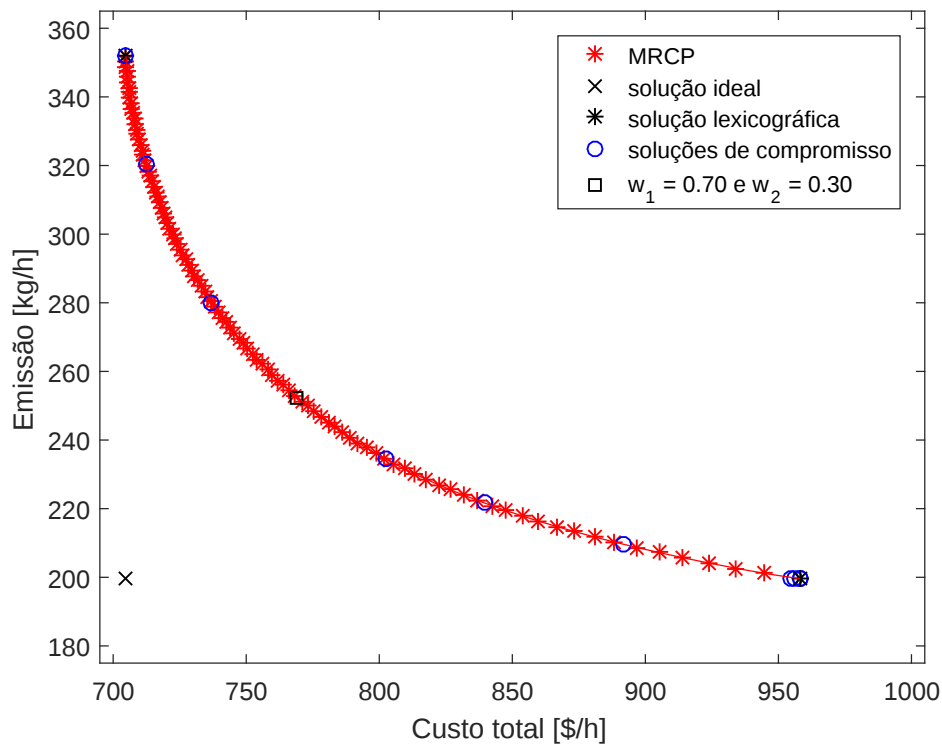
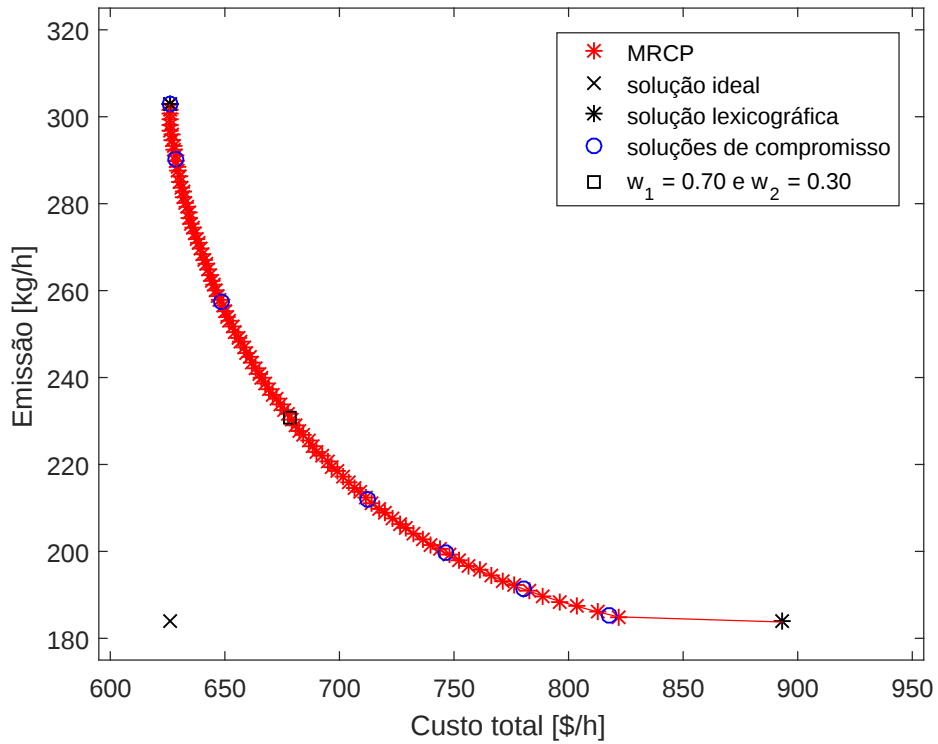


Figura 6.3: Resultados do PDEATE para o caso 1C



As soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A, 1B e 1C são apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	1A	1B	1C
$(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{max}$	(775.11 , 400.56)	(704.84 , 351.94)	(625.92 , 302.97)
$(C_T(P_w, P_t))^{max}, (C_e(P_t))^{min}$	(1023.00 , 225.47)	(958.05 , 199.59)	(893.47 , 183.26)
$(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{min}$	(775.11 , 225.47)	(704.84 , 199.59)	(625.92 , 183.26)
$I = [(C_e(P_t))^{min}, C_e(P_t)^{max}]$	[225.47 , 400.56]	[199.59 , 351.94]	[183.26 , 302.97]

As soluções de compromisso representadas por (o e □) nas Figuras 6.1 a 6.3, foram

encontradas pela técnica de programação por metas ponderadas, com os pesos w_1 e w_2 , onde $w_1 + w_2 = 1$. A Tabela 6.2 apresenta a solução de compromisso encontrada para $w_1 = 0.70$ e $w_2 = 0.30$, representada com o símbolo “ $\square$ ”, a qual está mais próxima da solução ideal, dando assim maior peso para a função custo total $C_T(P_w, P_t)$ referente à função custo de combustíveis e custo das unidades eólicas.

Tabela 6.2 - Valores do custo total e emissão pela programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_T(P_w, P_t)$	$C_e(P_t)$	redução da emissão	redução de custo
1A	845.51	0.00	845.51	277.44	-	-
1B	732.27	36.82	769.09	252.49	8.99%	9.04%
1C	604.86	73.73	678.60	230.49	16.92%	19.74%

A Tabela 6.2, compara os resultados obtidos para os casos 1B e 1C com o caso 1A. Assim evitou-se a emissão de, respectivamente, 24.95 Kg/h e 46.95 Kg/h para os casos 1B e 1C, o que representa percentualmente uma redução de 8.99% e 16.92%. Com relação aos custos operacionais, também houve uma redução nos casos 1B e 1C, representando, respectivamente por 76.42 $\$/h$ e 167.11 $\$/h$, pois há mais usinas eólicas em operação.

Na técnica de programação por metas ponderadas, o tomador de decisão analisa e decide se a solução encontrada é ou não satisfatória para o problema proposto. A Tabela (6.3) apresenta os valores das variáveis de desvio superior, nos casos 1A, 1B e 1C. As variáveis de desvio inferior n_i para $i = 1, 2$ são iguais a zero.

Tabela 6.3 - Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para PMDEATE

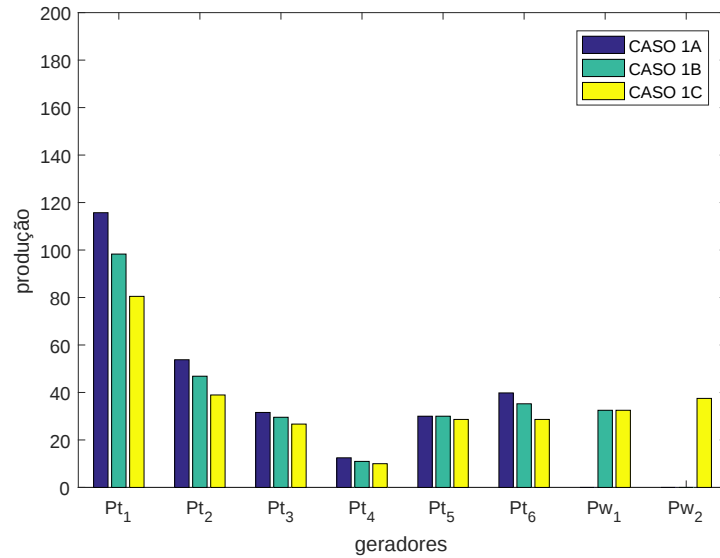
CASO	p_1	p_2
1A	70.398	51.975
1B	64.256	52.904
1C	52.675	47.230

Analisando cada caso, vistos na Tabela 6.3 tem-se que para o caso 1A: as variáveis de desvio superior (p_1 e p_2), respectivamente referentes às funções ($C_T(P_w, P_t)$) e $C_e(P_t)$, mostram que para a função $C_T(P_w, P_t) = 845.51$ $\$/h$ ultrapassou 9.08% da meta esta-

belecida ($C_T(P_w, P_t)^{min} = 775.11 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para $C_e(P_t) = 277.44 \text{ Kg/h}$ ultrapassou 23.05% da meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 225.47 \text{ Kg/h}$). No caso 1B, as variáveis de desvio superior (p_1 e p_2), mostram que a função $C_T(P_w, P_t) = 769.09 \text{ \$/h}$ ultrapassou 9.12% da meta estabelecida ($(C_T(P_w, P_t))^{min} = 704.84 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para $C_e(P_t) = 252.49 \text{ Kg/h}$ ultrapassou 26.51% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 199.59 \text{ Kg/h}$). No caso C, as variáveis de desvio superior (p_1 e p_2), mostram que a função $C_T(P_w, P_t) = 678.60 \text{ \$/h}$ ultrapassou 8.42% da meta estabelecida ($(C_T(P_w, P_t))^{min} = 625.92 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para $C_e(P_t) = 230.49 \text{ Kg/h}$ ultrapassou 25.77% da meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 183.26 \text{ Kg/h}$).

A Figura 6.4 mostra a produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.4: Produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C



Com a inserção do gerador eólico no sistema de geração de energia, nota-se que todos geradores termoeletrônicos P_{t_1} a P_{t_6} reduziram suas produções do caso 1A para o casos 1B e 1C. As potências eólicas P_{w_1} e P_{w_2} produziram o máximo de potência dos seus geradores.

6.1.2 Resultados para o PMDEATE - PV

Nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 são apresentadas as soluções eficientes dos subproblemas mono-objetivo (4.8) obtidas utilizando a estratégia de PMPRCP e a técnica de programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C.

