



Revista Eletrônica  
Paulista de Matemática

ISSN 2316-9664  
Volume 14, fev. 2019  
Edição Ermac

**Andréa Camila dos Santos  
Martins**

Universidade Estadual Paulista  
“Júlio de Mesquita Filho”  
andreamartins@fc.unesp.br

**Antonio Roberto Balbo**

Universidade Estadual Paulista  
“Júlio de Mesquita Filho”  
arbalbo@fc.unesp.br

**Dylan Jones**

University of Portsmouth  
dylan.jones@port.ac.uk

## A modelagem matemática de um problema de despacho térmico e eólico e sua influência na redução da emissão de $CO_2$

The mathematic modeling of a dispatch problem thermal and wind energy and its influence in reduction in  $CO_2$  emissions

### Resumo

A produção de energia eólica tem se destacado no Brasil e mostrado grande importância na questão ambiental, pois auxilia na redução da emissão de  $CO_2$  e de outros poluentes na atmosfera provenientes de outras fontes de energia. O objetivo desse trabalho é mostrar como a utilização da produção de energia eólica reduz significativamente os danos ambientais e os custos operacionais de geração de energia. A modelagem matemática de otimização multiobjetivo será explorada na resolução de um despacho térmico e eólico através do método de soluções de restrições canalizadas progressivas e de técnicas de Programação por metas. As soluções dos subproblemas gerados por estes métodos serão determinadas através de pacotes computacionais e serão apresentados os resultados de dois casos distintos de produção de energia, mostrando a influência da energia eólica na geração demandada e no impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Matemática Aplicada à Engenharia. 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 the emission of  $CO_2$  and other pollutants into atmosphere arising out of other sources of energy. The aim of this work is to show how the utilization of wind energy production significantly reduces the environmental impacts and the operational costs of generating energy. The mathematical modeling of multiobjective optimization will be explored in the resolution of a thermal and wind dispatch through the solution method of progressive bounded constraints and techniques of Goal Programming. The solutions of the subproblems generated by these methods will be determined through of computational packages and the results of two distinct cases of energy production will be presented, showing the influence of the wind power in the generation demand and about the environmental impact.

**Keywords:** Mathematics Applied to Engineering. Wind Energy. Multiobjective Optimization. Goal Programming.

# 1 Introdução

Segundo a Global Wind Energy Council (2018) em 2017 o Brasil atingiu a 8ª posição no *ranking* mundial em capacidade instalada de energia eólica, chegando a 13 GW (gigawatts) de potência instalada com mais de 500 parques eólicos. Como o impacto ambiental para a instalação de usinas eólicas é baixo e a região utilizada pode ser reaproveitada para outras atividades (por exemplo a agropecuária), o aumento da produção de energia eólica tem auxiliado significativamente na redução da emissão de  $CO_2$ , a qual tornou-se uma preocupação mundial devido ao aumento de fábricas e utilização da energia térmica como fonte de produção de energia. De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica 2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2017) foram evitadas a emissão de 17,81 milhões de toneladas de  $CO_2$  no ano de 2016 e através do aumento de produção alcançado no ano seguinte, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (2018) essa redução atingiu mais 20 milhões de toneladas. A produção eólica dentro da matriz energética brasileira tem sido uma alternativa para melhorar a redução da emissão de  $CO_2$  e diminuir os custos operacionais de produção de energia térmica. Neste trabalho um modelo multiobjetivo de despacho econômico que correlaciona a produção simultânea de energia térmica e eólica, seus custos de produção e despacho ambiental será investigado para verificar a eficiência da matriz eólica na redução da emissão de  $CO_2$ .

O despacho econômico e ambiental para o sistema de geração térmica tem como objetivo minimizar respectivamente, o custo dos combustíveis e a emissão dos poluentes que ocorrem através da queima de combustíveis fósseis, e ao mesmo tempo atender as restrições operacionais do problema. O despacho econômico relativo a 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. Nos modelos que analisam a produção eólica de energia, a função de distribuição de probabilidade de *Weibull* é considerada na análise do aproveitamento da energia eólica por sua capacidade de fazer previsões utilizando pouca quantidade de dados.

Na literatura, em Qu et al (2016) é proposto um modelo multiobjetivo, o qual minimiza as funções econômica e ambiental dos geradores térmicos. Os geradores eólicos são inseridos nas restrições do modelo, onde a geração das unidades térmicas e eólicas devem cobrir a demanda e as perdas de transmissão de energia, capacidade de reserva do sistema e os limites de produção dos geradores térmicos. 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*), que 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 econômica apresentada em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008), que soma a função custo dos geradores térmicos e eólicos, a função ambiental 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) é proposto um despacho econômico térmico e eólico com o objetivo de minimizar os custos dos combustíveis das usinas térmicas e os custos de geração eólica, os quais são considerados de forma conjunta, atendendo a uma demanda e respeitando os limites operacionais dos geradores térmicos e eólicos. No artigo citado, a consideração conjunta das funções custo de geração térmico 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 as integrais definidas que aparecem na função eólica, mas uma explanação de alguns casos distintos relacionados aos coeficientes de custo associados a estas integrais, apresentando o comportamento dos geradores eólicos e térmicos em relação à variação destes.

Baseando-se nos autores citados, no modelo proposto neste trabalho foi realizada uma combinação do despacho econômico e ambiental das usinas térmicas e o despacho econômico das usinas eólicas definindo assim um modelo multiobjetivo, que minimiza simultaneamente os custos de produção e a emissão de  $CO_2$ , atendendo a uma demanda de produção determinada e restrições operacionais dos geradores térmicos e eólicos. A junção desses problemas em um único modelo é denominada de problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental térmico-eólico, abreviada por PMDEATE.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura que abordam o PMDEATE, não utilizam métodos determinísticos à sua resolução, o qual é um dos objetivos deste trabalho.

A metodologia determinística proposta à resolução do PMDEATE explora métodos de solução de problemas multiobjetivo, o método de restrições canalizadas progressivas (MRCP) desenvolvidos em Santos (2016) e Gonçalves (2015), e a técnica de programação por metas proposta em Jones e Tamiz (2010), os quais são utilizados em conjunto com métodos de pontos interiores desenvolvidos, entre outros, em Mehrotra (1992) e Bertsekas (1999), disponibilizados no *software Gams*, à resolução do problema em destaque.

Para utilização da metodologia proposta, no modelo as funções custo do despacho térmico e eólico são tratadas de forma conjunta, tal qual em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008), fazendo com que este tenha dois objetivos distintos e possibilitando a utilização destes métodos.

O MRCP torna 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, limitada superior e inferiormente, sendo utilizado para determinar a curva de Pareto-ótima do problema. Com valores pré-estimados de acordo com os dados do problema, a técnica de Programação por metas possibilita a determinação de soluções de compromisso do problema, para os casos considerados, as quais pertencem à curva de Pareto-ótima. As soluções de compromisso são definidas, considerando as metas estabelecidas, a partir de parâmetros de peso que estabelecem quais das metas tem maior ou menor importância, auxiliando o tomador de decisão na busca de soluções de seu interesse. Especificamente, é considerada a técnica de Programação por metas ponderadas (*Weighted Goal Programming*), a qual, através dos parâmetros de peso impostos, determina soluções de compromisso do problema que pertencem à curva de Pareto-ótima, determinada pelo MRCP. Sendo assim uma técnica é corroborada pela outra e vice-versa. A resolução dos subproblemas foram realizadas através do *software Gams* utilizando o pacote computacional *knitro*, que é um pacote de otimização utilizado para encontrar soluções de problemas de otimização, explorando métodos de pontos interiores.

As modificações realizadas no trabalho de Martins, Balbo e Jones (2018) em relação a este, ocorrem com a inserção das usinas eólicas no sistema de geração de energia, realizada de forma

gradativa. O primeiro objetivo do trabalho proposto, em campo prático, é mostrar como o crescimento das implantações de unidades eólicas em um sistema de geração pode melhorar, tanto a questão relativa ao impacto ambiental, quanto ao custo de produção, atendendo à demanda pré-estabelecida. Assim, novas unidades eólicas foram inseridas no sistema de geração onde, inicialmente foram utilizadas apenas fontes térmicas, mostrando que os resultados obtidos com a inserção das usinas eólicas são relevantes, ou seja, quanto mais forem utilizadas essa fonte de energia, melhor os resultados obtidos quanto aos impactos ambientais, relativos à emissão de poluentes na natureza e aos custos de produção de energia térmica e eólica. A dificuldade da utilização desta fonte de energia é a sua natureza estocástica. O segundo objetivo, em campo metodológico, é mostrar que o Método das restrições canalizadas progressivas e a técnica de Programação por metas, utilizada pela primeira vez à resolução de um modelo multiobjetivo não-linear, em conjuntos com os métodos de pontos interiores, são eficientes para a análise e determinação de soluções do PMDEATE. Essas são as principais contribuições do trabalho proposto.

