



ANÁLISE MULTICRITÉRIO DO PROBLEMA DE DESPACHO ECONÔMICO E AMBIENTAL SOB CONDIÇÕES DE INCERTEZA

Miguel Monteiro Costa*¹, Lucas de Souza Batista²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

²Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo – Sistemas termoeletrônicos eficientes de geração de energia elétrica visam atender a demanda ao menor custo de geração possível, custo este associado principalmente ao consumo de combustível exigido por estas usinas. Neste tipo de geração, também está presente a emissão de poluentes. Este cenário configura o problema de Despacho Econômico e Ambiental (DEA), no qual visa-se minimizar simultaneamente dois objetivos conflitantes: o custo operacional e a emissão de poluentes, presentes na operação destas usinas. Neste contexto, este trabalho desenvolve uma ferramenta robusta de análise multicritério, envolvendo otimização multiobjetivo e tomada de decisão assistida, de modo a indicar uma solução adequada ao problema de despacho econômico e ambiental, dadas as preferências do projetista e condições de incerteza. As possíveis soluções para o problema são avaliadas em diversos cenários de demanda, considerando as incertezas presentes na mesma. Uma modelagem *fuzzy* é proposta para as funções objetivo e restrições. Os resultados sugerem que a análise multicritério possibilitou uma tomada de decisão mais assertiva e atrativa, de acordo com os objetivos e critérios adotados.

Palavras-Chave – despacho econômico e ambiental, incertezas na demanda, otimização multiobjetivo fuzzy, tomada de decisão assistida.

MULTICRITERIA ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL ECONOMIC DISPATCH UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Abstract - Efficient thermoelectric power generation systems aim to meet demand at the lowest possible generation cost, which is mainly associated to the fuel consumption demanded by these plants. In this type of generation, the emission of pollutants is also present. This scenario configures the Economic and Environmental Dispatch (EED) problem, in which it aims to simultaneously minimize two conflicting objectives: the operational cost and the emission of pollutants, both present in the operation of these plants. In this context, this

work develops a robust multicriteria analysis tool, involving multiobjective optimization and multicriteria decision aid, in order to indicate an adequate solution to the problem of economic and environmental dispatch, given the preferences of the designer and uncertainty conditions. Some possible solutions to the problem are evaluated in several scenarios of demand, considering the uncertainty conditions. A fuzzy modeling is proposed for objective functions and constraints. The results obtained suggest that the multicriteria analysis allowed a more assertive and attractive decision making, according to the objectives and criteria adopted.

Keywords - environmental economic dispatch, load uncertainty, fuzzy multiobjective optimization, multicriteria decision aid.

I. INTRODUÇÃO

Assegurar o atendimento à demanda é uma das prioridades da operação do sistema elétrico. Neste sentido, minimizar o custo operacional se tornou seu principal objetivo. Este processo recebe o nome de Despacho Econômico (DE), que visa alocar a potência ativa a ser gerada para cada unidade, levando em consideração o custo de cada gerador, bem como suas restrições de operação [1].

No contexto da geração de energia por usinas termoeletrônicas, está presente o custo operacional, devido às atividades de manutenção, operação e principalmente consumo de combustível, bem como a emissão de grandes quantidades de poluentes. Assim, o problema de Despacho Econômico e Ambiental (DEA) visa alocar a geração de potência ativa de modo a minimizar dois objetivos conflitantes: custo operacional e emissão de poluentes [2-7].

Na literatura há várias formas de se abordar o problema de despacho de energia em sistemas termoeletrônicos. Em [1], o problema de Despacho Econômico (DE) é tratado em sua forma singular, considerando apenas a minimização do custo operacional. A pesquisa aborda características que ocorrem durante a geração de energia, como a presença de zonas de operação proibidas, múltiplo combustível e o efeito de ponto de válvula, tornando o problema não convexo e descontínuo.