Figura 6.5: Resultados do PMDEATE - PV para o caso 1A

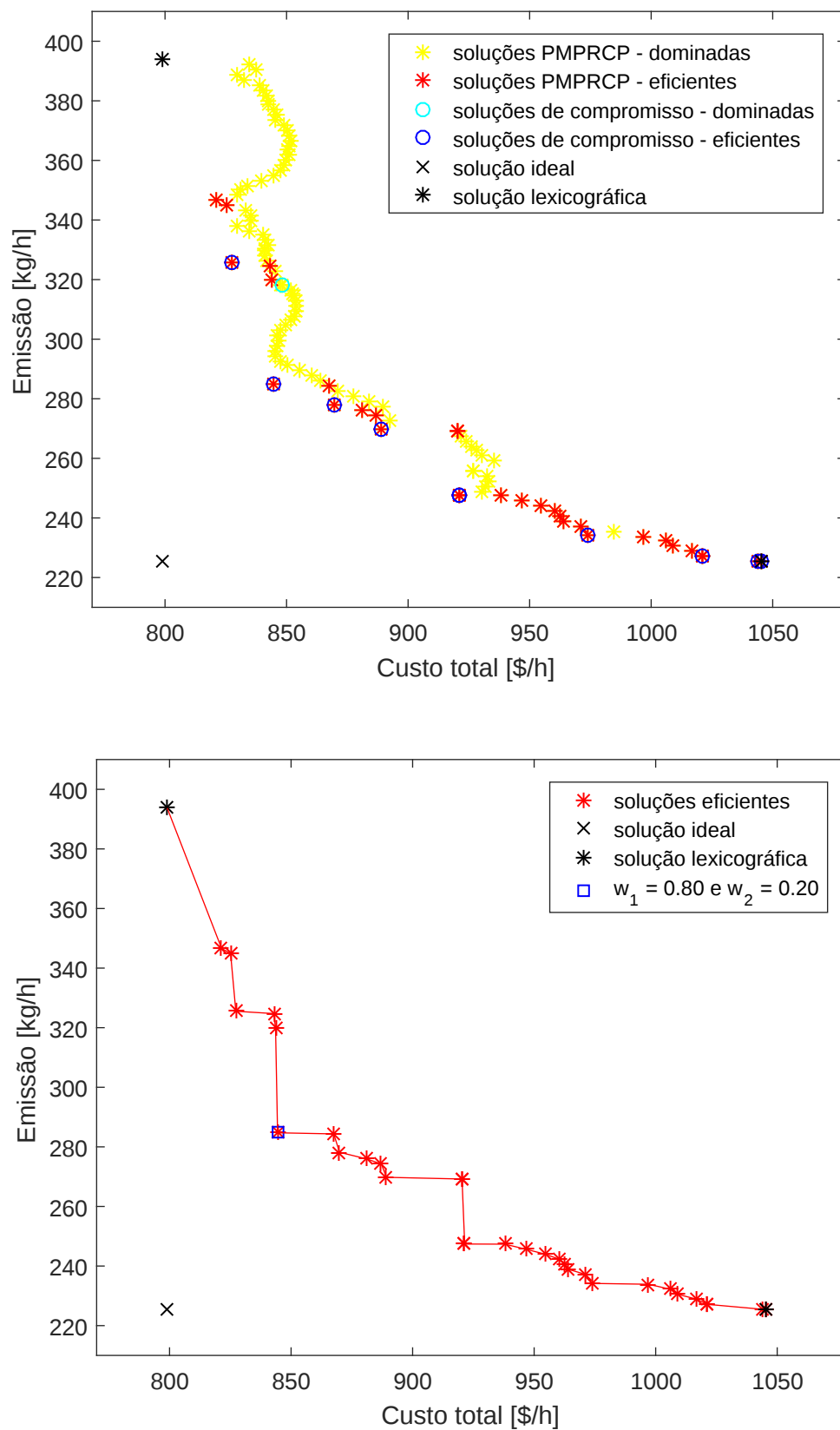


Figura 6.6: Resultados do PMDEATE - PV para o caso 1B

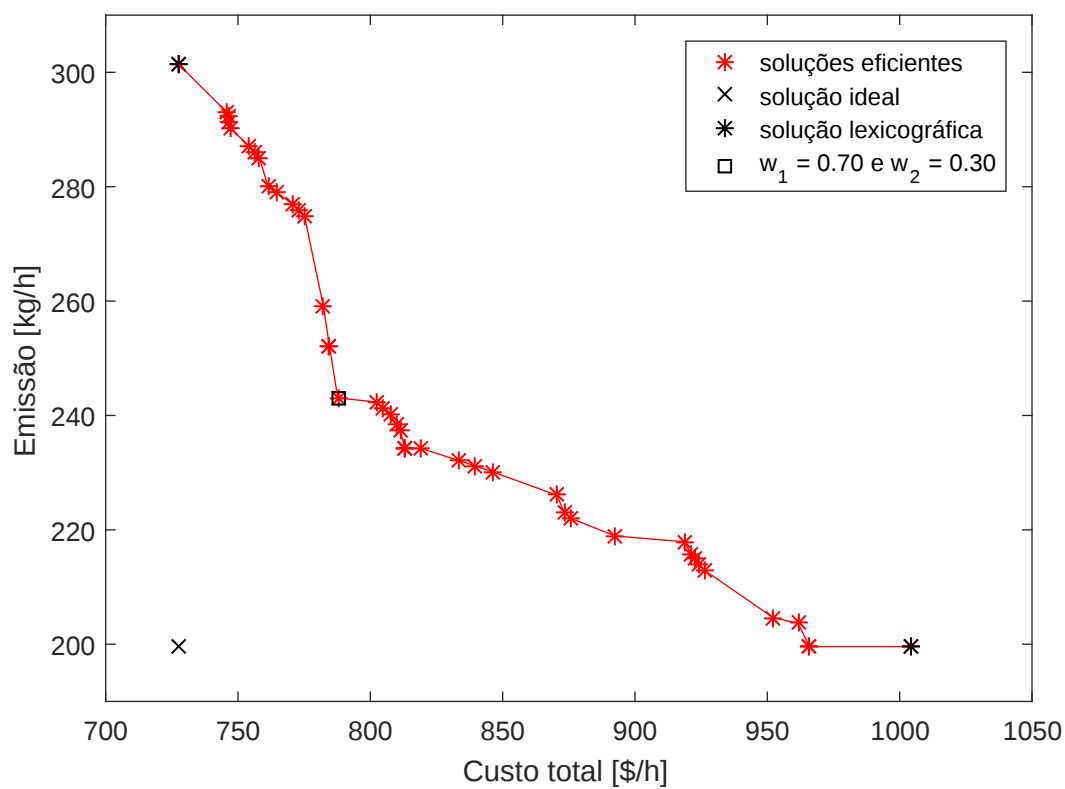
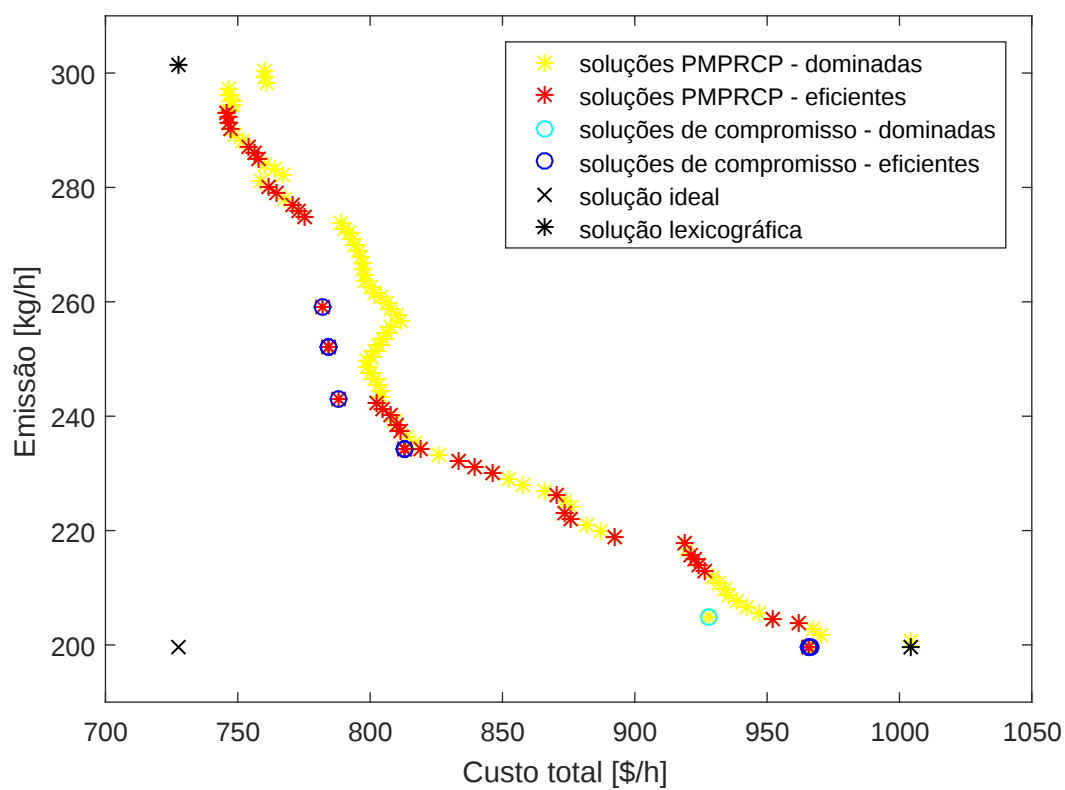
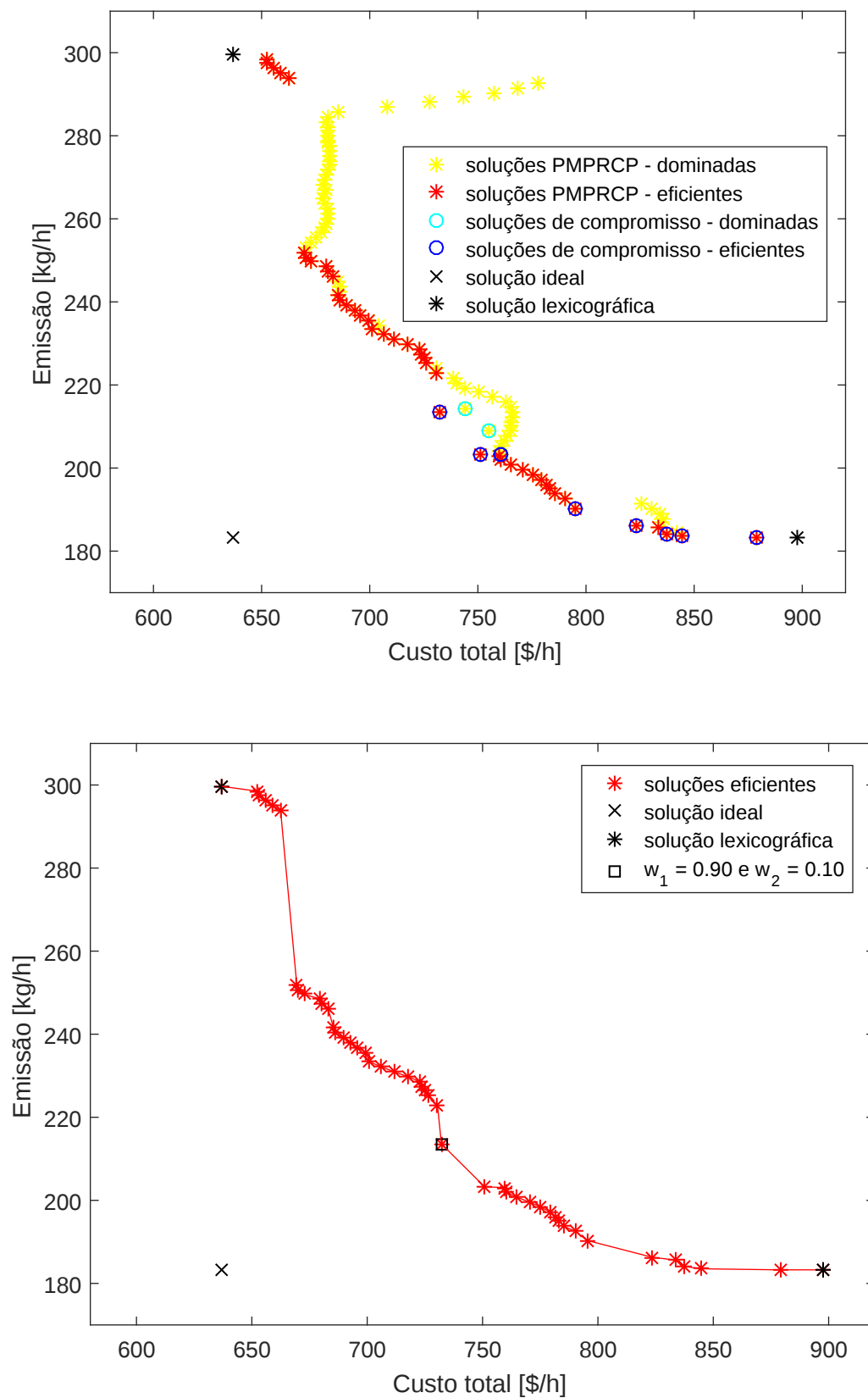


Figura 6.7: Resultados do PMDEATE - PV para o caso 1C



A Tabela 6.4 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A, 1B e 1C.

Tabela 6.4 - Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	1A	1B	1C
$(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{max}$	(799.04 , 393.70)	(727.57 , 301.40)	(636.99 , 299.68)
$(C_T(P_w, P_t))^{max}, (C_e(P_t))^{min}$	(1045.20 , 225.47)	(966.00 , 199.59)	(897.50 , 183.26)
$(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{min}$	(799.04 , 225.47)	(727.57 , 199.59)	(636.99 , 183.26)
$I = [C_e(P_t)^{min}, C_e(P_t)^{max}]$	[225.47 , 393.70]	[199.59 , 301.40]	[183.26 , 299.68]

Nas Figuras 6.5 - 6.7 podemos verificar que nos casos 1A, 1B e 1C, para a função emissão $(C_e(P_t))$ existem subintervalos onde não foram encontradas solução eficientes, assim foi realizada uma reaplicação do PMPRCP para uma subpartição dos intervalos $I_k = [C_e(P_t)_k^{min}, C_e(P_t)_k^{max}]$ onde isso ocorre. No caso 1A, a partição foi feita para o intervalo $I_1 = [350, 490]$, caso 1B, a partição feita para o intervalo $I_2 = [240, 270]$ e caso 1C, a partição feita para o intervalo $I_3 = [250, 295]$ que foi subdividido em 20 intervalos. No caso 1B foram encontradas soluções eficientes, mas nos casos 1A e 1C todos as soluções encontradas são dominadas.

As soluções de compromisso representadas por ($\circ$ e $\square$) nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7, foram encontradas pela técnica PMPRCP, utilizando os pesos w_1 e w_2 , onde $w_1 + w_2 = 1$. Nos PDEATE - PV a função $C_c(P_t)$ é não convexa e não diferenciável, por conta disto, algumas soluções de compromisso podem ser dominadas, e foram representadas no gráfico com o símbolo $\circ$ em azul claro.

A Tabela 6.5 apresenta a solução de compromisso encontrada para $w_1 = 0.80$ e $w_2 = 0.20$ para o caso 1A, $w_1 = 0.70$ e $w_2 = 0.30$ para o caso 1B e $w_1 = 0.90$ e $w_2 = 0.10$ para o caso 1C, as quais são as soluções mais próximas da solução ideal em cada caso apresentado. Em todos os casos, foi dado maior peso para a função custo total $(C_T(P_w, P_t))$, dando preferência à função custo.

Tabela 6.5 - Valores do custo total e emissão pela programação por metas para o PMDEATE - PV

CASO	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_c(P_t) + C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	redução da emissão	redução de custo
1A	844.44	0.00	844.44	284.72	-	-
1B	750.87	36.82	787.69	243.07	14.63%	6.72%
1C	658.43	73.73	732.16	213.59	24.98%	13.30%

A Tabela 6.5 compara os resultados obtidos nos casos 1B e 1C com o caso 1A, mostrando que a inserção da energia eólica no sistema de energia reduz a emissão dos poluentes. Mesmo com uma redução de 14.63% para o caso 1B e 24.98% para o caso 1C, o que em Kg/h , são dados por 41.65 Kg/h e 71.13 Kg/h , respectivamente. E com relação aos custos, na resolução deste problema a redução foi de 56.75 $\$/h$ e 112.28 $\$/h$, respectivamente para os casos 1B e 1C.

Os valores apresentados só podem ser comparados após a análise do tomador de decisão. A Tabela (6.6) apresenta o valor ultrapassado da meta para cada caso apresentado, pois apenas as variáveis de desvio superior tiveram valores maiores que zero nos casos 1A, 1B e 1C.

Tabela 6.6 - Variáveis de desvio da Programação por metas ponderadas para o PMDEATE - PV

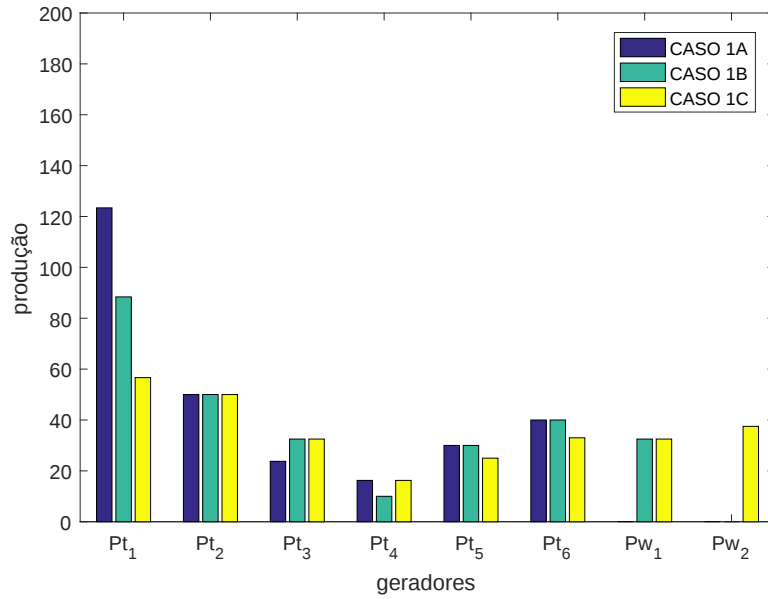
CASO	p_1	p_2
1A	45.396	59.251
1B	60.128	43.477
1C	95.176	30.330

Analisando cada caso, vistos na Tabela 6.6 tem-se que no caso 1A, a função custo total ($C_T(P_w, P_t) = 844.44 \text{ } \$/h$) ultrapassou 5.68% da meta estabelecida ($C_T(P_w, P_t)^{min} = 799.04 \text{ } \$/h$) e o valor encontrado para a função emissão ($C_e(P_t) = 284.72 \text{ } Kg/h$) ultrapassou 26.28% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 225.47 \text{ } Kg/h$). No caso 1B, a função custo total ($C_T(P_w, P_t) = 787.69 \text{ } \$/h$) ultrapassou 8.26% da meta estabelecida ($C_T(P_w, P_t)^{min} = 727.57 \text{ } \$/h$) e o valor encontrado para a função emissão ($C_e(P_t) = 243.07 \text{ } Kg/h$) ultrapassou 21.78% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 199.59 \text{ } Kg/h$). No caso 1C,

a função custo total ($C_T(P_w, P_t) = 732.16 \text{ \$/h}$) ultrapassou 14.94% da meta estabelecida ($C_T(P_w, P_t)^{min} = 636.99 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para a função emissão ($C_e(P_t) = 245.33 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 16.55% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 183.26 \text{ Kg/h}$).

A Figura (6.8) mostra a produção dos geradores termoelétricos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.8: Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C



Com a inserção do gerador eólico no sistema de geração de energia, nota-se que todos geradores termoelétricos P_{t1} a P_{t6} reduziram suas produções, enquanto o gerador P_{w1} e P_{w2} produziram o máximo de potência dos seus geradores.

6.1.3 Resultados para o PMDEATE - PPV

Nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 são apresentadas 100 soluções eficientes dos subproblemas mono-objetivo (4.10) obtidas utilizando a estratégia de PMPRCP.

Figura 6.9: Resultados do PMDEATE - PPV para o caso 1A

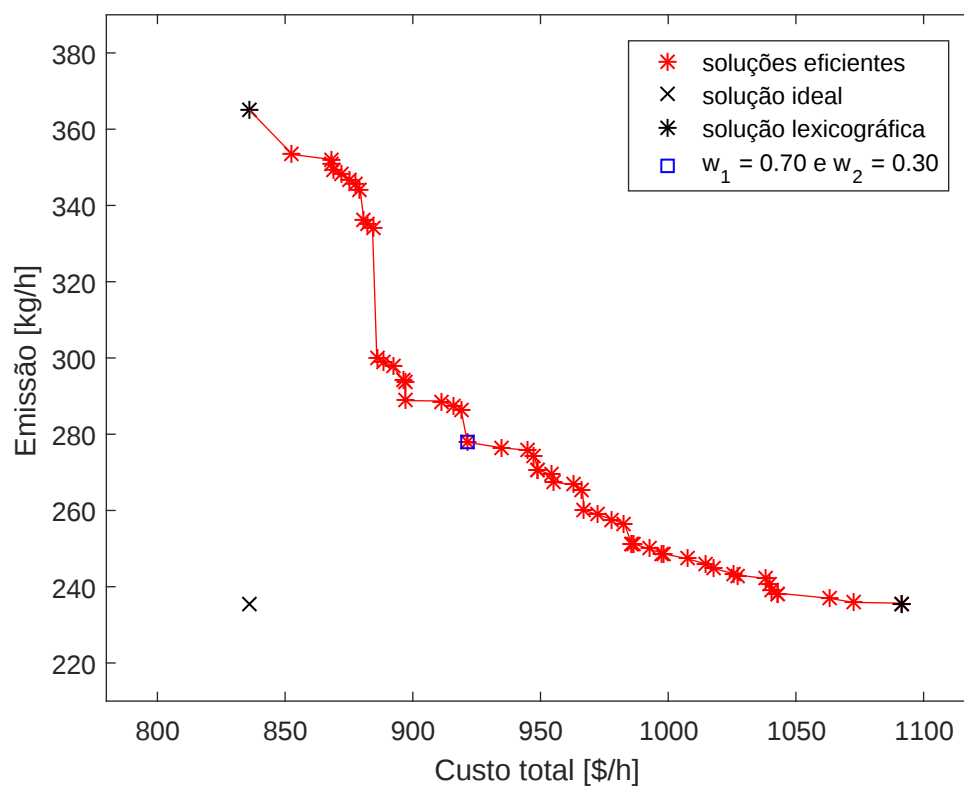
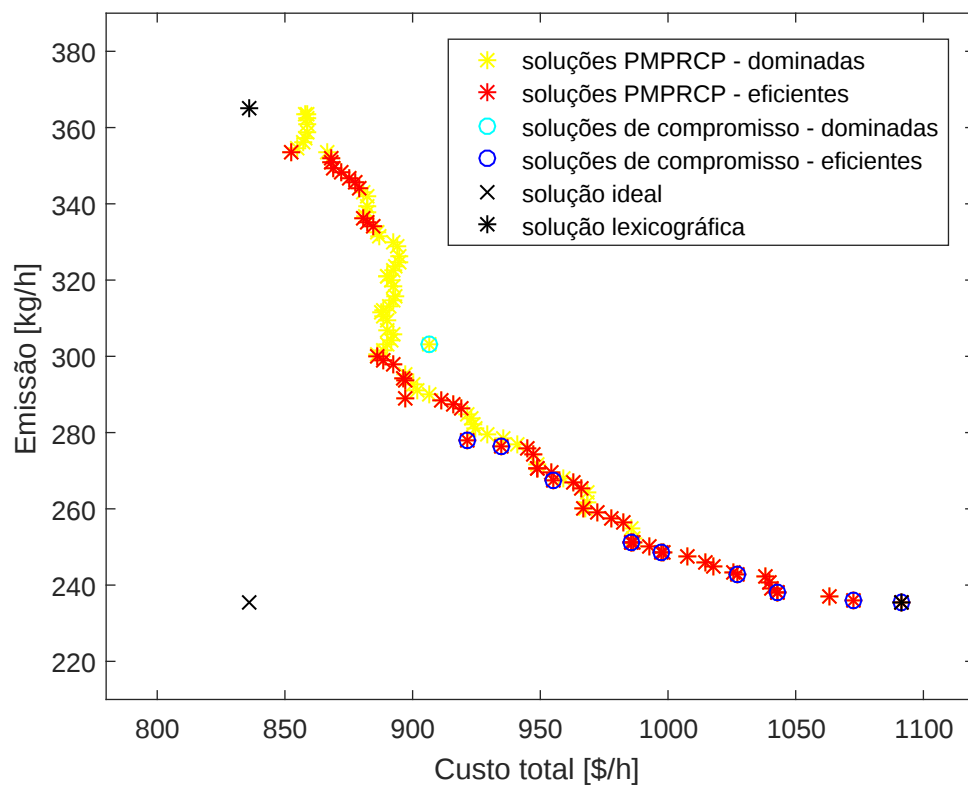