O desenvolvimento do trabalho foi realizado com a formulação do modelo matemático multiobjetivo PMDEATE definido na Seção 2. A Seção 3 está relacionada à estocasticidade do modelo proposto, apresentando a relação entre a velocidade do vento e a função de probabilidade utilizada. A metodologia utilizada para a resolução do modelo multiobjetivo na Seção 4, apresenta o MRCP e a técnica de Programação por metas ponderadas. Os resultados obtidos através da simulação de dois casos de geração de energia encontram-se na Seção 5 e as conclusões desses resultados são apresentadas na Seção 6. As referências bibliográficas são apresentadas na Seção 7.

## 2 O modelo matemático

A formulação do modelo multiobjetivo de despacho térmico e eólico tem como objetivo minimizar os custos de produção de energia eólica e minimizar os impactos ambientais gerados pela produção térmica, sujeito às restrições operacionais das unidades térmicas e eólicas e o atendimento da demanda. Esse modelo é representado por:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} && \{f_e + f_w, f_a\} \\ & \text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n P_{w_i} + \sum_{j=1}^m P_{t_j} = D \\ & && 0 \leq P_{w_i} \leq P_{w_i}^{max} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \\ & && P_{t_j}^{min} \leq P_{t_j} \leq P_{t_j}^{max} \quad \text{para } j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

As funções objetivo do problema  $f_e$ ,  $f_a$  e  $f_w$  são definidas como:

$f_e$ : função econômica das usinas térmicas, definida por:

$$f_e = \sum_{j=1}^m a_j P_{t_j}^2 + b_j P_{t_j} + c_j \quad (2)$$

sendo  $a_j$ ,  $b_j$  e  $c_j$  representam os coeficientes da função econômica da unidade geradora  $j$ .

$f_a$ : função ambiental das usinas térmicas, definida por:

$$f_a = \sum_{j=1}^m A_j P_{t_j}^2 + B_j P_{t_j} + C_j \quad (3)$$

sendo  $A_j$ ,  $B_j$  e  $C_j$  são os valores dos coeficientes da função ambiental da unidade geradora  $j$ .

$f_w$ : função econômica das usinas eólicas, definida por:

$$f_w = C_w + C_p + C_r \quad (4)$$

onde  $C_w$ ,  $C_p$  e  $C_r$  são respectivamente os custos linear, penalidade e reserva apresentados na Seção 3.

As restrições devem satisfazer a demanda dos operadores térmicos e eólicos, assim como seus limites de operação, sendo assim:

D: potência demandada a ser atendida em produção de energia usinas eólicas e térmicas, em (MW).

$P_{w_i}$ : potência gerada pela usina eólica  $i$ , para  $i = 1, \dots, n$ .

$P_{t_j}$ : potência gerada pela usina térmica  $j$ , para  $j = 1, \dots, m$ .

$P_{w_i}^{max}$ : limite máximo de potência da usina eólica  $i$ .

$P_{t_j}^{min}$  e  $P_{t_j}^{max}$ : limites mínimo e máximo de potência da usina térmica  $j$ .

O despacho econômico tem como objetivo reduzir o custo de produção de energia, ou seja, calcular a geração de cada unidade geradora com o custo mínimo possível atendendo a demanda. Estudos pioneiros utilizavam a resolução de custo mínimo por ordem de mérito, onde era demandada da unidade geradora mais eficiente para a menos eficiente até a demanda total ser suprida, mas percebeu-se que esse método não era eficaz para minimizar os custos de geração. A partir disso surgiu a técnica de custos incrementais, onde a distribuição de energia era feita a partir da unidade com menor custo incremental (SILVA, 2014). Para evitar dificuldades relacionadas aos problemas não-lineares, não convexos e não diferenciáveis. Nos trabalhos encontrados na literatura, a função econômica ( $f_e$ ) é uma função quadrática e convexa (sem a inserção de ponto de carregamento de válvula), definida como o somatório da função dos custos relativos aos gastos dos combustíveis de cada gerador (STEINBERG; SMITH, 1943).

Os impactos ambientais causados pelas usinas térmicas foram desconsiderados por muito tempo, pois a preocupação econômica era prioridade quando se tratava na produção de energia térmica. Entretanto, com o aumento da emissão dos gases na atmosfera surgiu-se a necessidade de utilizar as usinas que causassem menos danos ambientais, porém seus custos de geração eram maiores. Para realizar esse trabalho técnicas matemáticas utilizaram as influências do ambiente e as condições meteorológicas para reduzir a emissão desses poluentes na atmosfera

(GONÇALVES, 2015). O despacho ambiental tem como objetivo reduzir a emissão de poluentes na natureza, considerando as condições ambientais de um sistema de geração de energia. A função ambiental ( $f_a$ ) é modelada levando em consideração a relação entre a quantidade em  $kg/h$  de cada poluente e a saída de potência da unidade em  $MW/h$ , calculando os níveis de concentração resultantes de cada gerador e, considerando estas informações, também é formulada na literatura como uma função quadrática e convexa (EL-HAWARY; EL-HAWARY; MBAMALU, 1992).

A função custo das usinas eólicas é definida pela soma de 3 funções: de custo linear ( $C_w$ ), de custo penalidade ( $C_p$ ) e de custo reserva ( $C_r$ ) os quais são, respectivamente, o custo associado a quantidade de energia produzida, o custo que representa a diferença entre a energia eólica disponível e a energia eólica utilizada e o custo que representa a incerteza da geração de energia eólica disponível ser menor que a energia eólica programada. As funções de custo penalidade e reserva utilizam a distribuição de probabilidade de *Weibull* em sua formulação, as quais serão definidas na Seção 3. As definições referentes a esta função estão baseadas em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008).

### 3 A incerteza da velocidade do vento e a função de probabilidade de *Weibull*

A função de densidade de probabilidade de *Weibull* é uma variante da distribuição de probabilidade gama para dois parâmetros, que neste caso são  $k$  e  $c$ . Essa distribuição é contínua e utilizada em aplicações no aproveitamento da energia eólica, em que  $k$  é o fator de forma referente à uniformidade da distribuição dos valores da velocidade do vento, conhecido como a inclinação da distribuição e  $c$  é o fator de escala relacionado com a velocidade média e qualifica a velocidade do vento onde a usina eólica está instalada (ROCHA et al, 2012).

No sistema de conversão de energia eólica descrita em Hetzer, Yu e Bhattarai (2008), a função de distribuição de probabilidade  $fW(w)$  é baseada na distribuição de probabilidade de *Weibull*, a qual passa por uma transformação permitindo que a variável aleatória, que é a velocidade do vento, seja representada por uma potência de saída ( $w$ ), a qual será apresentada na Figura 1.

Para a função  $fW(w)$ , além dos parâmetros  $k$  e  $c$  da distribuição de probabilidade de *Weibull*, a potência nominal ( $w_r$ ) e os limitantes de velocidade do vento relacionadas às turbinas, dado por  $v_i$  (velocidade inicial) e  $v_r$  (velocidade nominal) serão utilizados. Assim, a função de probabilidade compatível ao sistema de conversão de energia eólica é dada por:

$$fW(w) = \frac{klv_i}{c} \left( \frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{(1+\rho l)v_i}{c} \right)^k \right) \quad (5)$$

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

$\rho = \frac{w}{w_r}$  é a relação entre a potência de saída e a potência nominal.

Comparado à outras fontes de energia, o custo da produção de energia eólica é relativamente baixo, assim é interessante gerar a maior quantidade possível de energia eólica. Porém, com a incerteza da velocidade do vento disponível, a função econômica da geração de energia eólica ( $f_w$ ), dependente desta velocidade, é definida por 3 funções custos diferentes:

1. custo linear ( $C_w$ ): relacionado diretamente à produção de energia de cada gerador.

$$C_w = d_i \cdot P_{w_i} \quad (6)$$

onde  $d_i$  é o coeficiente de custo de operação para o gerador  $i$ , para  $i = 1, \dots, n$ .

2. custo penalidade ( $C_p$ ): relacionado à não utilização de toda a energia produzida pela fonte eólica.

$$C_p = k_p \int_{P_{w_i}}^{w_{r_i}} (w - P_{w_i}) fW(w) dw \quad (7)$$

3. custo reserva ( $C_r$ ): relacionado ao não atendimento da demanda esperada pela produção de energia eólica.

$$C_r = k_r \int_0^{P_{w_i}} (P_{w_i} - w) fW(w) dw \quad (8)$$

Assim, a função custo eólica é definida por:

$$f_w = C_w + C_p + C_r \quad (9)$$

A produção de energia eólica depende da velocidade do vento do local onde está inserida. Como a velocidade do vento é uma variável aleatória o modelo proposto torna-se estocástico e o sistema de conversão de energia eólica utiliza a função de probabilidade (5) para a formulação dos custos penalidade (7) e reserva (8).