*miguelmonteirorp@yahoo.com.br

Alguns trabalhos consideram outros critérios, além somente do custo envolvido, mas ainda tratam o problema de forma escalar (mono-objetivo), realizando uma soma ponderada entre os diferentes objetivos. Nesse sentido, os trabalhos presentes em [2-4] definem uma função objetivo formada pela soma ponderada entre a função de custo operacional e a função de emissão de poluentes.

A modelagem mais comumente adotada aborda o DEA como um problema verdadeiramente multiobjetivo, definindo os critérios de custo e emissão de poluentes como duas funções objetivo independentes para o problema [5-7,12,13]. Tanto em [6] como em [13], os autores consideram a restrição de capacidade máxima de carregamento das linhas de transmissão. No trabalho presente em [12], são inseridas penalidades tanto na função de custo operacional como na função de emissão de poluentes, referentes a incertezas na previsão de demanda considerada.

Os trabalhos [8,9,14] formulam o DEA com três objetivos de minimização conflitantes: custo operacional, emissão de poluentes e perdas de potência ativa nas linhas da rede. A pesquisa em [10] considera, além dos objetivos relacionados ao custo operacional e à emissão de poluentes, a minimização dos desvios de tensão nas barras da rede, usando a teoria de conjuntos *fuzzy* para modelar incertezas nas funções objetivo. Por fim, o trabalho em [15], além de considerar as funções de custo e emissão de poluentes, modela como terceiro objetivo o tempo de resposta das usinas frente ao comando de despacho, i.e., o tempo mínimo de ajuste de carga.

No contexto do problema em foco, o presente trabalho vem complementar a literatura especializada ao desenvolver uma ferramenta integrada para a solução do DEA. De forma geral, emprega uma modelagem multiobjetivo *fuzzy*, considerando a minimização de custos e emissão de poluentes; modela critérios adicionais que possibilitam mensurar características relevantes das soluções candidatas do problema, tais como sensibilidade e robustez às estocasticidades do DEA; e desenvolve uma ferramenta de análise multicritério intuitiva, que permite uma comparação clara e objetiva entre soluções candidatas, assistindo assim o processo de tomada de decisão. Os resultados obtidos indicam que estas características sustentam uma tomada de decisão mais sólida e atrativa, de acordo com os critérios adotados.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: A Seção II apresenta a modelagem comumente empregada pela literatura para o problema de DEA e também a modelagem proposta neste trabalho. As Seções III e IV apresentam, respectivamente, o método de otimização multiobjetivo e a abordagem de auxílio à tomada de decisão sugeridos neste trabalho. Na Seção V são apresentados os resultados, juntamente com a análise multicritério proposta. Por fim, as conclusões são abordadas na Seção VI.

II. MODELAGEM DO PROBLEMA DE DESPACHO ECONÔMICO E AMBIENTAL

Em problemas de otimização multiobjetivo visa-se a otimização simultânea de dois ou mais objetivos conflitantes. Problemas multiobjetivo de minimização podem ser definidos por [20]:

$$\min_x \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \quad (1)$$

$$s. a. \begin{cases} g_j(x) \leq 0, & j = 1, \dots, q \\ h_j(x) = 0, & j = q + 1, \dots, p \end{cases} \quad (2) \\ x \in \mathbb{R}^n$$

em que f_i consiste na i -ésima função objetivo do problema, x é o vetor de variáveis de otimização, m é a quantidade de objetivos, g_j e h_j são restrições do problema e n consiste no número de variáveis de otimização do problema.

Neste problema visa-se encontrar não apenas uma, mas sim um conjunto de soluções ditas não dominadas. O conceito de dominância estabelece que: uma solução ‘ u ’ domina uma solução ‘ v ’ se e somente se ‘ u ’ é melhor ou igual a ‘ v ’ em todos os objetivos do problema e existe ao menos um objetivo em que ‘ u ’ é estritamente melhor que ‘ v ’ [20].