Figura 6.10: Resultados do PMDEATE - PPV para o caso 1B

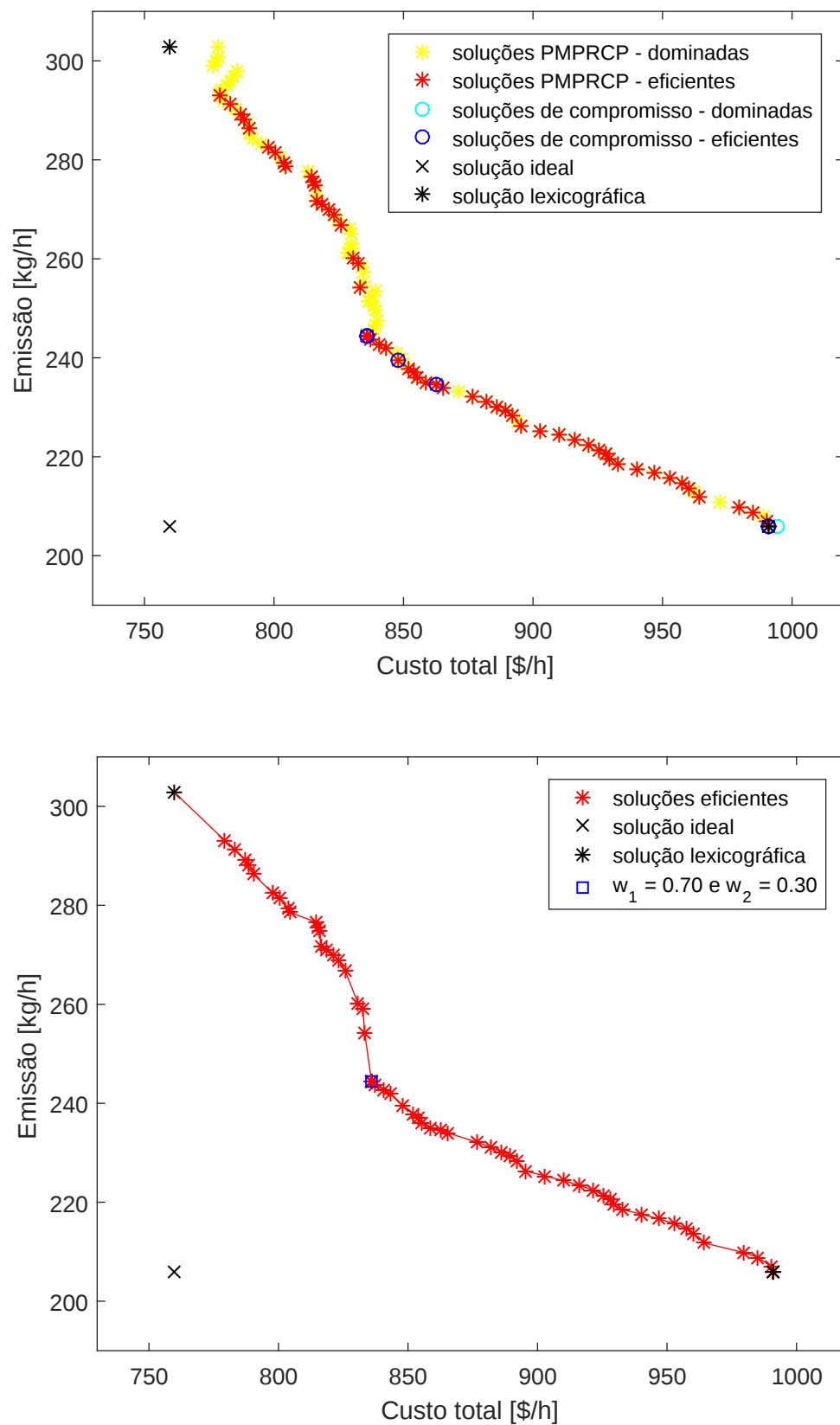
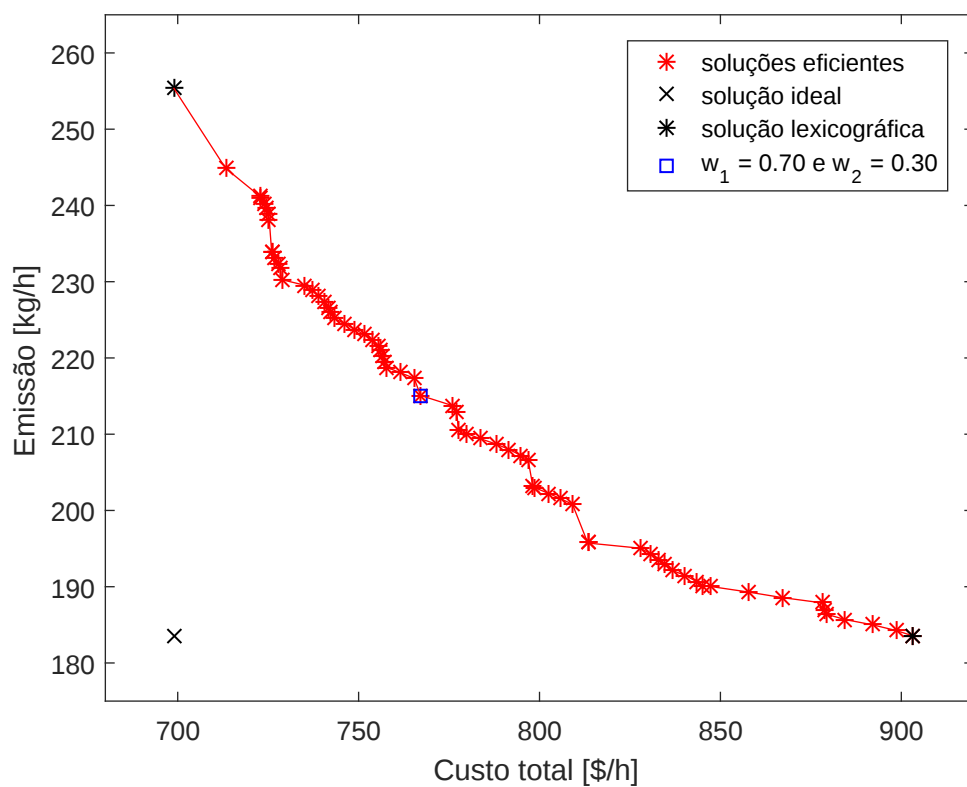
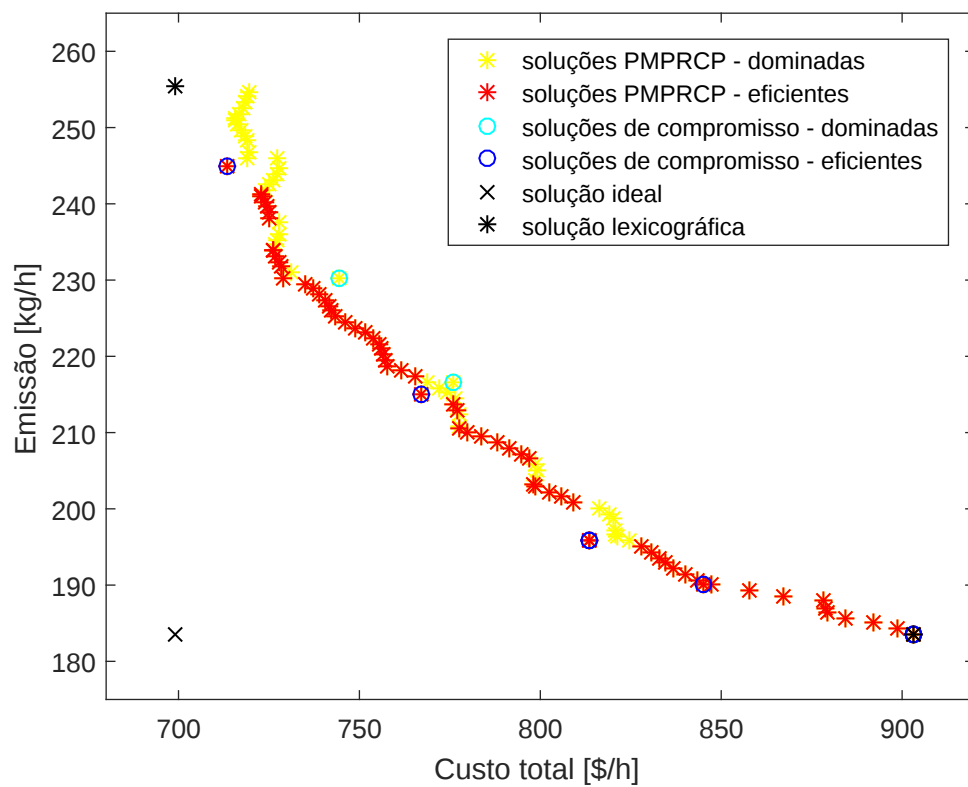


Figura 6.11: Resultados do PMDEATE - PPV para o caso 1C



A Tabela 6.7 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A e 1B.

Tabela 6.7 - Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	1A	1B	1C
$(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{max}$	(836.05 , 365.01)	(759.93 , 302.77)	(698.86 , 255.42)
$(C_T(P_w, P_t))^{max}, (C_e(P_t))^{min}$	(1047.60 , 225.69)	(976.51 , 205.97)	(903.29 , 183.55)
$(C_T(P_w, P_t))^{min}, (C_e(P_t))^{min}$	(836.05 , 225.69)	(759.93 , 205.97)	(698.86 , 183.55)
$I = [C_e(P_t)^{min}, C_e(P_t)^{max}]$	[225.69 , 365.01]	[199.59 , 301.40]	[183.55 , 255.42]

Nas Figuras 6.9 - 6.11 podemos verificar que no caso 1A, para a função emissão $(C_e(P_t))$ existem subintervalos onde não foram encontradas solução eficientes, assim foi realizada uma reaplicação do PMPRCP para uma subpartição dos intervalos $I_k = [C_e(P_t)_k^{min}, C_e(P_t)_k^{max}]$ onde isso ocorre. No caso 1A, a partição feita para o intervalo $I_1 = [300, 330]$, mas todos as soluções encontradas são dominadas.

As soluções de compromisso representadas por (o e $\square$) nas Figuras 6.9 - 6.11, foram encontradas pela técnica de Programação por metas ponderadas, utilizando os pesos w_1 e w_2 , onde $w_1 + w_2 = 1$. A Tabela 6.8 apresenta a solução de compromisso encontrada para $w_1 = 0.70$ e $w_2 = 0.30$ em todos os casos, representada com o símbolo “ $\square$ ”, a qual está mais próxima da solução ideal, dando assim maior peso para a função $(C_T(P_w, P_t))$ referente à função custo total.

Os valores apresentados na Tabela 6.8 compara os resultados obtidos nos casos 1B e 1C com o caso 1A, mostrando que a inserção da energia eólica no sistema de energia reduz a emissão dos poluentes. Mesmo com uma redução de 12.11% para o caso 1B e 22.60% para o caso 1C, o que em Kg/h , são dados por 33.64 Kg/h e 62.79 Kg/h , respectivamente. E com relação aos custos, na resolução deste problema a redução foi de 85.40 $\$/h$ e 154.26 $\$/h$, respectivamente para os casos 1B e 1C.

Esses valores apresentados só podem ser comparados após a análise do tomador de

Tabela 6.8 - Valores do custo total e emissão pela programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_T(P_w, P_t)$	$C_e(P_t)$	redução da emissão	redução de custo
1A	921.38	0.00	921.38	277.87	-	-
1B	799.16	36.82	835.98	244.23	12.11%	9.27%
1C	693.39	73.73	767.12	215.08	22.60%	16.74%

decisão. A Tabela (6.9) apresenta o valor ultrapassado da meta para cada caso apresentado, pois apenas as variáveis de desvio superior tiveram valores maiores que zero nos casos 1A, 1B e 1C.

Tabela 6.9 - Valor das variáveis de desvio da Programação por metas ponderadas para o PDEATE - PPV

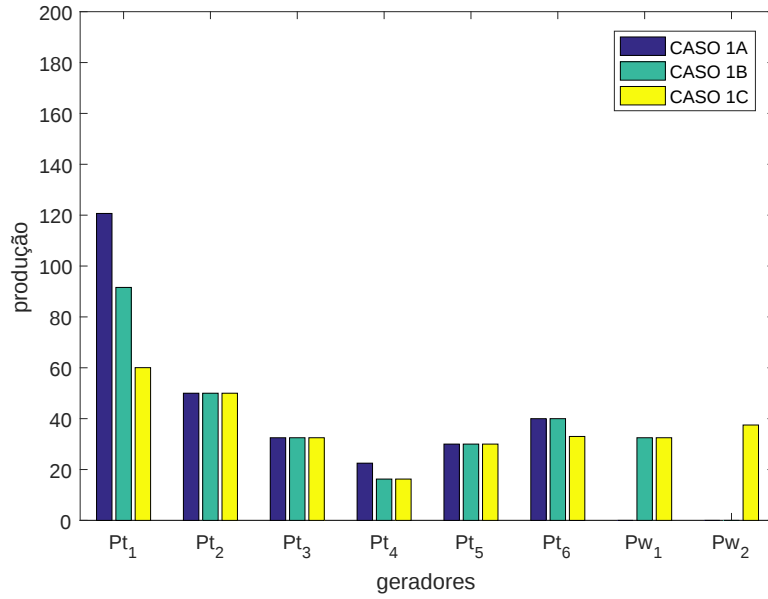
CASO	p_1	p_2
1A	85.329	42.183
1B	76.056	38.264
1C	68.261	31.529

Analisando cada caso, vistos na Tabela 6.9 tem-se que no caso 1A, a função custo total ($C_T(P_w, P_t) = 921.38 \text{ \$/h}$) ultrapassou 10.21% da meta estabelecida ($(C_T(P_w, P_t))^{min} = 836.05 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para a função emissão ($C_e(P_t) = 277.87 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 17.90% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 225.69 \text{ Kg/h}$). No caso 1B, a função custo total ($C_T(P_w, P_t) = 835.98 \text{ \$/h}$) ultrapassou 10.01% da meta estabelecida ($(C_T(P_w, P_t))^{min} = 759.93 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para a função emissão ($C_e(P_t) = 244.23 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 18.58% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 205.97 \text{ Kg/h}$). No caso 1C, a função custo total ($C_T(P_w, P_t) = 767.12 \text{ \$/h}$) ultrapassou 9.77% da meta estabelecida ($(C_T(P_w, P_t))^{min} = 698.86 \text{ \$/h}$) e o valor encontrado para a função emissão ($C_e(P_t) = 215.08 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 17.18% da meta estabelecida ($C_e(P_t)^{min} = 183.55 \text{ Kg/h}$).

A Figura (6.12) mostra a produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos para os casos simulados.

Com a inserção do gerador eólico no sistema de geração de energia, nota-se que todos

Figura 6.12: Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C



geradores termoelétricos P_{t_2} , P_{t_3} e P_{t_5} a produção de energia foi a mesma nos 03 casos. Os geradores P_{t_1} , P_{t_4} e P_{t_6} reduziram suas produções, e os geradores P_{w_1} e P_{w_2} produziram o máximo de potência dos seus geradores.