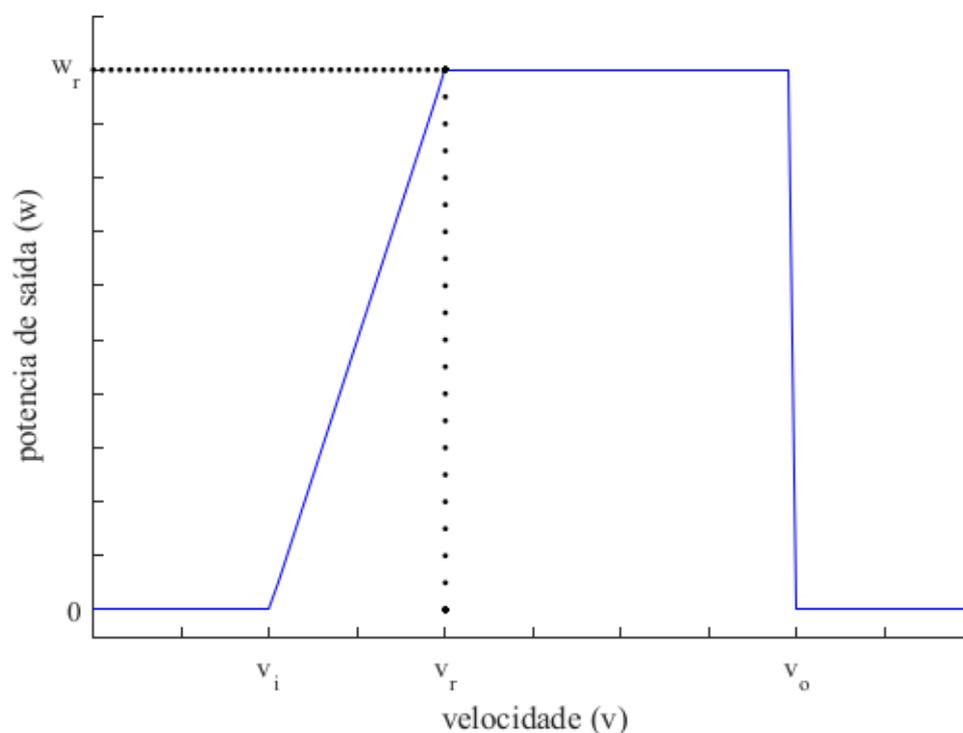
Alguns limitantes de velocidade do vento são necessários para que o gerador eólico comece a produção de energia, assim uma velocidade inicial ( $v_i$ ) é necessária para que as turbinas comecem sua geração. Com o aumento da velocidade é necessário outro limitante denominado por velocidade nominal do gerador ( $v_r$ ), para o qual a potência gerada aumenta gradativamente até atingir a sua potência nominal ( $w_r$ ). A partir desse momento a produção de energia permanece constante até atingir uma velocidade de corte ( $v_o$ ), a qual é determinada para que o gerador eólico não sofra danos estruturais e, a partir desta, este deixa de produzir energia.

Para determinar a potência saída ( $w$ ) de geração do sistema é realizada uma transformação linear da função em relação à velocidade do vento ( $m/s$ ), expressa por:

$$w = \begin{cases} 0, & \text{para } v < v_i \text{ e } v > v_o \\ w_r \frac{(v - v_i)}{(v_r - v_i)}, & \text{para } v_i \leq v \leq v_r \\ w_r, & \text{para } v_r \leq v \leq v_o \end{cases} \quad (10)$$

A Figura 1 mostra como a variação da velocidade do vento determina a potência de saída de energia gerada de acordo com as equações (10).

Figura 1: Comportamento da potência em relação a velocidade do vento



Após estabelecer a correlação entre a velocidade do vento e a potência eólica gerada, a resolução do modelo (1) é feita considerando-se subproblemas mono-objetivos gerados através do Método de restrições canalizadas progressivas e a utilização da técnica de Programação por metas que serão vistos na Seção 4.

## 4 Metodologia de resolução de problemas multiobjetivo

Os métodos utilizados para a resolução do modelo (1) são: o Método de restrições canalizadas progressivas (MRCP) encontradas em Santos (2016) e Gonçalves (2015) e a técnica de Programação por metas encontrada em Jones e Tamiz (2010). Na literatura, os modelos multi-objetivos podem ser resolvidos por métodos determinísticos ou heurísticos, sendo escolhidos de acordo com a complexidade do modelo. Para o problema de despacho térmico e eólico apresentado será utilizado o MRCP para encontrar as soluções eficientes que compõem a curva de Pareto-ótima e a técnica de Programação por metas para comparar as soluções encontradas em cada caso apresentado, determinando as soluções de compromisso que pertencem à curva de Pareto-ótima.

Como já mencionada, as funções de custo de geração  $f_e$  e  $f_w$  são consideradas de forma conjunta para tratar o modelo com dois objetivos distintos, para utilizar os métodos citados e podem gerar a curva de Pareto-ótima e as soluções de compromisso.

A partir da definição dos seguintes problemas:

$$\{ \text{Minimizar } f_e + f_w, \text{ sujeito às restrições do problema (1)} \} \quad (11)$$

e

$$\{ \text{Minimizar } f_a, \text{ sujeito às restrições do problema (1)} \} \quad (12)$$

Os problemas (11) e (12) são utilizados para determinar as soluções  $f_a^{\min}$ ,  $(f_e + f_w)^{\min}$ ,  $f_a^{\max}$  e  $(f_e + f_w)^{\max}$  que são encontradas da seguinte forma:

- determinando a solução do problema (11) encontramos  $(f_e + f_w)^{\min}$ , o qual é o valor mínimo da função custo e  $f_a^{\max}$ , o qual é o valor máximo da função ambiental.
- determinando a solução do problema (12) encontramos  $f_a^{\min}$ , o qual é o valor mínimo da função ambiental e  $(f_e + f_w)^{\max}$ , o qual é o valor máximo da função custo.

Essas soluções são chamadas soluções lexicográficas. A solução denominada ideal é definida pelo valor de  $(f_e + f_w)^{\min}$  do problema (11) e  $f_a^{\min}$  do problema (12). Essas soluções serão utilizadas nas Seções 4.1 e 4.2.

#### 4.1 Método de restrições canalizadas progressivas

Nos problemas multiobjetivos as funções são conflitantes, como no caso apresentado do modelo (1), onde a minimização dos custos de geração de energia térmica 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 objetivo e incorpora a outra nas restrições do problema através de uma canalização definida por limite inferior e superior.

No caso do problema de despacho térmico e eólico, a função custo  $(f_e + f_w)$  tornou-se a função objetivo do modelo e a função ambiental  $(f_a)$  foi incorporada às restrições deste, sendo limitada superior e inferiormente para níveis mínimos e máximos de emissão, de acordo com os  $N$  subproblemas mono-objetivos definidos em (14), para cada subintervalo  $I_k$ .

Serão encontradas, possivelmente,  $N$  soluções eficientes, determinadas considerando cada subintervalo  $I_k$ , onde  $I_k = [f_{a_k}^{\min}, f_{a_k}^{\max}] \subset I$ . O subintervalo  $I$  é definido a partir das soluções lexicográficas dos problemas (11) e (12).

Como a função ambiental é aquela que será utilizada como restrição do modelo, então considera-se o intervalo  $I$ , de possível variação desta função, tal que:  $I = [f_a^{\min}, f_a^{\max}]$ , em que:

1.  $f_a^{\min}$  é o valor obtido para  $f_a$  sobre a solução do problema (12).
2.  $f_a^{\max}$  é o valor obtido para  $f_a$  sobre a solução do problema (11).

O intervalo  $I$  é subdividido em  $N$  subintervalos igualmente espaçados,  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ , e considerando  $\Delta = \frac{f_a^{\max} - f_a^{\min}}{N}$ , temos que:

$$f_{a_k}^{\min} = f_a^{\min} + k \Delta \quad \text{e} \quad f_{a_k}^{\max} = f_a^{\min} + (k + 1) \Delta \quad (13)$$

em que:  $f_{a_0}^{\min} = f_a^{\min}$  e  $f_{a_{N-1}}^{\max} = f_a^{\max}$ .

Os valores de  $f_{a_k}^{\max}$  e  $f_{a_k}^{\min}$  representam, respectivamente, novos limites superior e inferior da função  $f_a$ , a qual será canalizada nos subproblemas mono-objetivos (14). Segundo Santos

(2016), para obter uma melhor distribuição de pontos na curva de Pareto-ótima, maior deve ser a quantidade de subintervalos do conjunto  $I$  associados à função  $f_a$ .