Conforme discutido na seção anterior, muitos trabalhos na literatura modelam o problema de DEA com dois objetivos: minimização do custo de operação e emissão de poluentes, com suas devidas restrições. Neste trabalho, esta abordagem é nomeada “Despacho Econômico e Ambiental”, a qual é apresentada no decorrer desta seção. Adicionalmente, define-se também a modelagem proposta neste trabalho, que, a partir de conceitos da teoria de conjuntos *fuzzy* [16], proporciona um modelo que viabiliza a inserção de incertezas inerentes ao problema. Esta última é chamada de “Despacho Econômico e Ambiental Fuzzy”.

A. Despacho Econômico e Ambiental

A função objetivo para o custo operacional em usinas termoeletricas pode ser definida da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } F_t(P) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (3)$$

em que F_t consiste na função de custo total de operação do sistema, F_i é a função de custo da i -ésima termoeletrica, P_i é a potência ativa gerada pela i -ésima termoeletrica e N consiste no número total de termoeletricas do sistema.

Em (3), a função de custo total é dada pela soma das funções de custo de cada termoeletrica:

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (4)$$

em que a_i , b_i , c_i são os coeficientes da função de custo de operação da i -ésima termoeletrica.

Alguns modelos consideram o efeito de ponto de válvula na função de custo de cada usina [1,2,4,7,9,12,14]. O mesmo é causado devido à realização do controle de temperatura interna da caldeira e da turbina, uma vez que, no momento em que a válvula é aberta, há perda de temperatura/vapor que, conseqüentemente, afeta o consumo de combustível. Este incremento momentâneo no custo de operação eleva o grau de não linearidade da função, podendo ser expresso como uma função senoidal adicionada à função quadrática do custo operativo, conforme mostrado em (5):

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + \left| d_i \text{sen} \left(e_i (P_i^{\text{min}} - P_i) \right) \right| \quad (5)$$

em que P_i^{min} consiste no valor mínimo de potência ativa a ser produzida pela i -ésima termoeletrica e d_i e e_i são os coeficientes que representam o efeito do ponto de válvula para a i -ésima termoeletrica.

Já a função objetivo para a emissão de poluentes pode ser modelada conforme (6) [5-7,12,14,15]:

$$\text{Minimizar } E(P) = \sum_{i=1}^N [10^{-2}(\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) + \zeta_i \exp(\varphi_i P_i)] \quad (6)$$

em que $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \varphi_i$ são os coeficientes da função de emissão de poluentes da i-ésima usina termoeétrica.

A seguir são descritas as restrições comumente presentes no problema de DEA.

- Restrição do balanço de potência ativa [1-7,9,12,14]: A potência ativa total produzida deve se equivaler a soma da potência ativa demandada com as perdas de potência ativa nas linhas da rede, conforme (7):

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_{loss} = 0 \quad (7)$$

em que P_D é a potência ativa total demandada e P_{loss} consiste no total de perdas de potência ativa nas linhas.

- Restrição de limites operacionais [1-9,12,14,15]: Representam as restrições de operação das usinas. Estas limitações estão associadas à relação entre o combustível utilizado e as limitações da caldeira e da turbina:

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max}, \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

em que P_i^{max} consiste no valor máximo de potência ativa a ser produzida pela i-ésima termoeétrica.

O total de perdas de potência ativa apresentado por uma rede de transmissão pode ser obtido através da aplicação de um método de fluxo de potência. Uma maneira alternativa de se obter estas perdas, de forma aproximada, é com base na utilização dos coeficientes de perdas de Kron [5,14,17]:

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (9)$$

em que B_{ij}, B_{0i}, B_{00} são os coeficientes de perdas da rede de transmissão.

B. Despacho Econômico e Ambiental Fuzzy

Com a finalidade de incorporar as incertezas na demanda, inerentes ao problema, conceitos da teoria de conjuntos *fuzzy* são incorporados ao modelo apresentado.