6.2 Resolução dos problemas com 2 objetivos e com a inserção das variáveis binárias

Para os PMDEATEb's formulado na Seção 4.3, foram investigados os seguintes casos:

1A: 6 geradores termoelétricos

1B: 6 geradores termoelétricos e 5 unidades eólicas.

Em todos os casos a demanda de produção de potência gerada é de $283.4MW$ e os dados dessas novas unidades eólicas estão na Tabela B.2, encontrada no Apêndice B.

6.2.1 Resultados para o PMDEATEb

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são apresentadas 10 soluções dos subproblemas mono-objetivo (4.11) obtidas utilizando a estratégia de MRCP e a técnica de programação por metas para os casos 1A e 1B.

Figura 6.13: Resultados do PMDEATEb para o caso 1A

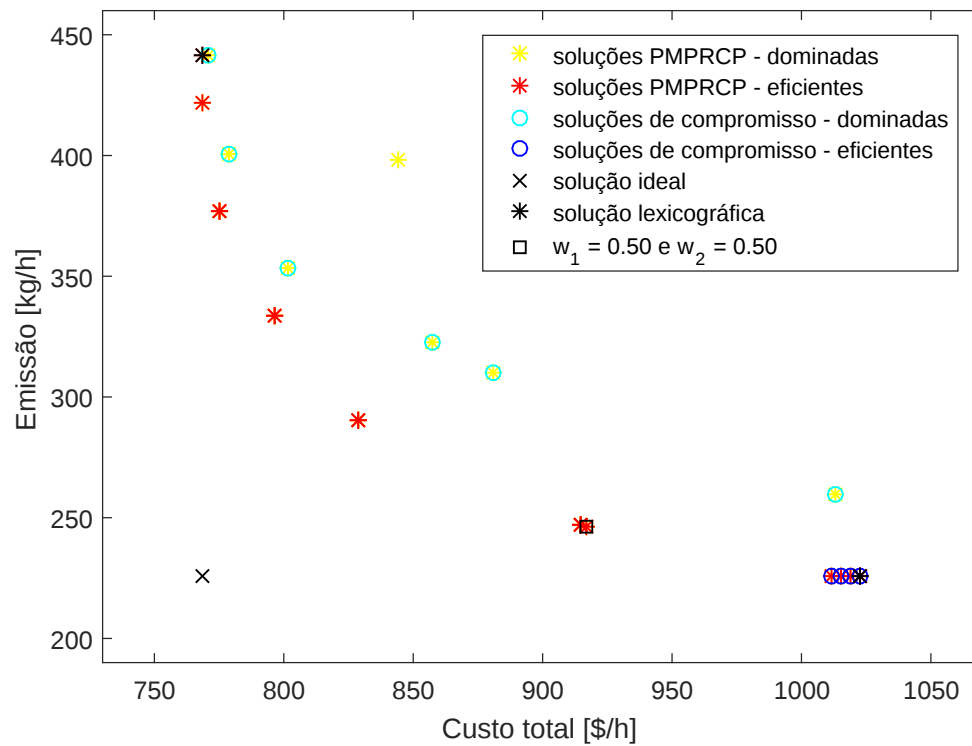
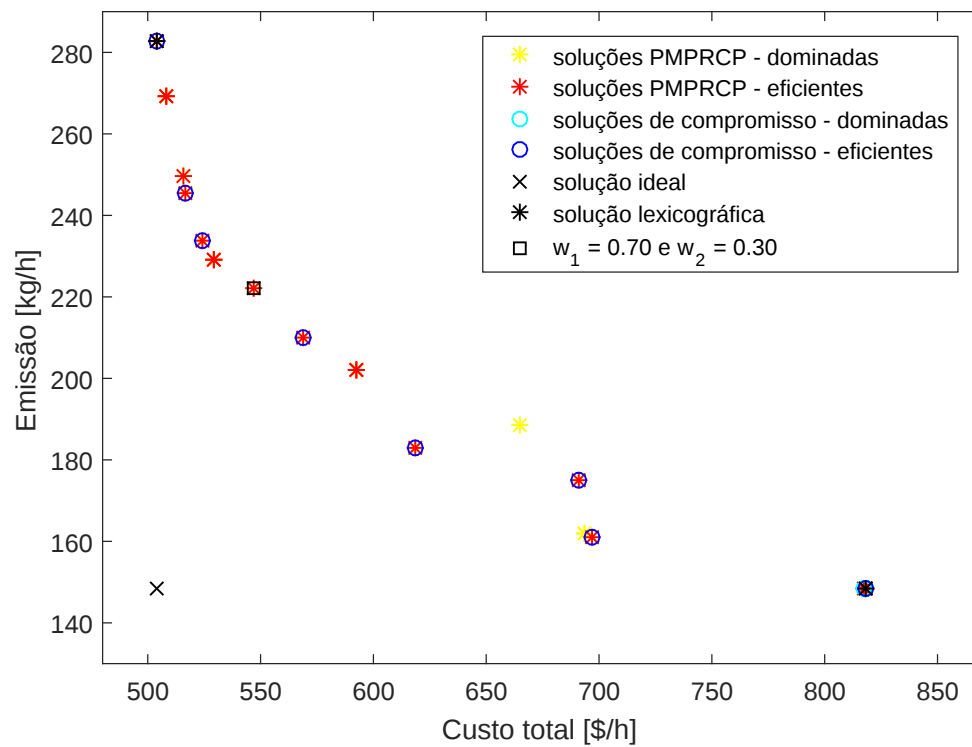


Figura 6.14: Resultados do PMDEATEb para o caso 1B



A Tabela 6.10 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A e 1B.

Tabela 6.10 - Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A e 1B

CASO	1A	1B
$(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{\min}, (C_e(P_t, y))^{\max}$	(770.75 , 441.88)	(503.60 , 282.78)
$(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{\max}, (C_e(P_t, y))^{\min}$	(1023.00 , 225.47)	(818.42 , 148.41)
$(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{\min}, (C_e(P_t, y))^{\min}$	(770.75 , 225.47)	(503.60 , 148.41)
$I = [(C_e(P_t, y))^{\min}, C_e(P_t, y)^{\max}]$	[225.47 , 441.88]	[148.41 , 282.78]

A Tabela 6.11 apresenta a solução de compromisso encontrada para $w_1 = 0.50$ e $w_2 = 0.50$ para o caso 1A, dando o mesmo peso para as funções $(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))$ e $C_e(P_t, y)$. Para o caso 1B, os pesos foram $w_1 = 0.70$ e $w_2 = 0.30$ dando assim maior peso para a função $(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))$ referente à função custo total.

Tabela 6.11 - Valores do custo total e emissão pela programação por metas para PMDEATEb

CASO	$C_c(P_t, y)$	$C_w(P_w, x)$	$C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x)$	$C_e(P_t, y)$	redução da emissão	redução do custo
1A	917.19	0.00	917.19	246.34	-	-
1B	394.94	152.43	547.37	222.04	9.86%	40.32%

Foram evitados de ser emitidos 24.30 Kg/h , o que de acordo com a Tabela 6.11, representa uma redução da emissão dado por 9.86%. Sendo assim mostrou-se que a inserção das unidades eólicas no sistema de energia tem uma influência significativa na redução da emissão dos gases poluentes. Nos custos operacionais também houve uma redução de 369.82 $\$/h$.

Na técnica de Programação por metas ponderadas, o tomador de decisão analisa e decide se a solução encontrada é ou não satisfatória para o problema proposto. A Tabela

(6.12) apresenta o valor das variáveis de desvio inferior e superior nos casos 1A e 1B.

Tabela 6.12 - Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para o PMDEATEb

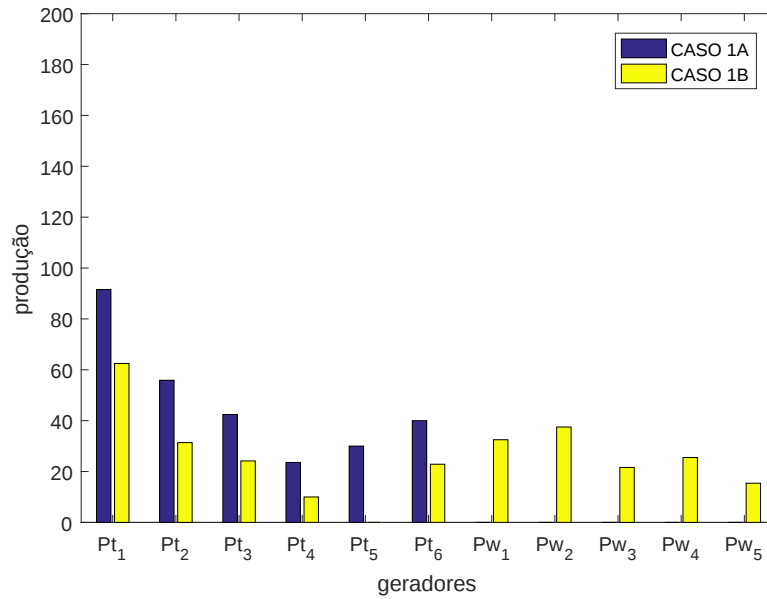
CASO	p_1	p_2
1A	148.720	20.870
1B	43.774	73.635

Para o caso 1A, as variáveis de desvio superior (p_1 e p_2), respectivamente referentes às funções $(C_c(P_t) + C_w(P_w))$ e $C_e(P_t)$, mostram que para a função $C_c(P_t) + C_w(P_w)$ o valor encontrado $(C_c(P_t) + C_w(P_w) = 917.19 \text{ \$/h})$ ultrapassou 19.35% da meta estabelecida $((C_c(P_t) + C_w(P_w))^{\min} = 770.75 \text{ \$/h})$. Para a função $C_e(P_t)$ o valor encontrado $(C_e(P_t) = 246.34 \text{ Kg/h})$ ultrapassou 9.26% da meta estabelecida $C_e(P_t)^{\min} = 225.47 \text{ Kg/h}$. No caso 1B, as variáveis de desvio superior para o valor encontrado $((C_c(P_t) + C_w(P_w) = 547.37 \text{ \$/h})$ ultrapassou 8.69% da meta estabelecida $((C_c(P_t) + C_w(P_w))^{\min} = 503.60 \text{ \$/h})$ e na função $C_e(P_t)$ o valor encontrado $(C_e(P_t) = 222.04 \text{ Kg/h})$ ultrapassou 49.62% da meta estabelecida $C_e(P_t)^{\min} = 222.04 \text{ Kg/h}$. Mesmo com o valor da função emissão $C_e(P_t)$ ultrapassando a meta estabelecida para o caso 1B, esta solução foi escolhida pois é a solução mais próxima da solução ideal e, em comparação com a solução encontrada para o caso 1A, os resultados são melhores do que a deste caso, conforme a Tabela 6.11.

A Figura (6.15) mostra a produção dos geradores termoeletricos e eólicos para os casos simulados.

Com relação aos geradores que foram utilizados nos casos simulados, podemos verificar que o gerador termoeletricos P_{t5} não foi utilizado no caso 1B e para os outros geradores termoeletricos houve uma redução na produção de energia termoeletrica a qual foi compensada com a inserção dos geradores eólicos para o caso. Com a opção de inserir 05 unidades eólicas, foram utilizadas todas as unidades que operaram com a sua respectiva produção máxima de geração de energia.

Figura 6.15: Produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos nos casos 1A e 1B



6.2.2 Resultados para o PMDEATEb - PV

Nas Figuras 6.16 e 6.17 são apresentadas 10 soluções dos subproblemas mono-objetivo (4.11) obtidas utilizando a estratégia de PMPRCP e a técnica de programação por metas para os casos 1A e 1B.

Figura 6.16: Resultados do PMDEATEb - PV para o caso 1A

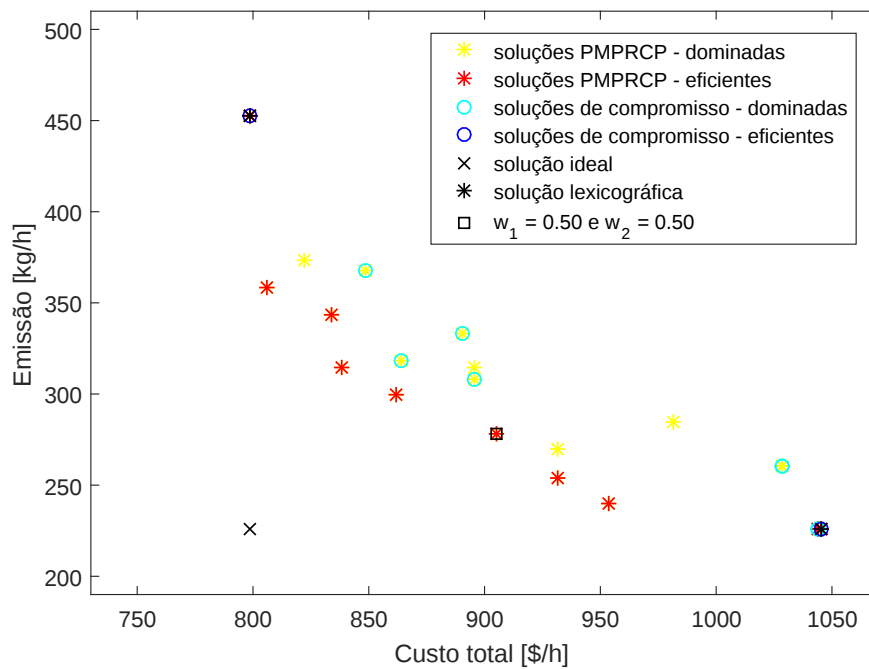
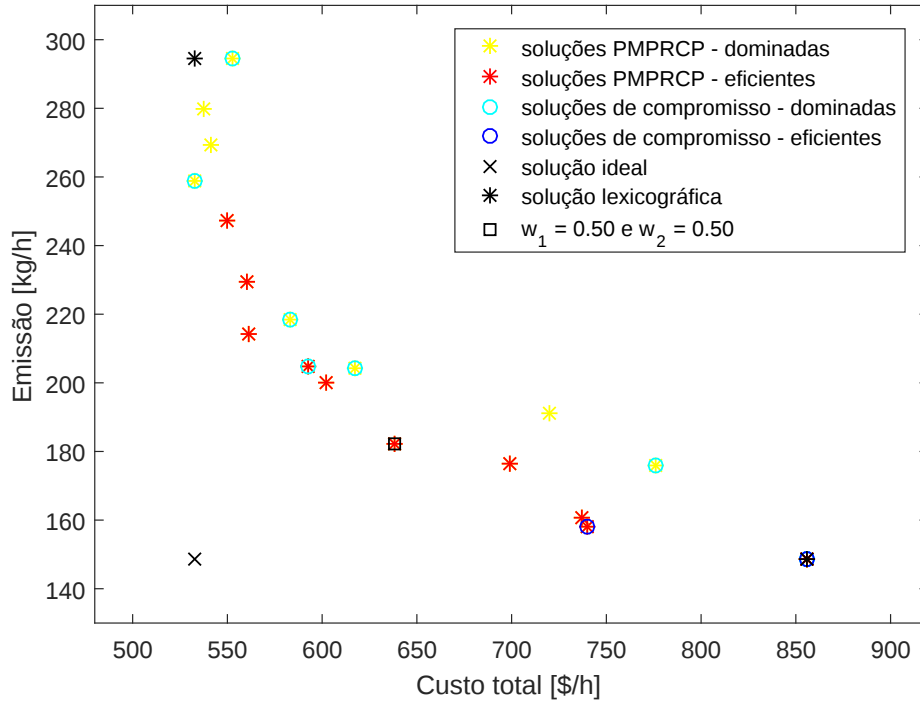


Figura 6.17: Resultados do PMDEATEb - PV para o caso 1B



A Tabela 6.13 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A e 1B.

Tabela 6.13 - Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A e 1B

CASO	1A	1B
$((C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{min}, C_e(P_t, y)^{max})$	(799.01 , 373.31)	(533.91 , 289.99)
$((C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{max}, C_e(P_t, y)^{min})$	(1045.20 , 225.47)	(855.41 , 148.41)
$((C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{min}, C_e(P_t, y)^{min})$	(799.01 , 225.47)	(533.91 , 148.41)
$I = [(C_e(P_t, y))^{min}, (C_e(P_t, y))^{max}]$	[225.47 , 373.31]	[148.41 , 289.99]

A Tabela 6.14 apresenta a solução de compromisso encontrada para $w_1 = 0.50$ e $w_2 = 0.50$ para os casos 1A e 1B, dando o mesmo peso para as funções $(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))$

e $C_e(P_t, y)$.

Tabela 6.14 - Valores do custo total e emissão pela programação por metas para o PMDEATEb - PV

CASO	$C_c(P_t, y)$	$C_w(P_w, x)$	$C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x)$	$C_e(P_t, y)$	redução da emissão	redução do custo
1A	904.93	0.00	904.93	277.71	-	-
1B	485.57	152.43	638.00	182.22	34.38%	29.50%

Foram evitados de ser emitidos 95.49 Kg/h , o que de acordo com a Tabela 6.14, representa uma redução da emissão dado po 34.58%. Sendo assim mostrou-se que a inserção das unidades eólicas no sistema de energia tem uma influência significativa na redução da emissão dos gases poluentes. Nos custos operacionais também houve uma redução de 266.93 $\$/h$.