Com estas considerações, o conjunto de subproblemas mono-objetivos dado pelo MRCP é definido por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && f_e + f_w \\
 & \text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n P_{w_i} + \sum_{j=1}^m P_{t_j} = D \\
 & && f_{a_k}^{\min} \leq f_a \leq f_{a_k}^{\max} \\
 & && 0 \leq P_{w_i} \leq P_{w_i}^{\max} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \\
 & && P_{t_j}^{\min} \leq P_{t_j} \leq P_{t_j}^{\max} \quad \text{para } j = 1, \dots, m
 \end{aligned} \tag{14}$$

em que  $f_{a_k}^{\max}$  e  $f_{a_k}^{\min}$  estão definidas em (13).

A função objetivo do problema  $f_e + f_w$ , com  $f_e$  e  $f_w$  definidas, respectivamente em (2) e (4). As restrições devem satisfazer a demanda dos operadores térmicos e eólicos, assim como seus limites de operação, os quais foram apresentadas em (1). Em (14), acrescenta-se a restrição de canalização da função ambiental  $f_a$  definida em (3), consideradas para limites inferiores de emissão  $f_{a_k}^{\min} \in I_k$  e limites superiores de emissão  $f_{a_k}^{\max} \in I_k$ , para  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ .

O conjunto das soluções eficientes, também denominadas de soluções não-dominadas em Mietinnen (2012) e Jones e Tamiz (2010), encontradas através da resolução de cada subproblema determinam a curva de Pareto-ótima (ou curva *trade-off*).

## 4.2 Programação por metas

A Programação por metas é uma técnica de otimização multiobjetivo, que permite ao tomador de decisões definir qual o melhor critério a ser utilizado para alcançar determinados objetivos ou metas de interesse a serem alcançadas. Algumas das componentes que aparecem na formulação da Programação por metas são: a meta e as variáveis de desvio.

A meta a ser alcançada é o valor ideal estabelecido, que neste caso está sendo considerada como as soluções lexicográficas do modelo obtidas pela resolução dos problemas (11) e (12). Estas não são atingidas simultaneamente para uma mesma solução, pois as funções objetivo são conflitantes entre si para o problema (1). Neste problema a solução ideal, que define os valores ideais das metas, também são denominadas de solução utópica.

As variáveis de desvio vão determinar o quanto a solução encontrada está abaixo (desvio inferior) ou acima (desvio superior) da meta estabelecida, fazendo assim parte da função critério (função objetivo da Programação por metas).

Os pesos  $w_1$  e  $w_2$  utilizados, onde  $w_1 + w_2 = 1$  e  $w_1, w_2 \in [0, 1]$ , auxiliam na determinação das soluções de compromisso do problema, as quais pertencem à curva de Pareto-ótima. Esses pesos são definidos pelo tomador de decisão que decide para qual função será dada maior ou menor preferência.

A função critério do problema (15) tem como objetivo minimizar as variáveis de desvio inferior ou superior à meta estabelecida consideradas, respectivamente, por  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $p_1$  e  $p_2$ . Além das restrições de atendimento da demanda dos operadores térmicos e eólicos e dos limites de operação definidas em (1), foram inseridas outras restrições ao problema referentes às funções

do problema multiobjetivo  $(f_e + f_w)$  e  $(f_a)$  juntamente com a diferença entre as variáveis de desvio inferior e superior, que são consideradas para verificar a melhor proximidade em relação à metas estabelecidas, em uma restrição de igualdade. Observe que  $n_t \geq 0$  e  $p_t \geq 0$ , para  $t = \{1, 2\}$ , mas essas são complementares entre si, ou seja,  $n_t > 0$  então  $p_t = 0$  e vice-versa.

O critério utilizado para resolução desse modelo foi a técnica de Programação por metas ponderadas, definida em Jones e Tamiz (2010), o qual permite compensar diretamente todas as variáveis de desvio colocando-as em uma função critério ponderada e normalizada. A modelagem matemática do modelo (1) para a técnica de Programação por metas ponderadas é dada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimizar} && w_1 \frac{p_1}{(f_e + f_w)^{\min}} + w_2 \frac{p_2}{f_a^{\min}} \\
 &\text{Sujeito a} && \sum_{i=1}^n P_{w_i} + \sum_{j=1}^m P_{t_j} = D \\
 &&& f_e + f_w + n_1 - p_1 = (f_e + f_w)^{\min} \\
 &&& f_a + n_2 - p_2 = f_a^{\min} \\
 &&& 0 \leq P_{w_i} \leq P_{w_i}^{\max} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \\
 &&& P_{t_j}^{\min} \leq P_{t_j} \leq P_{t_j}^{\max} \quad \text{para } j = 1, \dots, m \\
 &&& n_1, n_2, p_1, p_2 \geq 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

em que:

$w_1$  e  $w_2$  são os pesos ou ponderações dos objetivos, tais que  $w_1, w_2 \in [0, 1]$  e  $w_1 + w_2 = 1$ ;

$(f_e + f_w)^{\min}$  e  $f_a^{\min}$  são as metas a serem alcançadas;

$n_1$  e  $n_2$  as variáveis de desvio inferior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos  $f_e + f_w$  e  $f_a$ ;

$p_1$  e  $p_2$  as variáveis de desvio superior à meta estabelecida, associados respectivamente as funções objetivos  $f_e + f_w$  e  $f_a$ , os quais estão sendo minimizados na função critério.

Observe que, no problema (15), a função critério prioriza as variáveis de desvio superior à meta estabelecida.

A solução encontrada pela técnica de Programação por metas está contida na curva de Pareto-ótima, e a melhor solução obtida por esta técnica, teoricamente, é aquela que está mais próxima da solução ideal. Esta solução é uma das soluções de compromisso do modelo (15) e depende dos pesos  $w_1$  e  $w_2$  considerados.

Para a resolução do modelo (1) foram realizadas simulações da geração de energia sem e com a implantação gradativas de usinas eólicas num sistema de geração. As resoluções dos subproblemas definidos em (14) e do problema (15) foram realizadas através do *software Gams* utilizando o pacote computacional *knitro*.

A aplicação do software e do pacote computacional citados à resolução dos subproblemas de otimização (14), relativo ao MRCP e do modelo (15), relativo à técnica de Programação por metas, vistos nesta seção, necessita da resolução das integrais definidas em (7) e (8), para o cálculo da função eólica  $f_w$ . Estas integrais são resolvidas através do comando *int* do *software Matlab*, o qual faz uma aproximação por séries da função de *Weibull* para determinar valores

aproximados das integrais definidas em (7) e (8), as quais não tem método exato de resolução. Os resultados obtidos são apresentados na Seção 5.

## 5 Resultados e discussões

Ao analisarmos a importância da produção eólica na redução da emissão de  $CO_2$  é necessária uma comparação da quantidade de emissão que o sistema de energia produziria sem a inserção das usinas eólicas e, posteriormente, compararmos como a inserção dessas usinas auxiliariam na redução da emissão de  $CO_2$ .

A implementação foi realizada para dois casos base 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. O despacho econômico e ambiental são representados respectivamente em dólar por hora ( $\$/h$ ) e quilograma por hora ( $Kg/h$ ). Quanto às usinas eólicas, os limitantes de velocidade do vento associados ao gerador eólico são:  $v_i = 5$  m/s,  $v_r = 15$  m/s e  $v_0 = 45$  m/s, respectivamente para, a velocidade inicial, a velocidade nominal e a velocidade de corte.

As soluções são inseridas em cada gráfico com as seguintes representações:

1. solução ideal ( $\times$ ): valores lexicográficos do problema  $((f_e + f_w)^{min}, f_a^{min})$  de acordo com as soluções do problema (11) e (12).
2. soluções eficientes ( $*$ ): soluções dos subproblemas (14) resolvidos através do MRCP, as quais determinam os valores que compõem a curva de Pareto-ótima.
3. soluções de compromisso ( $\circ$ ): soluções determinadas para o problema (15) através da técnica de Programação por metas ponderadas, determinadas a partir dos pesos  $w_1$  e  $w_2$  considerados.

Os pontos que compõem as curvas das Figuras 2 a 5 para o caso 1 e as Figuras 6 a 9 para o caso 2, são os valores encontrados para a função custo  $(f_e + f_w)$  e para a função ambiental  $(f_a)$ , que compõem a curva de Pareto-ótima, relacionados às soluções eficientes determinadas para cada subproblema mono-objetivo definido em (14), os quais foram gerados pelo MRCP 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 do modelo (15), definida por esta técnica. Podemos encontrar sobre essa curva, as soluções de compromisso determinadas com os pesos relativos às metas impostas pelo tomador de decisões. Serão apresentadas em todas as Figuras de cada caso apresentado 3 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  $(f_e + f_w)$  e o menor valor da função ambiental  $(f_a)$ , 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.