As funções de pertinência para as funções objetivo foram definidas usando o formato trapezoidal:

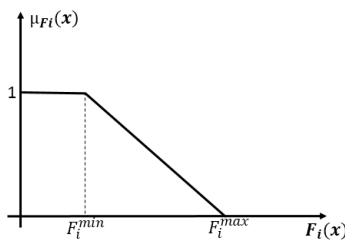
$$\mu_{F_i}(x) = \frac{F_i^{max} - F_i(x)}{F_i^{max} - F_i^{min}}, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (10)$$

em que $\mu_{F_i}(x)$ é a função de pertinência relacionada ao conjunto *fuzzy* do i-ésimo objetivo e F_i^{max} e F_i^{min} consistem no máximo e no mínimo valores do i-ésimo objetivo.

A Figura 1 apresenta estas funções de pertinência, e nota-se que quanto menor o valor da função objetivo, maior será o seu respectivo valor de pertinência. Assim, minimizar $F_i(x)$ implica em maximizar $\mu_{F_i}(x)$.

De maneira similar, os conjuntos *fuzzy* equivalentes para as restrições são definidos da maneira a seguir:

Figura 1: Função de pertinência do i-ésimo objetivo.



$$\mu_{r_j}(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \text{ é factível na } j\text{-ésima restrição} \\ \frac{V_j^{max} - V_j(x)}{V_j^{max} - V_j^{min}}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_j(x) = \begin{cases} \max(0, g_j(x)) & \text{para restrições de ' } \leq \text{'} \\ |h_j(x)| & \text{para restrições de ' } = \text{'} \end{cases} \quad (12)$$

em que $\mu_{r_j}(x)$ é a função de pertinência relacionada ao conjunto *fuzzy* da j-ésima restrição e V_j^{max} e V_j^{min} consistem no máximo e no mínimo valores da j-ésima restrição.

Com base na formulação descrita anteriormente, o problema multiobjetivo de minimização descrito por (1)-(2) pode ser modelado como:

$$\max_x \begin{cases} \hat{F}_1(x) = T(\mu_{F_1}(x), T(\mu_{r_j}(x): j = 1, \dots, p)) \\ \vdots \\ \hat{F}_m(x) = T(\mu_{F_m}(x), T(\mu_{r_j}(x): j = 1, \dots, p)) \end{cases} \quad (13)$$

Conforme (13), visa-se maximizar, para cada objetivo do problema, a interseção nebulosa entre o conjunto *fuzzy* de cada objetivo e os conjuntos *fuzzy* de todas as restrições do problema. Neste trabalho usou-se uma T-norma mínimo.

III. NONDOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM II

Neste trabalho empregou-se o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II) [18] para resolver o problema de Despacho Econômico e Ambiental Fuzzy proposto.

Publicado por Deb et al. [18], o NSGA-II é um algoritmo genético multiobjetivo baseado em um ordenamento elitista de dominância, que possui um eficiente procedimento para classificação das soluções em fronteiras não dominadas, chamado *Fast Nondominated Sorting*. O NSGA-II apresenta também um operador de nicho chamado *Crowding Distance*, que visa manter a diversidade entre as soluções. Para uma descrição completa do método sugere-se a leitura de [18].

IV. MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

Problemas práticos de planejamento envolvem diversos objetivos conflitantes e variados critérios relevantes ao problema analisado. Nesse contexto, frequentemente aplica-se uma abordagem de auxílio à tomada de decisão para assistir o processo de escolha de uma ação final de projeto. Neste trabalho são empregados dois destes métodos, os quais são descritos a seguir. O primeiro representa uma estratégia frequentemente usada na literatura no contexto do problema abordado [6,7,9]. A segunda abordagem é popular na área de Tomada da Decisão [19] e representa a sugestão dos autores deste trabalho para a análise do DEA.

A. Método de Tomada de Decisão baseado em Lógica Fuzzy

Um dos métodos de tomada de decisão aqui empregado retorna a solução de melhor compromisso entre as funções objetivo usando um mecanismo baseado em lógica *fuzzy* [6,7,9]. A partir da melhor fronteira de soluções não dominadas, inicialmente define-se uma função de pertinência com base nos valores máximos e mínimos obtidos pelas soluções desta fronteira, conforme a seguir:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & \text{se } F_i \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & \text{se } F_i^{\min} < F_i < F_i^{\max} \\ 0 & \text{se } F_i \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

onde μ_i é o valor de pertinência da i -ésima solução.