Na técnica de Programação por metas ponderadas, o tomador de decisão analisa e decide se a solução encontrada é ou não satisfatória para o problema proposto. A Tabela (6.15) apresenta o valor das variáveis de desvio inferior e superior nos casos 1A e 1B.

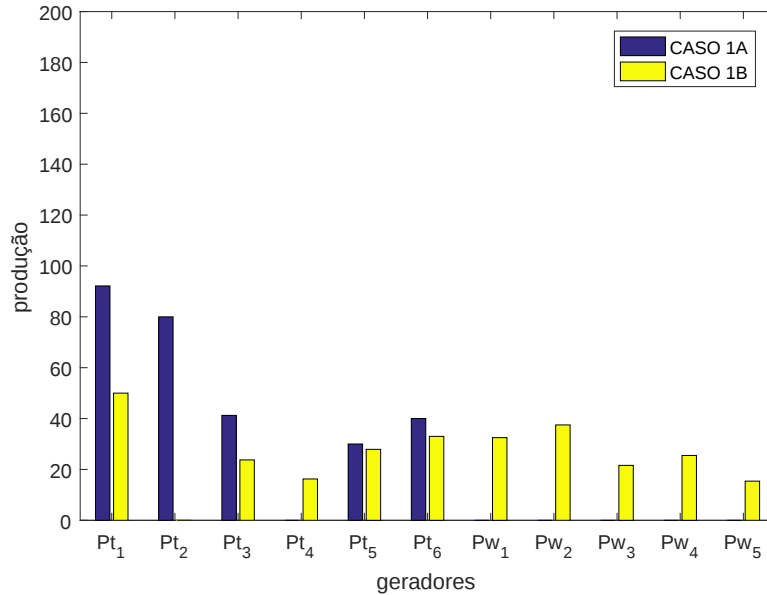
Tabela 6.15 - Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para o PMDEATEb - PV

CASO	p_1	p_2
1A	105.924	52.241
1B	104.092	33.807

Para o caso 1A, as variáveis de desvio superior (p_1 e p_2), respectivamente referentes às funções $C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x)$ e $C_e(P_t, y)$, mostram que para a função $C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x)$ o valor encontrado ($C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x) = 904.93 \$/h$) ultrapassou 13.26% da meta estabelecida ($(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{min} = 799.01 \$/h$). Para a função $C_e(P_t, y)$ o valor encontrado ($C_e(P_t, y) = 277.71 Kg/h$) ultrapassou 23.17% da meta estabelecida $C_e(P_t, y)^{min} = 225.47 Kg/h$. No caso 1B, as variáveis de desvio superior para o valor encontrado ($(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x) = 638.00 \$/h$) ultrapassou 19.50% da meta estabelecida ($(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{min} = 533.91 \$/h$ e na função $C_e(P_t, y)$ o valor encontrado ($C_e(P_t, y) = 182.22 Kg/h$) ultrapassou 22.78% da meta estabelecida $C_e(P_t, y)^{min} = 182.22 Kg/h$.

A Figura (6.18) mostra a produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.18: Produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos nos casos 1A e 1B



Com relação aos geradores que foram utilizados nos casos simulados, podemos verificar que o gerador termoeletrônico P_{t_2} não foi utilizado no caso 1B e o gerador P_{t_4} não foi utilizado no caso 1A. Para os outros geradores houve uma redução na produção de energia termoeletrônica das unidades eólicas neste caso. Com a opção de inserir 05 unidades eólicas, foram utilizadas todas as unidades que operaram com a sua produção máxima de geração de energia, pois estas tem custo menor.

6.2.3 Resultados para o PMDEATEb - PPV

Nas Figuras 6.19 e 6.20 são apresentadas 10 soluções dos subproblemas mono-objetivo (4.11) obtidas utilizando a estratégia de PMPRCP e a técnica de programação por metas para os casos 1A e 1B, para o caso formulado em (4.11).

Figura 6.19: Resultados do PMDEATEb - PPV para o caso 1A

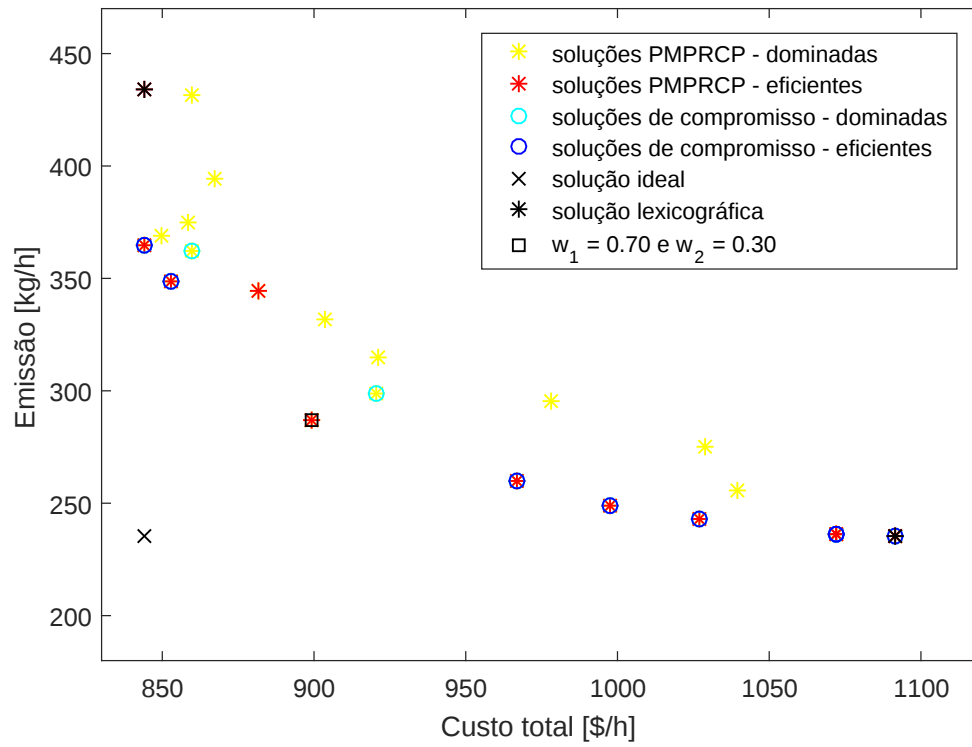
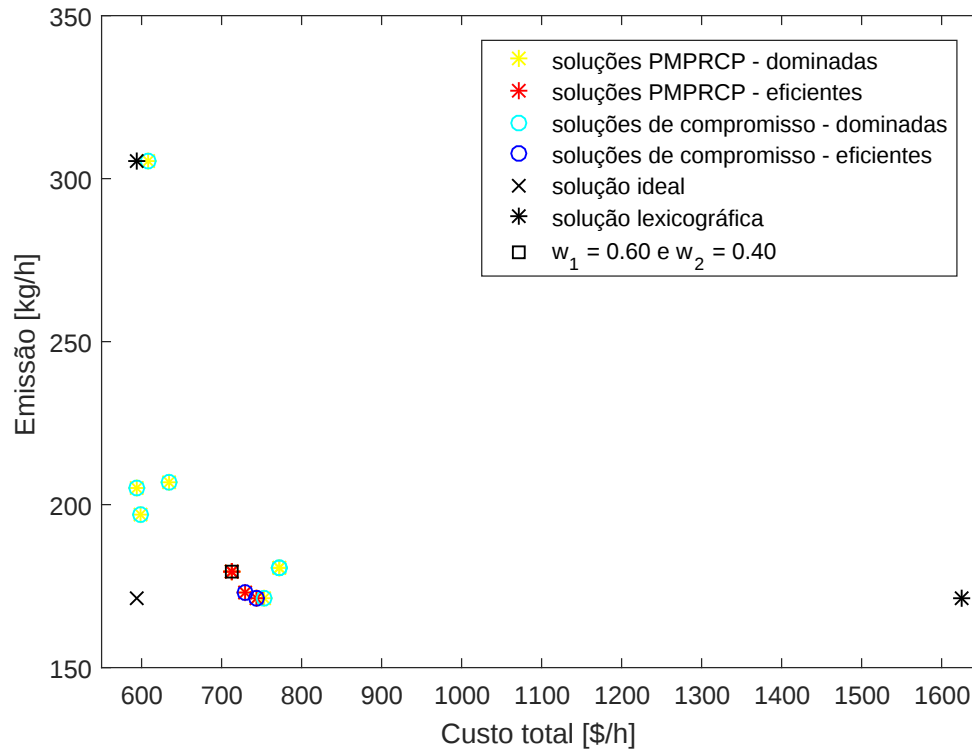


Figura 6.20: Resultados do PMDEATEb - PPV para o caso 1B



A Tabela 6.16 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A e 1B.

Tabela 6.16 - Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo I para os casos 1A e 1B

CASO	1A	1B
$((C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{min}, (C_e(P_t, y))^{max})$	(847.15 , 434.29)	(594.90 , 253.43)
$((C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{max}, (C_e(P_t, y))^{min})$	(1091.38 , 235.69)	(1625.88 , 171.07)
$((C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{min}, (C_e(P_t, y))^{min})$	(847.15 , 235.69)	(594.90 , 171.07)
$I = [(C_e(P_t, y))^{min}, (C_e(P_t, y))^{max}]$	[235.69 , 434.29]	[171.07 , 253.43]

A Tabela 6.17 apresenta a solução de compromisso encontrada para $w_1 = 0.50$ e $w_2 = 0.50$ para os casos 1A e 1B, dando o mesmo peso para as funções $(C_c(P_t) + C_w(P_w))$ e $C_e(P_t)$.

Tabela 6.17 - Valores do custo total e emissão pela programação por metas para PMDEATEb - PPV

CASO	$C_c(P_t, y)$	$C_w(P_w, x)$	$(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))$	$C_e(P_t, y)$	redução da emissão	redução do custo
1A	899.04	0.00	899.04	287.28	-	-
1B	560.45	152.43	712.88	179.19	37.63%	20.71%

Foram evitados de ser emitidos 108.09 Kg/h , o que de acordo com a Tabela 6.17, representa uma redução da emissão dado po 37.63%. Sendo assim mostrou-se que a inserção das unidades eólicas no sistema de energia tem uma influência significativa na redução da emissão dos gases poluentes. Nos custos operacionais também houve uma redução de 186.16 $\$/h$.

Na técnica de Programação por metas ponderadas, o tomador de decisão analisa e decide se a solução encontrada é ou não satisfatória para o problema proposto. A Tabela (6.18) apresenta o valor das variáveis de desvio inferior e superior nos casos 1A e 1B.

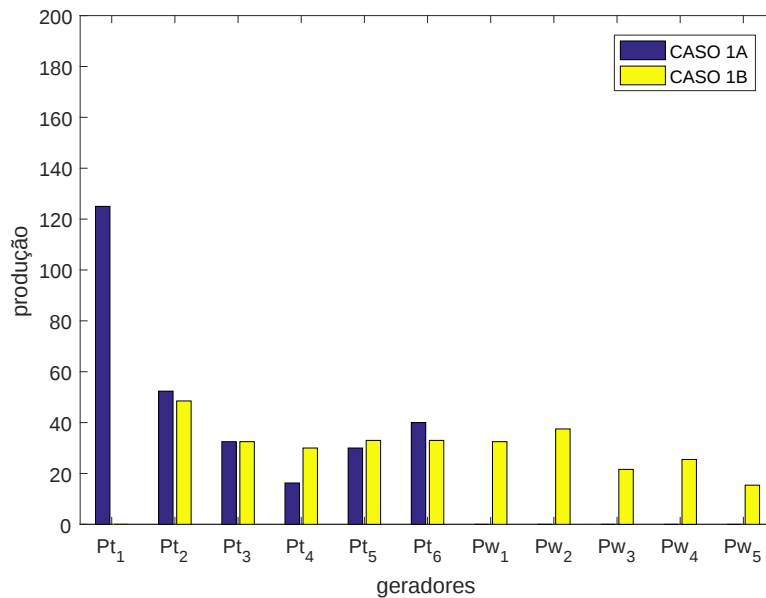
Tabela 6.18 - Variáveis de desvio da programação por metas ponderadas para o PMDEATEb -PPV

CASO	p_1	p_2
1A	100.684	61.814
1B	117.986	8.118

Para o caso 1A, as variáveis de desvio superior (p_1 e p_2), respectivamente referentes às funções $C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x)$ e $C_e(P_t, y)$, mostram que para a função $C_c(P_t) + C_w(P_w)$ o valor encontrado ($C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x) = 899.04 \text{ \$/h}$) ultrapassou 12.61% da meta estabelecida ($(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{\min} = 798.36 \text{ \$/h}$). Para a função $C_e(P_t, y)$ o valor encontrado ($C_e(P_t, y) = 287.28 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 27.42% da meta estabelecida $C_e(P_t, y)^{\min} = 225.47 \text{ Kg/h}$. No caso 1B, as variáveis de desvio superior para o valor encontrado ($C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x) = 712.88 \text{ \$/h}$) ultrapassou 19.83% da meta estabelecida ($(C_c(P_t, y) + C_w(P_w, x))^{\min} = 594.90 \text{ \$/h}$) e na função $C_e(P_t, y)$ o valor encontrado ($C_e(P_t, y) = 179.19 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 4.75% da meta estabelecida $C_e(P_t, y)^{\min} = 171.07 \text{ Kg/h}$.

A Figura (6.21) mostra a produção dos geradores termoeletricos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.21: Produção dos geradores termoeletricos e eólicos nos casos 1A e 1B



Com relação aos geradores que foram utilizados nos casos simulados, podemos verificar que o gerador termoeletrico P_{t_1} não foi utilizado no caso 1B, e para os geradores P_{t_2} e P_{t_6} houve uma redução na produção de energia termoeletrica neste. Os geradores P_{t_4} e P_{t_5} tiveram um aumento na produção no caso 1B em relação ao caso 1A e o gerador P_{t_3} manteve a produção nos dois casos. Com a opção de inserir 05 unidades eólicas, foram utilizadas todas as unidades inseridas com a sua produção máxima de geração de energia.

6.3 Resolução dos problemas com 3 objetivos

Para PMDEATE₃ formulado na Seção 4.4, foram resolvidos os mesmos casos que aparecem na Seção 6.1, através da técnica de programação por metas ponderadas, com a variação dos pesos w_1 , w_2 e w_3 . Para o caso 1A, foram encontradas 9 soluções e no caso 1B e 1C foram encontradas 12 soluções, de acordo com a variação dos pesos. O PMDEATE₃ não pode ser resolvido pelo MRCP e PMPRCP pois estas técnicas não se adaptaram bem aos modelos com 3 objetivos devido à delimitação do espaço de soluções canalizadas para 2 objetivos.

6.3.1 Resultados para o PMDEATE₃

A Tabela 6.19 apresenta as soluções de mínimo para as funções custo e emissão dos casos 1A, 1B e 1C.

Tabela 6.19 - Soluções de mínimo das funções para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	1A	1B	1C
$(C_c(P_t))^{min}$	775.11	668.02	552.19
$(C_w(P_w))^{min}$	0.00	30.33	199.89
$(C_e(P_t))^{min}$	225.47	199.59	183.26

As tabelas 6.20, 6.21 e 6.22 mostram as soluções encontradas através da técnica de programação por metas ponderadas para os casos 1A, 1B e 1C, respectivamente.