As Figuras 2 a 5 e 6 a 9, que serão respectivamente apresentadas nas Seções 5.1 e 5.2 mostram as curvas de Pareto-ótima referentes a cada situação descrita nos casos, determinadas pelo MRCP, bem como as soluções ideais do problema obtidas pela resolução dos problemas (11) e (12), e as soluções de compromisso do problema através da técnica de Programação por metas ponderadas

associadas aos pesos indicados nestas. Os subproblemas definidos pelo MRCP e pela técnica de Programação por metas ponderadas, foram solucionados pelo *software Gams* utilizando o pacote computacional *knitro*.

Foram resolvidas, para cada caso, os problemas (11) e (12), observando-se as soluções lexicográficas, dadas por  $((f_e + f_w)^{min}, f_a^{max})$  e  $((f_e + f_w)^{max}, f_a^{min})$ . A solução ideal dada por  $((f_e + f_w)^{min}, f_a^{min})$  e o conjunto  $I = [f_a^{min}, f_a^{max}]$ , utilizado para determinar as soluções eficientes do MRCP. Para a construção da curva de Pareto-ótima das Figuras 2 a 9, as soluções eficientes são obtidas considerando uma partição em  $N$  subintervalos contidos em  $I$ ,  $I_k \subset I$ , para  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ , vistas na Seção 4.1.

Os dados das usinas térmicas e eólicas para o caso 1 e caso 2 são apresentados respectivamente nas Seções 5.1 e 5.2.

## 5.1 Caso 1

Os dados dos geradores térmicos e eólicos são:

- 3 geradores térmicos cujos dados são encontrados em Gonçalves (2015).
- usina eólica 1 com 3 turbinas com potência de  $15MW$  cada totalizando,  $P_w^{max} = 45MW$
- usina eólica 2 com 2 turbinas com potência de  $8MW$  cada totalizando,  $P_w^{max} = 16MW$
- usina eólica 3 com 4 turbinas com potência de  $6MW$  cada totalizando,  $P_w^{max} = 24MW$

Foram investigados os seguintes casos:

- caso 1A: 3 geradores térmicos.
- caso 1B: 3 geradores térmicos e usina eólica 1.
- caso 1C: 3 geradores térmicos e usina eólica 1 e 2.
- caso 1D: 3 geradores térmicos + usina eólica 1, 2 e 3.
- Demanda de produção de potência gerada de  $283.4 MW$ .

Nas Figuras 2 a 5 são apresentadas 25 soluções eficientes dos subproblemas mono-objetivo (14) obtidas pelo MRCP. A Tabela 1 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo  $I$  utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 1A a 1D.

Tabela 1: Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo  $I$  para o caso 1

CASO	1A	1B	1C	1D
$((f_e + f_w)^{min}, f_a^{max})$	(8194.36 , 2578.94)	(8040.61 , 2318.79)	(7935.01 , 2230.38)	(7806.97 , 2101.79)
$((f_e + f_w)^{max}, f_a^{min})$	(8257.71 , 2173.32)	(8105.46 , 1950.07)	(8000.63 , 1875.34)	(7873.97 , 1767.81)
$((f_e + f_w)^{min}, f_a^{min})$	(8194.36 , 2173.32)	(8040.61 , 1950.07)	(7935.01 , 1875.34)	(7806.97 , 1767.81)
$I = [f_a^{min}, f_a^{max}]$	(2173.32 , 2578.94)	(1950.07 , 2318.79)	(1875.34 , 2230.38)	(1767.81 , 2101.79)