Para cada solução não dominada k , o valor de pertinência normalizado $\mu[k]$ é calculado como:

$$\mu[k] = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i[k]}{\sum_{j=1}^{n_{nd}} \sum_{i=1}^m \mu_i[j]} \quad (15)$$

onde $\mu[k]$ é o valor de pertinência normalizado da k -ésima solução e n_{nd} é a quantidade de soluções não dominadas.

B. Técnica de Ordem de Preferência por Semelhança a uma Solução Ideal

A Técnica de Ordem de Preferência por Semelhança a uma Solução Ideal - TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) [19] tem como princípio básico escolher uma alternativa que esteja o mais próximo possível da solução ideal positiva (PIS) e o mais distante possível da solução ideal negativa (NIS). A solução PIS é uma solução utópica formada pelos melhores valores alcançados pelas alternativas, enquanto o NIS é uma solução anti-utópica proveniente dos piores valores obtidos.

O método constrói inicialmente uma matriz de decisão, onde as linhas referem-se às soluções e as colunas aos critérios, i.e., a i -ésima linha apresenta a avaliação da i -ésima solução em cada um dos n_c critérios:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n_c} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n_s1} & d_{n_s2} & \dots & d_{n_s n_c} \end{bmatrix} \quad (16)$$

em que n_s é a quantidade de soluções e d_{ij} quantifica o desempenho da i -ésima solução no j -ésimo critério.

A partir da matriz de decisão D , obtém-se a matriz de decisão normalizada, R , conforme (17).

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_s} d_{ij}^2}} \quad (17)$$

O TOPSIS requer uma definição dos pesos de cada critério, conforme (18). Quanto maior o peso do critério, maior a sua importância no contexto do problema. Obtém-se então, a matriz de decisão normalizada ponderada, V , conforme (19).

$$w = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_{n_c}], \quad w_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^{n_c} w_j = 1 \quad (18)$$

$$v_{ij} = w_j * r_{ij} \quad (19)$$

em que w_j corresponde ao fator de peso do j -ésimo critério.

No passo seguinte, são obtidas a Solução Ideal Positiva (PIS, A^+) e a Solução Ideal Negativa (PIS, A^-):

$$A^+ = \left\{ (\max_i v_{ij} | j \in J'); (\min_i v_{ij} | j \in J'') \right\} \quad (20)$$

$$A^- = \left\{ (\min_i v_{ij} | j \in J'); (\max_i v_{ij} | j \in J'') \right\} \quad (21)$$

em que J' consiste no conjunto dos critérios de benefício e J'' é o conjunto dos critérios de custo.

Para cada solução i , calcula-se sua distância Euclidiana em relação à PIS e à NIS, da seguinte maneira:

$$S_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_c} (v_{ij} - v_{j+})^2} \quad (22)$$

$$S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_c} (v_{ij} - v_{j-})^2} \quad (23)$$

em que S_{i+} é a distância Euclidiana em relação à PIS e S_{i-} é a Distância Euclidiana em relação à NIS.

Por fim, para cada solução calcula-se o coeficiente de aproximação, CC_i , que corresponde ao seu desempenho global:

$$CC_i = \frac{S_{i-}}{S_{i+} + S_{i-}} \quad (24)$$

O método selecionará a solução que apresentar maior coeficiente de aproximação.

C. Critérios Adotados

Para auxiliar no processo de tomada de decisão, considerou-se dois critérios adicionais além das funções objetivo. Um deles representa o total de perdas de potência ativa nas linhas, que pode ser facilmente obtida para cada solução.