Tabela 6.20 - PMDEATE₃ para o caso 1A

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.0	0.5	853.39	0.00	295.60	78.28	0.00	70.13
2	0.2	0.0	0.8	1013.74	0.00	226.14	238.63	0.00	0.67
3	0.8	0.0	0.2	835.39	0.00	295.60	78.28	0.00	70.13
4	0.3	0.0	0.7	1005.32	0.00	227.69	230.21	0.00	2.22
5	0.7	0.0	0.3	853.39	0.00	295.60	78.28	0.00	70.13
6	0.6	0.0	0.4	853.39	0.00	295.60	78.28	0.00	70.13
7	0.4	0.0	0.6	853.39	0.00	295.60	78.28	0.00	70.13
8	0.1	0.0	0.9	1017.84	0.00	225.97	225.97	0.00	0.50
9	0.9	0.0	0.1	814.82	0.00	316.96	39.71	0.00	91.49

Tabela 6.21 - PMDEATE₃ para o caso 1B

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.3	0.2	723.52	36.82	258.63	55.50	6.49	59.04
2	0.5	0.2	0.3	755.18	36.82	239.27	81.16	6.49	39.68
3	0.3	0.5	0.2	762.10	36.82	236.00	94.08	6.49	36.41
4	0.2	0.5	0.3	846.96	36.82	211.17	178.94	6.49	11.58
5	0.3	0.2	0.5	862.54	36.82	208.23	194.52	6.49	8.61
6	0.2	0.3	0.5	917.81	36.82	199.84	249.79	6.49	0.25
7	0.7	0.2	0.1	679.23	36.82	311.70	11.21	6.49	112.11
8	0.7	0.1	0.2	704.38	36.82	275.69	36.36	6.49	76.10
9	0.2	0.7	0.1	740.41	36.82	247.39	72.39	6.49	47.80
10	0.1	0.7	0.2	891.96	36.82	203.42	223.94	6.49	3.83
11	0.2	0.1	0.7	918.98	36.82	199.72	250.96	6.49	0.13
12	0.1	0.2	0.7	920.84	36.82	199.60	252.82	6.49	0.01

Para o caso 1A, a solução escolhida foi a solução 4, onde $w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.0$ e $w_3 = 0.7$, dando maior peso para a função $C_e(P_t)$, onde o valor encontrado ($C_e(P_t) = 227.69 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 0.98% da meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{\min} = 225.47 \text{ Kg/h}$) e para a função $C_c(P_t)$, o valor encontrado ($C_c(P_t) = 1005.32 \text{ \$/h}$) ultrapassou 29.70% da meta estabelecida ($(C_c(P_t))^{\min} = 775.11 \text{ \$/h}$). No caso 1B, a solução escolhida foi a solução 4, onde $w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.5$ e $w_3 = 0.3$, dando maior peso para a função $C_w(P_w)$, onde o valor encontrado

Tabela 6.22 - PMDEATE₃ para o caso 1C

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.3	0.2	591.94	199.89	240.20	39.75	0.00	56.94
2	0.5	0.2	0.3	619.25	199.89	221.62	67.06	0.00	38.36
3	0.3	0.5	0.2	627.85	199.89	217.11	75.66	0.00	33.85
4	0.2	0.5	0.3	698.55	199.89	193.00	146.36	0.00	9.74
5	0.3	0.2	0.5	705.80	199.89	191.48	153.61	0.00	8.22
6	0.2	0.3	0.5	739.24	199.89	186.06	187.05	0.00	2.80
7	0.7	0.2	0.1	556.29	199.89	286.43	4.10	0.00	103.17
8	0.7	0.1	0.2	575.00	199.89	256.74	22.81	0.00	73.48
9	0.2	0.7	0.1	606.99	199.89	229.06	54.80	0.00	45.80
10	0.1	0.7	0.2	719.75	199.89	188.95	167.56	0.00	5.69
11	0.2	0.1	0.7	757.88	199.89	193.81	205.69	0.00	0.55
12	0.1	0.2	0.7	762.64	199.89	183.49	210.45	0.00	0.23

($C_w(P_w) = 36.82$ \$) ultrapassou 6.46% da meta estabelecida ($(C_w(P_w))^{min} = 30.33$ \$/h), para a função $C_c(P_t)$ o valor encontrado ($C_c(P_t) = 846.96$ \$/h) ultrapassou 26.79% da meta estabelecida ($(C_c(P_t))^{min} = 668.02$ \$/h) e para a função $C_e(P_t)$ o valor encontrado ($C_e(P_t) = 211.17$ \$) ultrapassou 5.80% da meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 199.59$ \$/h). E no caso 1C, a solução escolhida também foi a solução 4, onde $w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.5$ e $w_3 = 0.3$, dando maior peso para a função $C_w(P_w)$, o valor encontrado ($C_w(P_w) = 199.89$ \$) mantendo a meta estabelecida ($(C_w(P_w))^{min} = 199.89$ \$/h), para a função onde o valor encontrado ($C_c(P_t) = 698.55$ \$/h) ultrapassou 26.51% da meta estabelecida ($(C_c(P_t))^{min} = 552.19$ \$/h) e para a função $C_e(P_t)$ o valor encontrado ($C_e(P_t) = 193.00$ Kg/h) ultrapassou 5.31% da meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 183.26$ Kg/h).

A Tabela 6.23 apresenta a solução de compromisso escolhida para os casos 1A, 1B e 1C e a comparação desses casos.

Os valores apresentados na Tabela 6.23 compara os resultados obtidos nos casos 1B e 1C com o caso 1A, mostrando que a inserção da energia eólica no sistema de energia reduz a emissão dos poluentes. Mesmo com uma redução de 7.26% para o caso 1B e 12.09% para o caso 1C, o que em Kg/h, são dados por 16.52 Kg/h e 34.69 Kg/h, respectivamente. E com relação aos custos, na resolução deste problema a redução foi de 121.54 \$/h e 106.88

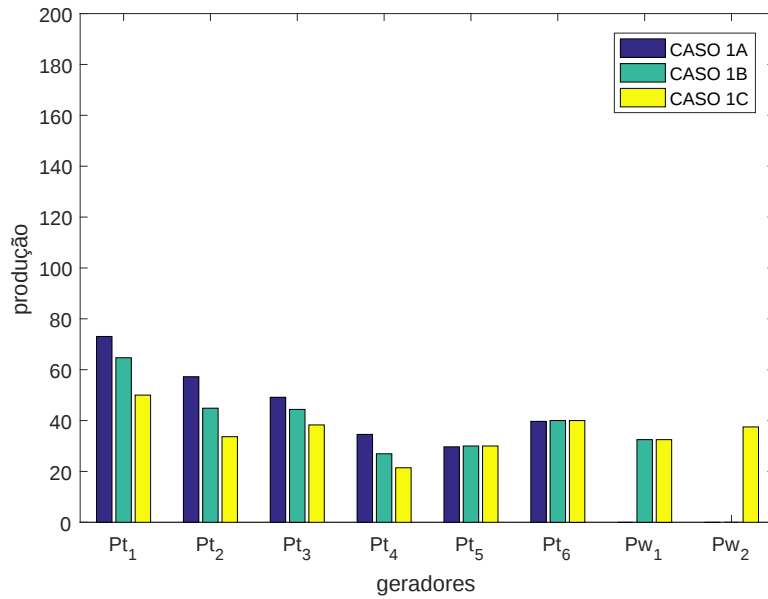
Tabela 6.23 - Valores do custo e emissão pela programação por metas para PMDEATE₃

CASO	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	redução da emissão	redução do custo
1A	1005.32	0.00	227.69	-	-
1B	846.96	36.82	211.17	7.26%	12.09%
1C	698.55	199.89	193.00	15.24%	10.63%

\$/h, respectivamente para os casos 1B e 1C.

A Figura (6.22) mostra a produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.22: Produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C



Com a inserção do gerador eólico no sistema de geração de energia, nota-se que para os geradores termoeletrônicos P_{t_5} e P_{t_6} a produção de energia foi a mesma nos 03 casos, mas nos geradores P_{t_1} ao P_{t_4} houve redução em suas produções. Os geradores eólicos P_{w_1} e P_{w_2} produziram o máximo de potência dos seus geradores nos casos em que foram inseridos.

6.3.2 Resultados para o PMDEATE₃ - PV

A Tabela 6.24 apresenta as soluções de mínimo para as funções custo e emissão dos casos 1A, 1B e 1C.

Tabela 6.24 - Soluções de mínimo das funções para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	1A	1B	1C
$(C_c(P_t))^{min}$	838.01	806.58	600.57
$(C_w(P_w))^{min}$	0.00	30.33	199.89
$(C_e(P_t))^{min}$	225.47	199.59	183.26

As tabelas 6.25, 6.26 e 6.27 mostram as soluções encontradas através da técnica de programação por metas ponderadas para os casos 1A, 1B e 1C, respectivamente.

Tabela 6.25 - PMDEATE₃- PV para o caso 1A

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.0	0.5	948.62	0.00	241.03	110.63	0.00	15.56
2	0.2	0.0	0.8	1044.14	0.00	225.50	206.73	0.00	0.03
3	0.8	0.0	0.2	839.23	0.00	289.38	2.05	0.00	63.91
4	0.3	0.0	0.7	974.65	0.00	245.17	208.17	0.00	19.70
5	0.7	0.0	0.3	869.43	0.00	310.42	31.42	0.00	84.95
6	0.6	0.0	0.4	861.22	0.00	313.74	81.45	0.00	88.27
7	0.4	0.0	0.6	982.57	0.00	240.91	166.02	0.00	15.44
8	0.1	0.0	0.9	1044.08	0.00	225.48	206.07	0.00	0.01
9	0.9	0.0	0.1	847.22	0.00	293.83	41.60	0.00	68.36

Tabela 6.26 - PMDEATE₃ - PV para o caso 1B

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.3	0.2	806.58	30.33	229.55	0.00	0.00	29.96
2	0.5	0.2	0.3	806.58	30.33	225.89	0.00	0.00	26.30
3	0.3	0.5	0.2	806.58	30.33	236.17	0.00	0.00	26.58
4	0.2	0.5	0.3	817.30	30.33	221.89	10.72	0.00	22.30
5	0.3	0.2	0.5	817.29	30.33	221.89	10.71	0.00	22.30
6	0.2	0.3	0.5	907.16	30.33	202.97	100.58	0.00	3.38
7	0.7	0.2	0.1	806.57	30.33	226.78	0.00	0.00	27.19
8	0.7	0.1	0.2	806.57	30.33	226.17	0.00	0.00	26.58
9	0.2	0.7	0.1	806.58	30.33	205.89	0.00	0.00	26.30
10	0.1	0.7	0.2	890.82	30.33	204.89	84.24	0.00	5.30
11	0.2	0.1	0.7	929.18	30.33	199.59	122.60	0.00	0.00
12	0.1	0.2	0.7	929.18	30.33	199.59	122.60	0.00	0.00

Tabela 6.27 - PMDEATE₃ - PV para o caso 1C

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.3	0.2	649.95	199.89	222.34	49.38	0.00	39.08
2	0.5	0.2	0.3	646.07	199.89	219.97	45.50	0.00	36.71
3	0.3	0.5	0.2	635.64	199.89	229.71	35.07	0.00	46.45
4	0.2	0.5	0.3	704.68	199.89	193.65	104.11	0.00	10.39
5	0.3	0.2	0.5	690.81	199.89	195.98	90.24	0.00	12.72
6	0.2	0.3	0.5	721.55	199.89	190.35	120.98	0.00	7.09
7	0.7	0.2	0.1	661.27	199.89	209.93	60.70	0.00	26.67
8	0.7	0.1	0.2	630.40	199.89	228.58	29.83	0.00	45.32
9	0.2	0.7	0.1	646.22	199.89	224.50	45.65	0.00	41.24
10	0.1	0.7	0.2	749.24	199.89	185.69	148.67	0.00	2.43
11	0.2	0.1	0.7	721.55	199.89	190.35	120.98	0.00	7.09
12	0.1	0.2	0.7	770.84	199.89	183.52	170.27	0.00	0.26

Para o caso 1A, a solução escolhida foi a solução 8, onde $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.0$ e $w_3 = 0.9$, dando maior peso para a função $C_e(P_t)$, onde o valor encontrado ($C_e(P_t) = 225.48$ Kg/h) manteve a meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 225.48$ Kg/h) e para a função $C_c(P_t)$,

o valor encontrado ($C_c(P_t) = 1044.08 \text{ \$/h}$) ultrapassou 24.59% da meta estabelecida ($((C_c(P_t))^{min} = 838.01 \text{ \$/h})$. No caso 1B, a solução escolhida foi a solução 11, onde $w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.1$ e $w_3 = 0.7$, dando maior peso para a função $C_e(P_t)$, o valor encontrado ($C_e(P_t) = 199.59 \text{ \$}$) mantendo a meta estabelecida ($((C_e(P_t))^{min} = 199.59 \text{ \$/h})$, para a função $C_w(P_w)$ o valor encontrado ($C_w(P_w) = 30.33 \text{ \$}$) manteve a meta estabelecida ($((C_w(P_w))^{min} = 30.33 \text{ \$/h})$ e para a função $C_c(P_t)$ o valor encontrado ($C_c(P_t) = 929.18 \text{ \$/h}$) ultrapassou 15.20% da meta estabelecida ($((C_c(P_t))^{min} = 806.58 \text{ \$/h})$. E no caso 1C, a solução escolhida também foi a solução 10, onde $w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.7$ e $w_3 = 0.2$, dando maior peso para a função $C_w(P_w)$, o valor encontrado ($C_w(P_w) = 199.89 \text{ \$}$) manteve a meta estabelecida ($(C_w(P_w))^{min} = 199.89 \text{ \$/h}$, para a função onde o valor encontrado ($C_c(P_t) = 749.24 \text{ \$/h}$) ultrapassou 24.75% da meta estabelecida ($((C_c(P_t))^{min} = 600.57 \text{ \$/h})$ e para a função $C_e(P_t)$ o valor encontrado ($C_e(P_t) = 185.69 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 1.31% da meta estabelecida ($((C_e(P_t))^{min} = 183.26 \text{ Kg/h})$.

A Tabela 6.28 apresenta a solução de compromisso escolhida para os casos 1A, 1B e 1C e a comparação desses casos.

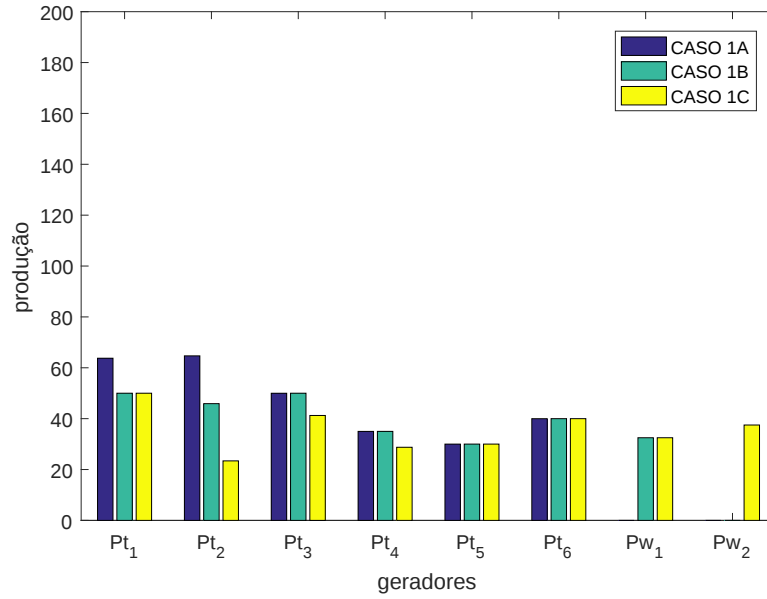
Tabela 6.28 - Valores do custo e emissão pela programação por metas para PMDEATE₃ - PV

CASO	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	redução da emissão	redução do custo
1A	1044.08	0.00	225.48	-	-
1B	929.18	30.33	199.59	11.48%	8.10%
1C	749.24	199.89	185.69	17.65%	9.09%

Os valores apresentados na Tabela 6.28 compara os resultados obtidos nos casos 1B e 1C com o caso 1A, mostrando que a inserção da energia eólica no sistema de energia reduz a emissão dos poluentes. Mesmo com uma redução de 11.48% para o caso 1B e 17.65% para o caso 1C, o que em Kg/h , são dados por 25.89 Kg/h e 39.79 Kg/h , respectivamente. E com relação aos custos, na resolução deste problema a redução foi de 84.57 $\text{\$/h}$ e 94.95 $\text{\$/h}$, respectivamente para os casos 1B e 1C.

A Figura (6.23) mostra a produção dos geradores termoeletrônicos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.23: Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C



Com a inserção do gerador eólico no sistema de geração de energia, nota-se que para os geradores termoelétricos P_{t_5} e P_{t_6} a produção de energia foi a mesma nos 03 casos. No gerador P_{t_2} houve redução na produção do caso 1A para os casos 1B e 1C e nos geradores P_{t_3} e P_{t_4} houve redução apenas para os casos 1B para o caso 1C. No gerador P_{t_1} , nos casos 1B e 1C, houve a mesma produção de energia. Os geradores eólicos P_{w_1} e P_{w_2} produziram o máximo de potência dos seus geradores nos casos em que foram inseridos.

6.3.3 Resultados para o $PMDEATE_3$ - PPV

A Tabela 6.29 apresenta as soluções de mínimo para as funções custo e emissão dos casos 1A, 1B e 1C.

Tabela 6.29 - Soluções de mínimo das funções para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	1A	1B	1C
$(C_c(P_t))^{min}$	897.14	794.31	639.39
$(C_w(P_w))^{min}$	0.00	30.33	199.89
$(C_e(P_t))^{min}$	235.69	205.97	183.55

As tabelas 6.30, 6.31 e 6.32 mostram as soluções encontradas através da técnica de programação por metas ponderadas para os casos 1A, 1B e 1C, respectivamente.