Figura 2: Curva de Pareto-ótima para o caso 1A

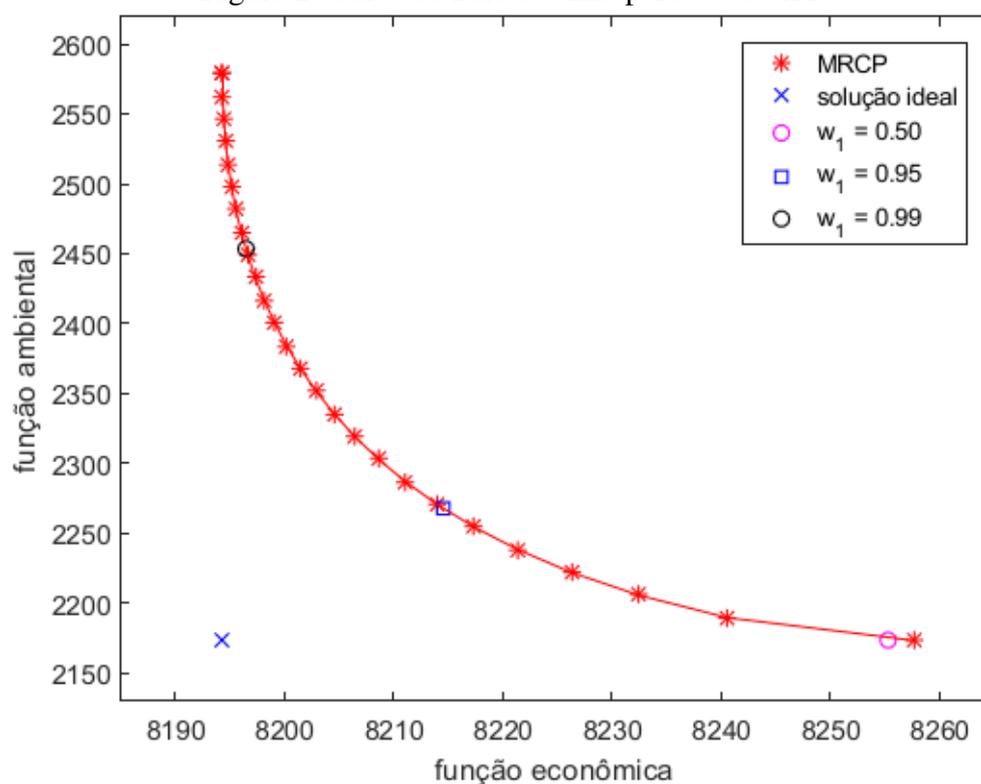


Figura 3: Curva de Pareto-ótima para o caso 1B

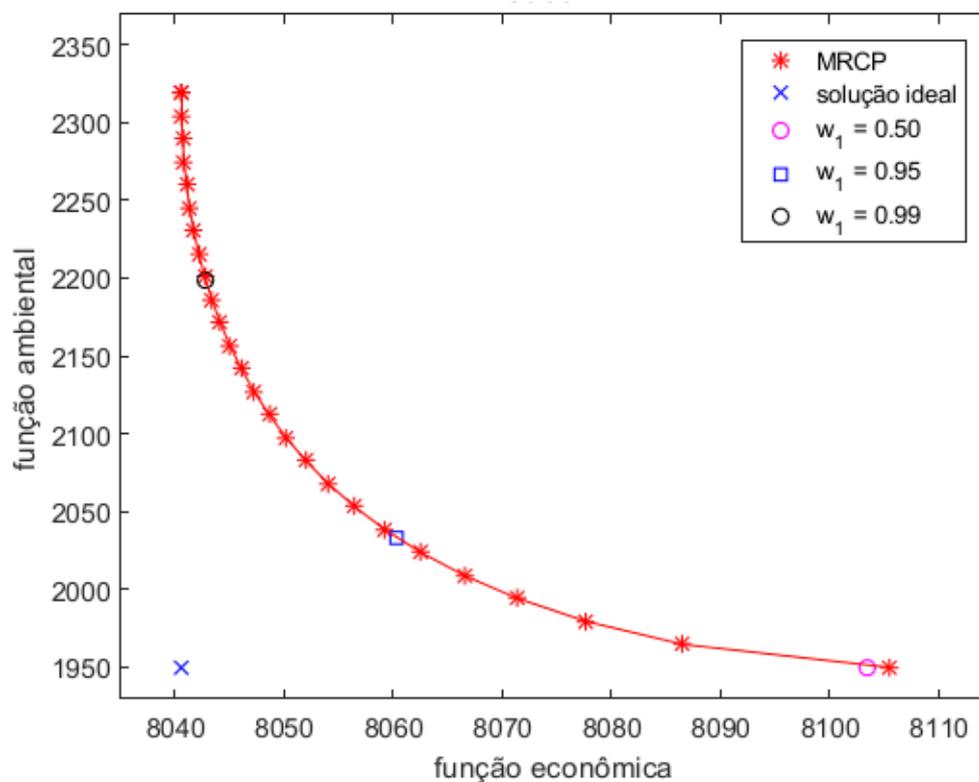


Figura 4: Curva de Pareto-ótima para o caso 1C

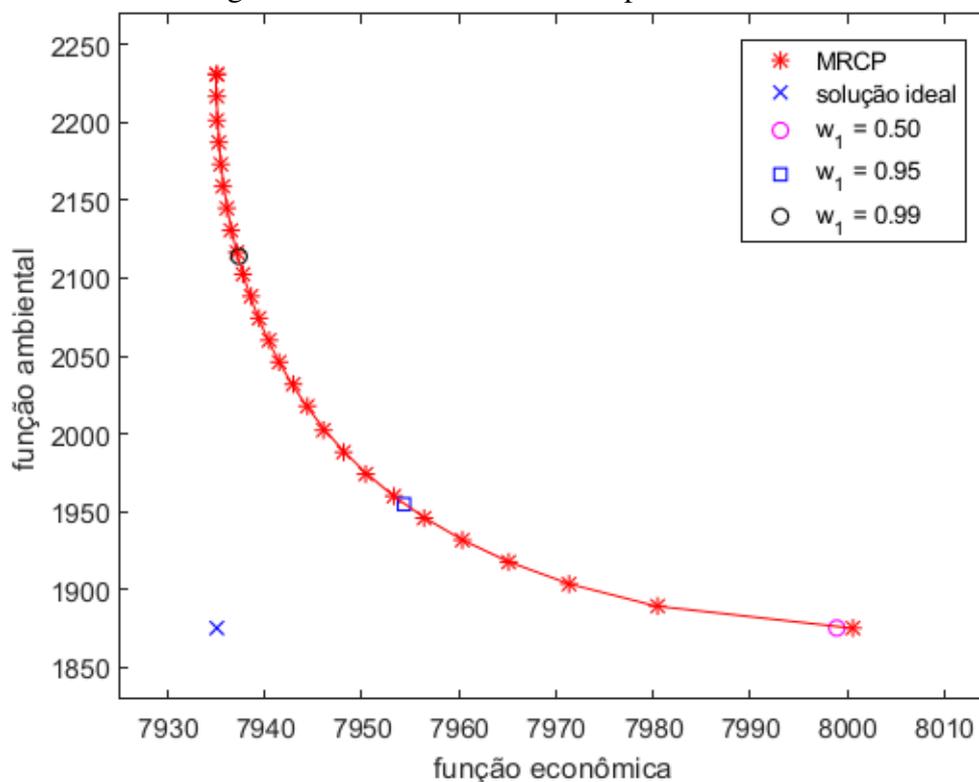
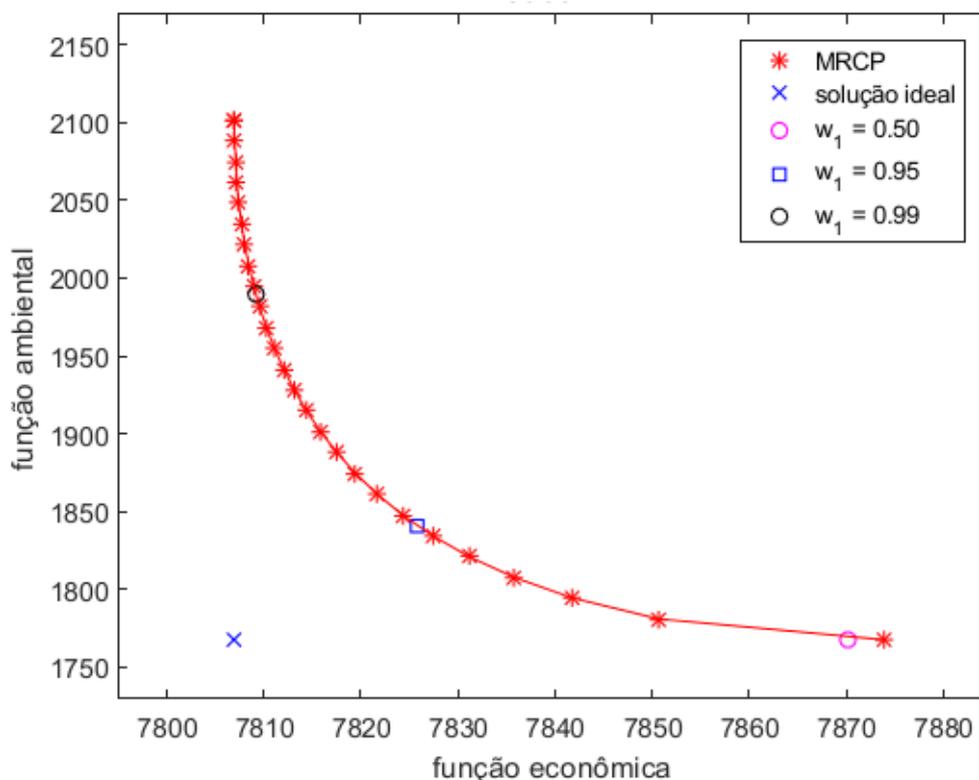


Figura 5: Curva de Pareto-ótima para o caso 1D



As soluções de compromisso representadas por ( $\circ$  e  $\square$ ) nas Figuras 2 a 5, 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 2 apresenta as soluções de compromisso encontradas utilizando os pesos  $w_1 = 0.50$ ,  $w_1 = 0.95$  e  $w_1 = 0.99$  para o Caso 1, em que  $w_2$  é calculado por  $w_2 = 1 - w_1$ .

Tabela 2: Soluções de compromisso para o caso 1

CASO	1A	1B	1C	1D
$w_1 = 0.50$				
$f_e + f_w$	8255.23	8103.56	7998.89	7870.17
$f_a$	2173.64	1950.30	1875.54	1768.38
$w_1 = 0.95$				
$f_e + f_w$	8214.63	8060.33	7954.39	7825.87
$f_a$	2267.48	2033.63	1955.09	1840.89
$w_1 = 0.99$				
$f_e + f_w$	8196.53	8042.85	7937.25	7809.21
$f_a$	2452.90	2199.13	2113.67	1989.26

Devido aos valores encontrados a solução de compromisso que está mais próxima da solução ideal, que está representada pelo peso  $w_1 = 0.95$ , que dá maior peso para a função  $f_e + f_w$ , assim dando preferência para a função econômica. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos pela Programação por metas para analisar a redução da emissão de  $CO_2$  que ocorreu com a inserção das usinas eólicas, considerando a solução eficiente e de compromisso obtida para  $w_1 = 0.95$ , vista na Tabela 3 e representada nas Figuras 2 a 5 com o símbolo “□”.

Tabela 3: Valores do custo e emissão encontrados pela Programação por metas no caso 1

CASO	1A	1B	1C	1D
$f_e + f_w$	8214.63	8060.33	7954.39	7854.39
$f_a$	2267.48	2033.63	1955.09	1840.89
redução da emissão de $CO_2$	-	10.31%	13.78%	18.81%

Foram evitados de ser emitidos, respectivamente, 233.85  $Kg/h$ , 312.39  $Kg/h$  e 426.59  $Kg/h$  para os casos 1B, 1C e 1D, o que de acordo com a Tabela 3, são os respectivos valores associados à redução da emissão percentual de  $CO_2$  dados por 10.31%, 13.78% e 18.81%. Sendo assim mostrou-se que a inserção das unidades eólicas no sistema de energia tem uma influência significativa na redução da emissão de  $CO_2$ , para o atendimento das demandas de produção de energia consideradas.

Além de melhorar o impacto ambiental referente à emissão de poluentes, a inserção das usinas eólicas no sistema de geração de energia trouxe uma redução nos custos operacionais de, respectivamente, 1.88% (154.30  $\$/h$ ), 3.17% (260.24  $\$/h$ ) e 4.73% (388.76  $\$/h$ ) nos casos 1B, 1C e 1D.

## 5.2 Caso 2

Os dados dos geradores térmicos e eólicos são:

- 10 geradores térmicos cujos dados são encontrados em Gonçalves (2015).
- usina eólica 1 com 12 turbinas com potência de 8MW cada totalizando,  $P_w^{max} = 96MW$
- usina eólica 2 com 8 turbinas com potência de 15MW cada totalizando,  $P_w^{max} = 120MW$
- usina eólica 3 com 7 turbinas com potência de 12MW cada totalizando,  $P_w^{max} = 84MW$

Foram investigados os seguintes casos:

- caso 2A: 10 geradores térmicos.
- caso 2B: 10 geradores térmicos e usina eólica 1.
- caso 2C: 10 geradores térmicos e usina eólica 1 e 2.
- caso 2D: 10 geradores térmicos + usina eólica 1, 2 e 3.
- Demanda de produção de potência gerada de 2000 MW.