Tabela 6.30 - PMDEATE₃ - PPV para o caso 1A

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.0	0.5	927.33	0.00	276.45	30.19	0.00	40.76
2	0.2	0.0	0.8	1072.32	0.00	235.89	175.18	0.00	0.20
3	0.8	0.0	0.2	907.83	0.00	314.85	10.69	0.00	79.16
4	0.3	0.0	0.7	1027.30	0.00	243.05	130.16	0.00	7.36
5	0.7	0.0	0.3	901.22	0.00	321.78	4.08	0.00	86.09
6	0.6	0.0	0.4	927.33	0.00	276.45	30.19	0.00	40.76
7	0.4	0.0	0.6	997.70	0.00	248.72	100.56	0.00	13.03
8	0.1	0.0	0.9	1072.32	0.00	235.89	175.18	0.00	0.20
9	0.9	0.0	0.1	910.07	0.00	366.00	12.93	0.00	130.31

Tabela 6.31 - PMDEATE₃ - PPV para o caso 1B

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.3	0.2	862.00	30.33	243.38	67.69	0.00	37.41
2	0.5	0.2	0.3	862.00	30.33	243.38	67.69	0.00	37.41
3	0.3	0.5	0.2	862.00	30.33	243.38	67.69	0.00	37.41
4	0.2	0.5	0.3	925.79	30.33	211.96	131.48	0.00	5.99
5	0.3	0.2	0.5	925.79	30.33	211.96	131.48	0.00	5.99
6	0.2	0.3	0.5	954.09	30.33	206.01	159.78	0.00	0.04
7	0.7	0.2	0.1	794.31	30.33	289.60	0.00	0.00	83.63
8	0.7	0.1	0.2	864.53	30.33	251.05	70.22	0.00	45.08
9	0.2	0.7	0.1	862.00	30.33	243.38	67.69	0.00	37.41
10	0.1	0.7	0.2	925.79	30.33	211.96	131.48	0.00	5.99
11	0.2	0.1	0.7	954.09	30.33	206.01	159.78	0.00	0.04
12	0.1	0.2	0.7	954.09	30.33	206.01	159.78	0.00	0.04

Tabela 6.32 - PMDEATE₃ - PPV para o caso 1C

solução	w_1	w_2	w_3	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	p_1	p_2	p_3
1	0.5	0.3	0.2	699.66	199.89	236.89	60.27	0.00	53.34
2	0.5	0.2	0.3	680.45	199.89	230.01	41.06	0.00	46.46
3	0.3	0.5	0.2	762.86	199.89	193.18	123.47	0.00	9.63
4	0.2	0.5	0.3	771.31	199.89	190.18	131.92	0.00	6.63
5	0.3	0.2	0.5	771.31	199.89	190.18	131.92	0.00	6.63
6	0.2	0.3	0.5	771.31	199.89	190.18	131.92	0.00	6.63
7	0.7	0.2	0.1	704.75	199.89	240.67	65.36	0.00	57.12
8	0.7	0.1	0.2	704.75	199.89	240.67	65.36	0.00	57.12
9	0.2	0.7	0.1	699.66	199.89	236.89	60.27	0.00	53.34
10	0.1	0.7	0.2	771.31	199.89	190.18	131.92	0.00	6.63
11	0.2	0.1	0.7	771.31	199.89	190.18	131.92	0.00	6.63
12	0.1	0.2	0.7	829.54	199.89	183.55	190.15	0.00	0.00

Para o caso 1A, a solução escolhida foi a solução 8, onde $w_1 = 0.1$, $w_2 = 0.0$ e $w_3 = 0.9$, dando maior peso para a função $C_e(P_t)$, onde o valor encontrado ($C_e(P_t) = 235.89 \text{ Kg/h}$) praticamente mantendo a meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 235.69 \text{ Kg/h}$) e para a função $C_c(P_t)$, o valor encontrado ($C_c(P_t) = 1072.32 \text{ \$/h}$) ultrapassou 19.53% da meta estabelecida ($(C_c(P_t))^{min} = 897.14 \text{ \$/h}$). No caso 1B, a solução escolhida foi a solução 6, onde $w_1 = 0.2$, $w_2 = 0.3$ e $w_3 = 0.5$, dando maior peso para a função $C_e(P_t)$, o valor encontrado ($C_e(P_t) = 206.01 \text{ \$}$) praticamente mantendo a meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 205.97 \text{ \$/h}$), para a função $C_w(P_w)$ o valor encontrado ($C_w(P_w) = 30.33 \text{ \$}$) manteve a meta estabelecida ($(C_w(P_w))^{min} = 30.33 \text{ \$/h}$) e para a função $C_c(P_t)$ o valor encontrado ($C_c(P_t) = 954.09 \text{ \$/h}$) ultrapassou 20.12% da meta estabelecida ($(C_c(P_t))^{min} = 794.31 \text{ \$/h}$). E no caso 1C, a solução escolhida também foi a solução 3, onde $w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.5$ e $w_3 = 0.2$, dando maior peso para a função $C_w(P_w)$, o valor encontrado ($C_w(P_w) = 199.89 \text{ \$}$) manteve a meta estabelecida ($(C_w(P_w))^{min} = 199.89 \text{ \$/h}$), para a função onde o valor encontrado ($C_c(P_t) = 762.86 \text{ \$/h}$) ultrapassou 19.31% da meta estabelecida ($(C_c(P_t))^{min} = 639.39 \text{ \$/h}$) e para a função $C_e(P_t)$ o valor encontrado ($C_e(P_t) = 193.18 \text{ Kg/h}$) ultrapassou 5.25% da meta estabelecida ($(C_e(P_t))^{min} = 183.55 \text{ Kg/h}$).

A Tabela 6.33 apresenta a solução de compromisso escolhida para os casos 1A, 1B e 1C e a comparação desses casos.

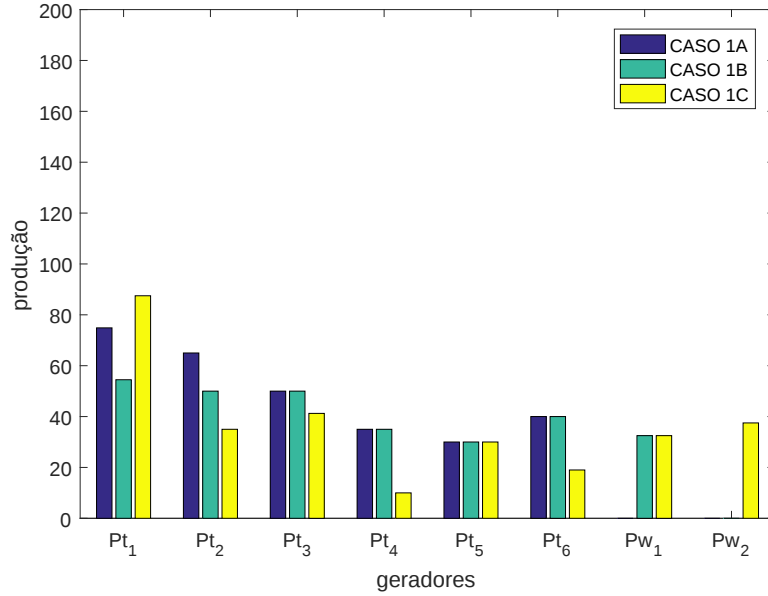
Tabela 6.33 - Valores do custo e emissão encontrados pela programação por metas para os casos 1A, 1B e 1C

CASO	$C_c(P_t)$	$C_w(P_w)$	$C_e(P_t)$	redução da emissão	redução do custo
1A	1072.32	0.00	235.89	-	-
1B	954.09	30.33	206.01	12.67%	8.20%
1C	762.86	199.89	193.18	18.11%	10.22%

Os valores apresentados na Tabela 6.33 compara os resultados obtidos nos casos 1B e 1C com o caso 1A, mostrando que a inserção da energia eólica no sistema de energia reduz a emissão dos poluentes. Mesmo com uma redução de 12.67% para o caso 1B e 18.11% para o caso 1C, o que em Kg/h , são dados por 29.68 Kg/h e 42.71 Kg/h , respectivamente. E com relação aos custos, na resolução deste problema a redução foi de $87.90 \text{ \$/h}$ e $109.57 \text{ \$/h}$, respectivamente para os casos 1B e 1C.

A Figura (6.24) mostra a produção dos geradores termoelétricos e eólicos para os casos simulados.

Figura 6.24: Produção dos geradores termoelétricos e eólicos nos casos 1A, 1B e 1C



Com a inserção do gerador eólico no sistema de geração de energia, o gerador termoelétrico P_{t_5} produziu a mesma quantidade nos 03 casos. Para o gerador P_{t_2} houve redução em suas produções do caso 1A para os casos 1B e 1C. Nos geradores P_{t_3} , P_{t_4} e P_{t_6} houve redução apenas do caso 1B para o caso 1C. Para o gerador P_{t_1} , ao invés de reduzir a produção, caso após caso, houve um aumento na produção dos casos 1B para 1C. Os geradores eólicos P_{w_1} e P_{w_2} produziram o máximo de potência dos seus geradores nos casos em que foram inseridos.

Conclusões

O Brasil é um país que tem amplas condições para explorar a produção da energia eólica, devido a sua diversidade climática e velocidades de vento diferentes em cada região. De acordo com as agências reguladoras do país novas unidades geradoras de energia serão instaladas aumentando significativamente a produção eólica na matriz energética brasileira. Daí a importância de se investigar a relevância da inserção destas para a produção de energia no sistema elétrico brasileiro.

No trabalho realizado, o novo modelo PMDEATE proposto e os variantes deste, PMDEATEb e PMDEATE₃, simulados numericamente, mostraram a importância e a viabilidade de se explorar a inserção das usinas eólicas no sistema de geração de energia, pois este auxilia tanto na redução da emissão de gases poluentes na atmosfera, quanto na redução dos custos operacionais de produção de energia, os quais são fatores importantes para o sistema de geração elétrico.

Em particular, as abordagens destes que consideraram a inserção de pontos de carregamento de válvula na função custo de combustíveis das unidades termoeletricas, denominadas de PMDEATE-PV, PMDEATEb-PV e PMDEATE₃-PV, possibilitaram a proposição de uma nova técnica multiobjetivo determinística que contribuiu na resolução numérica destes problemas, explorando de forma conjunta as técnicas de programação por metas ponderadas (PMP) e o método de restrições canalizadas progressivas (MRCP) e por isso denominada de PMPRCP. A resolução destes problemas também foi feita considerando a inserção de perdas de potência ativa nas linhas de transmissão do sistema, para os problemas PMDEATE-PPV, PMDEATEb-PPV e PMDEATE₃-PPV.

As propostas futuras para continuidade deste trabalho são: (i) Resolução do PMDEATE, PMDEATEb e PMDEATE₃ para o sistema 118 Barras, que contém 53 geradores

termoelétricos; (ii) Resolução do PMDEATEb para os problemas com 3 funções objetivos, o qual considera a função custo de combustíveis, a função custo associada às unidades eólicas e a função custo de emissão de poluentes, respectivamente, $C_c(P_t, y)$, $C_w(P_w, x)$ e $C_e(P_t, y)$; (iii) Resolver o PMDEATE₃ considerando a inserção de novos objetivos, tais como a função ambiental para as unidades eólicas e a função que representa as perdas nas linhas de transmissão do sistema; (iv) investigar os diferentes tipos de métodos e critérios relativos a técnica de programação por metas, para escolher aquela que se adapta melhor à resolução dos problemas propostos neste trabalho.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Aneel, 2ª ed, p. 93-109, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. Atlas de Energia Elétrica. **ANEEL, Brasília, Brasil. 3ªEd.**, p. 79-82, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA. **Acompanhamento das centrais geradoras eólicas - Expansão da oferta de energia elétrica - Superintendência de fiscalização dos serviços de geração. Janeiro/2019**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/655816/17849847/EOL_Cronograma_de_Eventos_jan_2019.pdf/418b2b37-4de5-3832-687d-a9d6fcf8c9fb>. Acesso em: 01 de fev. de 2019.

AL-HASAN, M.; NIGMATULLIN, R. R. Identification of the generalized Weibull distribution in wind speed data by the Eigen-coordinates method. **Renewable Energy**, 28(1), 93-110, 2003.

ALVES, M. B. Cálculo das Probabilidades II. **Universidade do Estado do Rio de Janeiro**, p.57, Rio de Janeiro, 2006.

AMBIENTE MAGAZINE. **Dinamarca lidera produção mundial de energia eólica em 2015**. Revista eletrônica - Publicado 22 jan 2016. Disponível em: <<https://www.ambientemagazine.com/dinamarca-lidera-producao-mundial-de-energia-eolica-em-2015/>>. Acesso em: 01 fev. 2019.

ARAÚJO, M.S.M. Relatório de Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: MDL – Estudos de Caso. **Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ**, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Boletim Anual de Geração Eólica 2017**. 2018. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 01 de fev. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Boletim Anual de Geração Eólica 2018**. 2019. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf>. Acesso em: 22 de jan. de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Dados mensais - Fevereiro de 2018**. 2018. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 01 de fev. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Energia eólica - os bons ventos do Brasil. InfoVento nº 08**. Atualizada em 05 nov de 2018. 2018. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/11/InfoventoPT_Online_8.pdf>. Acesso em: 01 de fev. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). **Energia eólica - os bons ventos do Brasil. InfoVento nº 14**. Atualizada em 13 dez de 2019. 2019. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/12/Infovento-14_PT.pdf>. Acesso em: 22 de jan. de 2020.

ATLANTIC ENERGIA RENOVÁVEIS. **Saiba como funciona o aerogerador, que transforma vento em eletricidade**. 26 fev 2016. Disponível em: <<http://atlanticenergias.com.br/saiba-como-funciona-o-aerogerador-que-transforma-vento-em-eletricidade/>>. Acesso em: 01 fev. 2019.

BERTSEKAS, D. P. **Nonlinear programming**. 2nd. ed. Belmont: Athena Scientific, 1999.

BAILEY, R. L.; DELL, T. R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.

- BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. Nonlinear programming: theory and algorithms. Third Edition. **A JOHN WILEY and SONS, INC., PUBLICATION**, 2013.
- BOYLE, G. Renewable energy, by Edited by Godfrey Boyle, pp. 456. **Oxford University Press**, May 2004.
- CARNEIRO, T. C.; CARVALHO, P. C.; LOPES, P. H. S.; DOS SANTOS, H. A. Inteligência coletiva para estimação dos parâmetros de Weibull: estudo de caso para as regiões sul e nordeste do Brasil. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**, 2018.
- CHANG, T. P. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. **Applied Energy**, 88(1), 272-282, 2011.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; FERGUSON, R. O. Optimal estimation of executive compensation by linear programming. **Management science**, v. 1, n. 2, p. 138-151, 1955.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W. Management models and industrial applications of linear programming. **Management Science**, v. 4, n. 1, p. 38-91, 1957.
- DA SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P. Caracterização do potencial eólico da direção predominante do vento no estado da Bahia. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz de Iguaçu-PR, 2002.
- DE DEUS ROSA FILHO, C.; PARISI, S. A.; DE ALBUQUERQUE SOARES, W. Avaliação da distribuição estatística e elaboração de modelo de regressão múltipla linear da velocidade média do vento. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 3(1), 024-036, 2018.
- DE VRIES, B.J.M.; VAN VUUREN, D.P.; HOOGWIJK, M. M. Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach. **Energy policy**, v. 35, n. 4, p. 2590-2610, 2007.
- DUTRA, R.M. Energia Eólica: Princípios e Tecnologia. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito CRESESB/CEPEL. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2019.

EHRGOTT, M. **Multicriteria optimization**. Vol. 491. Springer Science & Business Media, 2005.

EL-HAWARY, M. E.; EL-HAWARY, F.; MBAMALU, G. A. N. **NO_x emission performance models in electric power system**. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1992, [S.l.]. **Proceedings...** [S.l.]: [s.n.], 1992, v. 2.

FANG, S. C.; PUTHENPURA, S. Linear optimization and extensions. **Theory and Algorithms**, 1993.

FLEMING, R. A. The Weibull model and an ecological application: Describing the dynamics of foliage biomass on Scots pine. **Ecological modelling**, v. 138, n. 1-3, p. 309-319, 2001.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; SERAPHIM, O. J.; CANEPPELE, F. D. L. Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de Weibull para o regime eólico e suas aplicações. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 56-66, 2011.

GAMS. **Knitro**. Summary of Knitro options. Frechen, [2018?]. Disponível em: <https://www.gams.com/latest/docs/S_KNITRO.html#KNITRO_SUMMARY_OF_KNITRO_OPTIONS>. Acesso em: 01 fev. 2019.

GASCH, R.; TWELE, **Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation**. Springer Science & Business Media, 2011.

GENT, M. R.; LAMONT, J. W. Minimum-emission dispatch. **IEEE Transactions on power apparatus and systems**, n. 6, p. 2650-2660, 1971.

GONÇALVES, E.; BALBO, A. R.; DA SILVA, D. N.; NEPOMUCENO, L.; BAPTISTA, E. C.; SOLER, E. M. Deterministic approach for solving multi-objective non-smooth Environmental and Economic dispatch problem. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 104, p. 880-897, 2019.