Nas Figuras 6 a 9 são apresentadas 25 soluções eficientes dos subproblemas mono-objetivo (14) obtidas pelo MRCP. A Tabela 4 apresenta as soluções lexicográficas, ideal e o intervalo  $I$  utilizados para determinar as soluções eficientes dos casos 2A a 2D:

Tabela 4: Soluções lexicográficas, ideal e o intervalo  $I$  para o caso 2

CASO	2A	2B	2C	2D
$((f_e + f_w)^{min}, f_a^{max})$	(105957.80 , 4083.03)	(101452.37 , 3768.16)	(96415.93 , 3397.26)	(92657.04 , 3146.27)
$((f_e + f_w)^{max}, f_a^{min})$	(111606.06 , 3568.13)	(107481.64 , 3282.74)	(102814.24 , 2958.68)	(99280.75 , 2753.43)
$((f_e + f_w)^{min}, f_a^{min})$	(105957.80 , 3568.13)	(101452.37 , 3282.74)	(96415.93 , 2958.68)	(92657.04 , 2753.43)
$I = [f_a^{min}, f_a^{max}]$	(3568.13 , 4083.03)	(3282.74 , 3768.16)	(2958.68 , 3397.26)	(2753.43 , 3146.27)

As soluções de compromisso representadas foram encontradas de forma análoga ao caso 1. Na Tabela 5 são apresentadas as soluções de compromisso obtidas para os pesos  $w_1 = 0.50$ ,  $w_1 = 0.70$  e  $w_1 = 0.90$ , representadas nas Figuras 6 a 9.

Tabela 5: Soluções de compromisso para o caso 2

CASO	2A	2B	2C	2D
$w_1 = 0.50$				
$f_e + f_w$	110125.35	105533.29	100256.98	96082.17
$f_a$	3604.41	3322.43	2997.61	2794.23
$w_1 = 0.70$				
$f_e + f_w$	107920.74	103343.90	98098.84	94166.12
$f_a$	3724.15	3434.99	3099.05	2881.57
$w_1 = 0.90$				
$f_e + f_w$	106158.00	101669.41	94204.49	92806.35
$f_a$	3963.53	3660.10	3290.54	3050.90