GÜVENÇ, U.; KAYMAZ, E. Economic Dispatch Integrated Wind Power Using Coyote Optimization Algorithm. **7th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG)**. IEEE. p. 179-183, 2019.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global wind statistics 2017. 2018. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2019.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global wind report 2018. 2018. Disponível em: <<https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

HAIMES, Y. Y. On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. **IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics**, v. 1, n. 3, p. 296-297, 1971.

HAPP, H. H. Optimal power dispatch - a comprehensive survey. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 96, n. 3, p. 841-854, 1977.

HETZER, J; YU, D. C.; BHATTARAI, K. An economic dispatch model incorporating wind power. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 23, n. 2, p. 603-611, 2008.

HUILLET, T.; RAYNAUD, H. F. Rare events in a log-Weibull scenario-Application to earthquake magnitude data. **The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems**, v. 12, n. 3, p. 457-469, 1999.

IGNIZIO, J. P. **Goal programming and extensions**. Lexington Books, 1976.

JANNUZZI, G. M.; SWISHER, J. N. Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis. In: **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**, 1997.

JONES, D.; TAMIZ, M. **Practical goal programming**. New York: Springer, 2010.

KOJIMA, M.; MIZUNO, S.; YOSHISE, A. A primal-dual interior point algorithm for linear programming. In: **Progress in mathematical programming**. Springer, New York, NY, 1989. p. 29-47.

KWON, Soon-Duck. Uncertainty analysis of wind energy potential assessment. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 856-865, 2010.

- LEE, S. M. et al. **Goal programming for decision analysis**. Philadelphia: Auerbach Publishers, 1972.
- MATSUMURA, E. H. **Ensaio sobre Liberalização, Regulação e Investimento em Sistemas Hidrotérmicos**. 2003. Phd Thesis, Departamento de Economia - Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- MEHROTRA, S. On the implementation of a primal-dual interior point method. **SIAM Journal on optimization**, v. 2, n. 4, p. 575-601, 1992.
- MIETTINEN, K. **Nonlinear multiobjective optimization**. Boston : Kluwer Academic Publishers, c1999.
- MILLER, R. H. . **Operação de Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1987.
- MONTEIRO, R. D.; ADLER, I. Interior path following primal-dual algorithms. Part I: Linear programming. **Mathematical programming**, v. 44, n. 1-3, p. 27-41, 1989.
- NASCIMENTO, A.; MALDANER, S.; MARAN, V.; DEGRAZIA, G. A.; ROBERTI, D. R.; MOREIRA, V. S.; DIAZ, M. B.; STEFANELLO, M. B.; RIZZA, U. EVALUATION OF WIND POTENTIAL IN A REGION OF SOUTHERN BRAZIL. **Ciência e Natura**, v. 40, p. 100-106, 2018.
- O PETRÓLEO. **Brasil permite 229 MW de parques eólicos e solares para iniciar operações**. Revista eletrônica - Publicado em 04 jan 2019. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/brasil-permite-229-mw-de-parques-eolicos-e-solares-para-iniciar-operacoes/>>. Acesso em: 01 fev. 2019.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Boletim Mensal de Geração Eólica - Dezembro/2018. 2019. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim_Eolica_dez_2018.pdf>. Acesso em: 01 de fev. de 2019.
- PINHEIRO, R. B.; BALBO, A. R.; BAPTISTA, E. C.; NEPOMUCENO, L. Interior-exterior point method with global convergence strategy for solving the reactive optimal

power flow problem. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 66, p. 235-246, 2015.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; KEYHANI, A.; SEFEEDPARI, P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 313-322, 2015.

PORTAL ENERGIA - ENERGIAS RENOVÁVEIS. Como funciona um gerador. Abr 14, 2016. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>>. Acesso em: 01 fev. 2019.

QU, B. Y.; LIANG, J. J.; ZHU, Y. S.; WANG, Z. Y.; SUGANTHAN, P. N. Economic emission dispatch problems with stochastic wind power using summation based multi-objective evolutionary algorithm. **Information Sciences**, v. 351, p. 48-66, 2016.

RAJAGOPALAN, A.; KASINATHAN, P.; NAGARAJAN, K.; RAMACHANDARAMURTHY, V. K.; SENGODEN, V.; ALAVANDAR. S. Chaotic self adaptive interior search algorithm to solve combined economic emission dispatch problems with security constraints. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, 29.8 (2019): e12026.

ROCHA, N. A.; SCHULTZ, D.; SUGAI, M.; do AMARANTE, O.; BITTENCOURT, R. Estabilização sazonal da oferta de energia através da complementaridade entre os regimes hidrológico e eólico. **XV SNPTEE, Foz do Iguaçu**, 1999.

ROCHA, P. A. C.; Rocha, P. A. C.; de SOUZA, R. C.; de ANDRADE, C. F.; da SILVA, M. E. V. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 395-400, 2012.

SAADAT, H.. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Series in Electrical Computer Engineering. 1999.

SAMED, M. M. A. **Um algoritmo genético Híbrido co-evolutivo para resolver problemas de despacho**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Maringá - Departamento de Engenharia Química, 2004.

SANTOS, M. R. B. **Métodos de pontos interiores/exteriores, de restrições canalizadas progressivas e de suavização arco tangente, em problemas de despacho econômico e ambiental.** 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2016.

SILVA, D. N. **Método primal-dual previsor-corretor de pontos interiores e exteriores com estratégias de correção de inércia e suavização hiperbólica aplicado ao problema de despacho econômico com ponto de carregamento de válvula e representação da transmissão.** 2014. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2014.

SILVA, G. R. **Características de vento da região Nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas.** 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SINGH, T.; MISHRA, K. K. Multiobjective environmental adaptation method for solving environmental/economic dispatch problem. **Evolutionary Intelligence**, 2019, 12.2: 305-319.

STANZANI, A. L. **Método previsor-corretor primal-dual de pontos interiores em problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental.** 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2012.

DE LORENA STANZANI, A.; BALBO, A. R.; NEPOMUCENO, L.; BAPTISTA, E. C. Solving the Multiobjective Environmental/Economic Dispatch Problem using Weighted Sum and ϵ -Constraint Strategies and a Predictor-Corrector Primal-Dual Interior Point Method. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 4, n. 25, p. 503-515, 2014.

STEINBERG, M. J.; SMITH, T. H. **Economy loading of power plants and electric systems.** New York: J. Wiley & Sons, 1943.

STEINBERG, M. J.; SMITH, T. H. The theory of incremental rates and their practical Application to load division—Part I. **Electrical Engineering**, v. 53, n. 3, p. 422-445, 1934.

SULLIVAN, R. L.; HACKETT, D. F. Air quality control using a minimum pollution-dispatching algorithm. **Environmental science & technology**, v. 7, n. 11, p. 1019-1022, 1973.

WHITTEMORE, A.; ALTSHULER, B. Lung cancer incidence in cigarette smokers: further analysis of Doll and Hill's data for British physicians. **Biometrics**, p. 805-816, 1976.

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

YIN, J.; ZHAO, D. Economic dispatch coordinated with information granule chance constraint goal programming under the manifold uncertainties. **IET Renewable Power Generation**, 2019, 13.8: 1329-1337.

ZHANG, X.; WANG, H.; PENG, J. C.; LIU, Y.; WANG, G.; JIANG, H. GPNBI inspired MOSDE for electric power dispatch considering wind energy penetration. **Energy**, v. 144, p. 404-419, 2018.

ZHU, Y.; QIAO, B.; DONG, Y.; QU, B.; WU, D. Multiobjective dynamic economic emission dispatch using evolutionary algorithm based on decomposition. **IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, 2019, 14.9: 1323-1333.

Apêndice

Terminologia dos problemas multiobjetivo

Neste Apêndice são apresentados alguns conceitos e teoremas em otimização multiobjetivo, os quais são importantes para o desenvolvimento do Capítulo 5 em que são mostrados os resultados obtidos, pela metodologia utilizada para a resolução do PMDEATE. a terminologia apresentada foram baseadas em Jones e Tamiz (2010) e Ehrgott (2005).

Conceitos e definições

1. **Problema geral de otimização multiobjetivo:** Um problema de otimização multiobjetivo tem um número $r > 1$ de funções objetivos que devem ser minimizadas, sujeito a um conjunto viável $X \in \mathfrak{R}_n$. A forma geral de um problema de otimização multiobjetivo é

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } z_1 = f_1(x) \\
 & \text{Minimizar } z_1 = f_1(x) \\
 & \quad \dots \\
 & \text{Minimizar } z_r = f_r(x)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

sujeito a $x \in X = \{x \in \mathfrak{R}_n : g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, l\}$,

- $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathfrak{R}_n$ é o vetor das variáveis decisórias;
- $z_k = f_k(x)$ em que k-ésima função objetivo a ser minimizada, com $k = 1, 2, \dots, r$;
- X é o espaço de decisão ou factível, gerado pelas l restrições $g_j(x) \leq 0, x \in \mathfrak{R}_n$.

2. **Espaço objetivo:** O espaço $Z \in \mathfrak{R}_n$ gerado pela aplicação das r funções objetivos no espaço X é chamado objetivo. Mais formalmente, $Z = \{z \in \mathfrak{R}_n : z_r = f_r(x), r = 1, \dots, l, \forall x \in X\}$.

3. **Dominância:** Uma solução x^1 domina outra solução x^2 , ambas pertencentes a um conjunto X , se ambas condições a seguir são satisfeitas:

(a) A solução x^1 não é pior que a solução x^2 em todos os objetivos, isto é, $f_k(x^1) \leq f_k(x^2)$, $k = 1, \dots, r$.

(b) A solução x^1 é estritamente melhor que a solução x^2 em pelo menos uma componente $\bar{k} \in \{1, \dots, r\}$, isto é, $f_{\bar{k}}(x^1) < f_{\bar{k}}(x^2)$.

No caso em que x^1 domina x^2 , utiliza-se a notação $x^1 \leq x^2$. Quando x^1 não domina x^2 , escreve-se $x^1 \not\leq x^2$, onde $x \leq y$ se, e somente se, $x_i \leq y_i$ e $x_j \leq y_j$ para algum $j = 1, \dots, n$.

4. **Solução eficiente:** Uma solução $x^* \in X$ é chamada eficiente, se não existe uma outra solução $x \in X$ de maneira que $x \leq x^*$. Uma solução eficiente também é denominada de solução *Pareto eficiente*, Pareto-ótima ou não dominada no espaço objetivo.

De acordo com Jones e Tamiz (2010), uma solução de um problema multiobjetivo é Pareto e eficiente se não existe nenhuma outra solução viável que é tão boa em relação a todos os objetivos e estritamente melhor no que diz respeito a pelo menos um objetivo.

5. **Conjunto eficiente:** O conjunto eficiente denotado por X^* são todos os elementos de X que não são dominados por nenhum membro de X , isto é, $X^* = \{x^* \in X : x \not\leq x^*, \forall x \in X\}$.

6. **Solução não eficiente:** Uma solução de um problema multiobjetivo é não eficiente, se, outra solução viável que existe é pelo menos tão boa no que diz respeito a todos os objetivos e estritamente melhor no que diz respeito a pelo menos um objetivo. Uma solução não eficiente também é denominada de solução Pareto ineficiente, Pareto sub-ótima ou dominada no espaço objetivo.

7. **Ponto não-dominado:** Um ponto z^* no espaço objetivo é chamado de não-dominado se sua imagem inversa é uma solução eficiente, isto é, $z^* = f(x^*)$.

8. **Ponto ideal:** Um ponto no espaço objetivo em que cada objetivo de um problema de otimização multiobjetivo leva o seu valor ótimo quando otimizado individualmente, dentro da região viável, é conhecido como ponto ideal.
9. **Ponto nadir:** O ponto nadir é de nido como o pior valor para cada objetivo individual dentre aqueles da fronteira de Pareto.

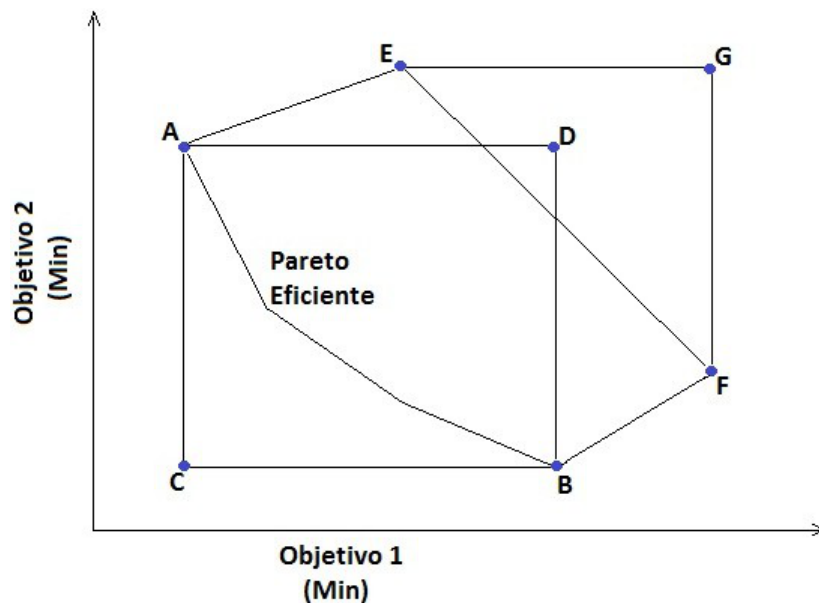
Em geral o ponto nadir é computacionalmente difícil de ser obtido. Entretanto, para o problema bi-objetivo, ele é facilmente calculado de acordo com a seguinte proposição:

Proposição 1: Dado um problema de otimização bi-objetivo, no conjunto de soluções e cientes, o valor mínimo de uma função objetivo é o valor máximo da outra e vice-e-versa.

De acordo com a Proposição 1, um problema de otimização bi-objetivo, envolvendo as funções f_1 e f_2 , estabelece que essas são funções conflitantes entre si.

O ponto nadir não deve ser confundido com a solução cujas componentes são os maiores valores possíveis para as funções objetivo consideradas no espaço Z de soluções do problema bi-objetivo, a qual é denominada de ponto anti-ideal.

Figura A.1: Representação gráfica dos termos de um problema bi-objetivo



Fonte adaptada de Jones e Tamiz

Em relação à Figura A.1, os principais pontos observados são apontados à seguir:

- A: ponto lexicográfico com o menor valor para a função objetivo 1 e o maior valor para a função objetivo 2, dentre os pontos da fronteira de Pareto.

- B: ponto lexicográfico com o menor valor para a função objetivo 2 e o maior valor para a função objetivo 1, dentre os pontos da fronteira de Pareto.
- C: Ponto ideal (Definição 8), também conhecido como ponto utópico.
- D: Ponto nadir (Definição 9).
- E: É o ponto que contém o maior valor possível para a função objetivo 2, dentre aqueles que estão no espaço objetivo do problema bi-objetivo.
- F: É o ponto que contém o maior valor possível para a função objetivo 1, dentre aqueles que estão no espaço objetivo do problema bi-objetivo.
- G: Ponto anti-ideal. É o ponto de nido pelos maiores valores possíveis de nidos para a função objetivo 1 e a função objetivo 2, dentre aqueles do espaço objetivo do problema bi-objetivo.

A terminologia, definições e resultados vistos neste Apêndice são exploradas no Capítulo 5 da tese.

Apêndice B

Dados utilizados

Sistema IEEE - 30 barras

Os coeficientes de custo das unidades geradoras são apresentados na Tabela (B.1).

Tabela B.1 - Dados dos geradores termoeletrônicos

Unidade	P_t^{min}	P_t^{max}	Função econômica					Função ambiental		
(t)	(MW)	(MW)	a	b	c	e	f	α	β	γ
1	50	200	0.00375	2.00	0	22.0310	0.083776	0.00419	0.32767	13.85932
2	20	80	0.01750	1.75	0	10.5000	0.209440	0.00419	0.32767	13.85932
3	15	50	0.06250	1.00	0	8.8594	0.359040	0.00683	-0.54551	40.26690
4	10	35	0.08340	3.25	0	8.7538	0.502650	0.00683	-0.54551	40.26690
5	10	30	0.02500	3.00	0	4.0000	0.628320	0.00461	-0.51116	42.89553
6	12	40	0.02500	3.00	0	6.0200	0.448800	0.00461	-0.51116	42.89553

Os limitantes dos aerogeradores utilizados são: $v_i = 5m/s$, $v_r = 15m/s$, $v_0 = 25m/s$ para, respectivamente, a velocidade inicial, nominal e de corte. Foram utilizados os valores para o coeficiente do custo de penalização de $k_p = 0.95$ e para o coeficiente do custo reserva de $k_r = 0.05$. Os outros dados eólicos estão na Tabela (B.2)

Tabela B.2 - Dados dos geradores eólicos

Unidade	número de	Potência	P_w^{max}	d
(i)	turbinas	por turbina	(MW)	(\\$)
1	25	1.30 MW	32.50	\$ 0.80
2	15	2.50 MW	37.50	\$ 0.60
3	18	1.20 MW	21.60	\$ 1.05
4	17	1.50 MW	25.50	\$ 1.20
5	14	1.10 MW	29.25	\$ 0.75