Figura 6: Curva de Pareto-ótima para o caso 2A

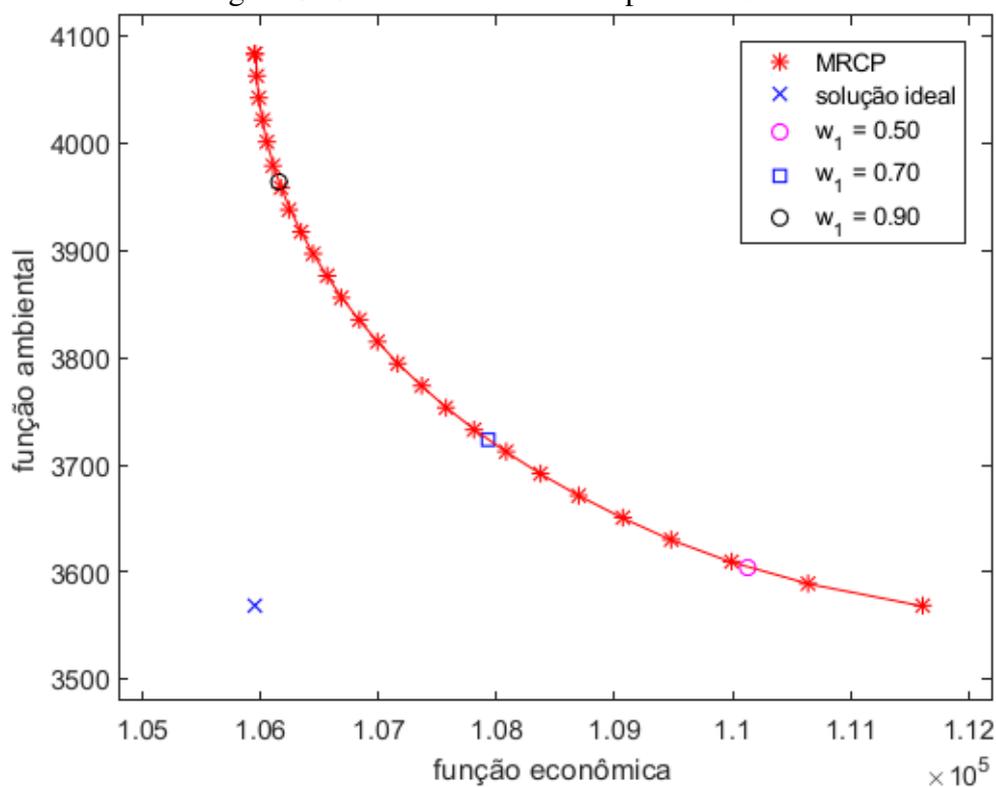


Figura 7: Curva de Pareto-ótima para o caso 2B

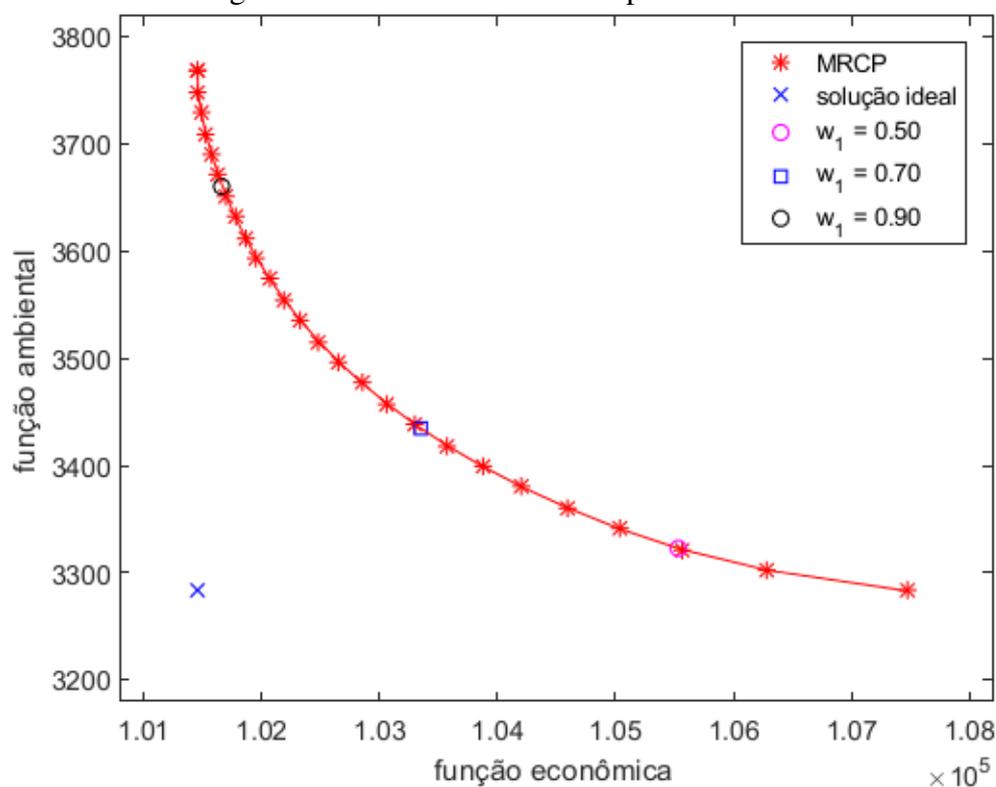


Figura 8: Curva de Pareto-ótima para o caso 2C

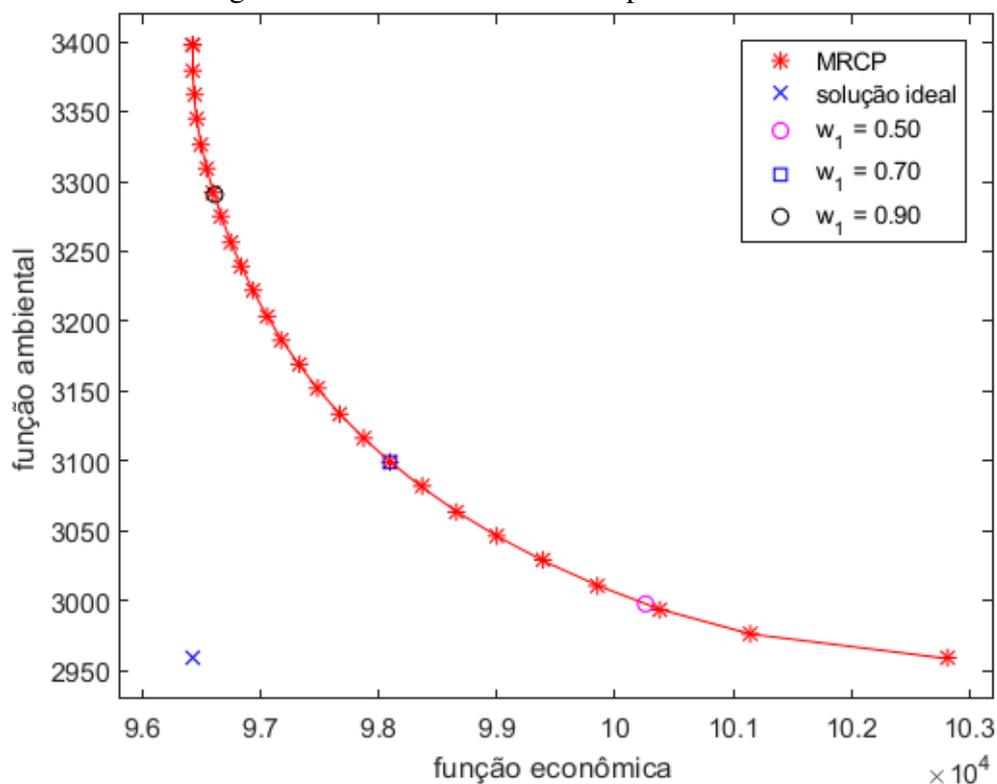
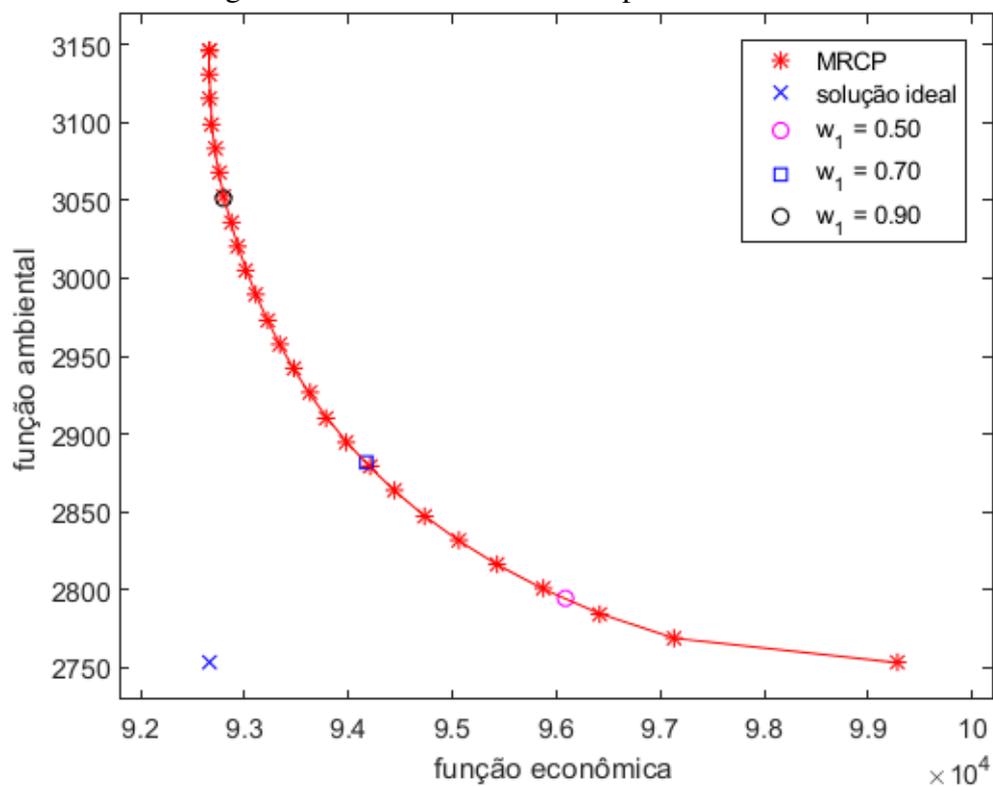


Figura 9: Curva de Pareto-ótima para o caso 2D



Por estar mais próxima da solução ideal, a solução de compromisso dada por  $w_1 = 0.70$ , foi escolhida pelo tomador de decisão como a solução do problema através da técnica de Programação por metas ponderada, dando preferência para a função econômica, assim maior peso para a função  $f_e + f_w$ , como no Caso 1. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos pela técnica de Programação por metas ponderadas para analisar a redução da emissão de  $CO_2$  que ocorreu com a inserção das usinas eólicas.

Tabela 6: Valores do custo e emissão encontrados pela Programação por metas no caso 2

CASO	2A	2B	2C	2D
$f_e + f_w$	107920.74	103343.90	98098.84	94166.12
$f_a$	3724.15	3434.99	3099.05	2881.57
redução da emissão de $CO_2$	-	7.76%	16.79%	22.62%

De acordo com os valores obtidos na Tabela 6, da mesma forma que ocorreu no caso 1, a inserção das usinas eólicas reduziu a emissão de  $CO_2$ , deixando de ser emitidos 289.16  $Kg/h$ , 625.10  $Kg/h$  e 842.58  $Kg/h$  correspondentes aos percentual de 7.76%, 16.79% e 22.62%, respectivamente, aos casos 2B, 2C e 2D. Com relação aos custos operacionais a redução nos casos 2B, 2C e 2D foi de 4.24% (4576.84  $\$/h$ ), 9.10% (9821.90  $\$/h$ ) e 12.75% (13754.62  $\$/h$ ), respectivamente.

Nos dois casos apresentados, a solução de compromisso que estava mais próxima da solução ideal foi aquela em que o peso  $w_1$  deu preferência para a função econômica, isto é, para a função  $f_e + f_w$ . Observe que, a inserção e produção da energia eólica, considerada no PMDEATE, influencia na redução do impacto ambiental associado à produção da geração de energia térmica. Além disso, dar importância à função econômica  $f_e + f_w$  na técnica de Programação por metas ponderadas mostra que, além de contribuir na questão ambiental, também reduz significativamente os custos de produção das unidades térmicas e eólicas, como mostrado nas Tabelas 3 e 6. Nos dois casos abordados, todos os geradores eólicos considerados entraram em operação de produção de potência e contribuíram para a redução de custos de produção e impactos ambientais do PMDEATE. A metodologia determinística utilizada à resolução do PMDEATE obteve bom desempenho, como mostra os resultados obtidos aos dois casos abordados. Assim, os 2 objetivos propostos neste trabalho foram alcançados com sucesso.

## 6 Conclusões

Com a inserção das usinas eólicas no sistema de geração de energia concluímos que elas podem auxiliar muito na redução da emissão de  $CO_2$  e nos custos operacionais para a produção de energia, para um sistema termo-eólico. O Brasil é um país que tem ampla capacidade em



explorar a produção da energia eólica por causa da sua diversidade climática e velocidades de vento diferentes em cada região. De acordo com agências reguladoras do país novas unidades geradoras de energia serão instaladas aumentando significativamente a produção eólica na matriz energética brasileira.

Os resultados apresentados mostram a importância e a viabilidade de se explorar essa fonte de energia no país e como esse estudo pode ser realizado em grande escala. Para trabalhos futuros o problema multiobjetivo será definido a partir de 3 funções objetivos consideradas separadamente: de custo dos combustíveis, de redução da emissão e de custo de produção eólica.

Novas técnicas de Programação por metas serão utilizadas em conjunto com o método de restrições canalizadas progressivas para analisar o compromisso entre os objetivos propostos, determinando metas a serem alcançadas para cada um deles, considerando-se separadamente e concomitantemente esses objetivos em (1).

## 7 Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). Boletim Anual de Geração Eólica 2016. 2017. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 11 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). Dados mensais - Fevereiro de 2018. 2018. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acesso em: 11 set. 2018.

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

EL-HAWARY, M. E.; EL-HAWARY, F.; MBAMALU, G. A. N. **NO<sub>x</sub> 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.

GABRIEL FILHO, L. R. A. et al. 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](https://www.gams.com/latest/docs/S_KNITRO.html#KNITRO_SUMMARY_OF_KNITRO_OPTIONS)>. Acesso em: 11 set. 2018.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global wind statistics 2017. 2018. Disponível em: <[https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC\\_PRstats2017\\_EN-003\\_FINAL.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf)>. Acesso em: 11 set. 2018.



GONÇALVES, E. **Métodos híbridos de pontos interiores/exteriores e de aproximantes de funções em problemas multiobjectivo de despacho econômico e ambiental**. 2015. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2015.

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.

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

MARTINS, A. C. S.; BALBO, A. R.; JONES, D. A modelagem matemática de um problema de despacho térmico e eólico e sua influência na redução da emissão de  $CO_2$ . In: ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 5., 2018, Bauru. **Caderno de trabalhos completos e resumos...** Bauru: Unesp, Faculdade de Ciências, 2018. p 24-30. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1-8SZZnioKApdmQG6BaOTltJARzfwAB9P/view>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

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.

QU, B. Y. et al. Economic emission dispatch problems with stochastic wind power using summation based multi-objective evolutionary algorithm. **Information Sciences**, v. 351, p. 48-66, 2016.

ROCHA, P. A. C. et al. 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.

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.



---

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

ZHANG, X. et al. GPNBI inspired MOSDE for electric power dispatch considering wind energy penetration. **Energy**, v. 144, p. 404-419, 2018.