O outro critério mensura uma estimativa das violações de balanço de potência ativa a partir de um conjunto de prováveis cenários de demanda. Devido às incertezas inerentes ao valor de demanda, são propostos diversos outros cenários de demanda, considerando-se as prováveis oscilações: Assumindo uma distribuição normal com média igual ao valor de demanda nominal especificada para o problema, produziu-se outros 1000 valores de demanda com desvios de até 2% em relação à média. Assim, cada solução candidata foi submetida a estes novos cenários de demanda, e se somou o total de violações que cada solução apresentou para a restrição de balanço de potência ativa, expressa por (7).

V. RESULTADOS

Para validar a formulação proposta, a mesma foi aplicada a um sistema termoeletrico [6] de geração de energia elétrica composto por 30 barras, sendo 6 destas barras usinas geradoras, 41 linhas de transmissão, demanda de 2.834 p.u. e potência base de 100MVA. A Tabela I apresenta os coeficientes das funções de custo e emissão de poluentes, bem como os limites operacionais destas usinas.

Para a estimação das perdas de potência ativa nas linhas do sistema elétrico, usou-se a aproximação por coeficientes de perdas de Kron [5,14,17], cujos parâmetros são dados a seguir.

$$B = \begin{pmatrix} 0,1382 & -0,299 & 0,0044 & -0,0022 & -0,0010 & -0,0008 \\ -0,0299 & 0,0487 & -0,0025 & 0,0004 & 0,0016 & 0,0041 \\ 0,0044 & -0,0025 & 0,0182 & -0,0070 & -0,0066 & -0,0066 \\ -0,0022 & 0,0004 & -0,0070 & 0,0137 & 0,0050 & 0,0033 \\ -0,0011 & 0,0016 & -0,0066 & 0,0050 & 0,0109 & 0,0005 \\ -0,0008 & 0,0041 & -0,0066 & 0,0033 & 0,0005 & 0,0244 \end{pmatrix} \quad (25)$$

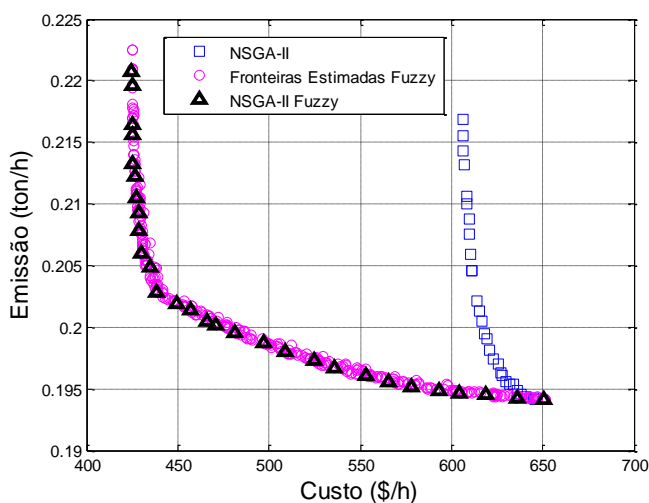
$$B_0 = (-0,0107 \ 0,0060 \ -0,0017 \ 0,0009 \ 0,0002 \ 0,0030) \quad (26)$$

$$B_{00} = 9,857e - 4 \quad (27)$$

Os parâmetros adotados no NSGA-II foram: tamanho da população igual a 30, $p_c = 1.0$, $p_m = 1/n$, $\eta_c = 20$ e $\eta_m =$

20 [18]. A Figura 2 apresenta as fronteiras de soluções não dominadas obtidas. A curva com quadrados foi obtida pelo método NSGA-II sem a incorporação da modelagem *fuzzy*, tratando a restrição de igualdade presente em (7) pelo método de penalidades. Foram utilizadas 100.000 avaliações das funções objetivo. As curvas com círculos e triângulos foram obtidas empregando-se a modelagem *fuzzy*, onde a primeira é resultado de dez execuções do NSGA-II, e a curva com triângulos consiste nas 30 melhores soluções obtidas, selecionadas pelos critérios de dominância e *Crowding Distance*. Em cada execução foram utilizadas 50.000 avaliações das funções objetivo. Nota-se que a partir das 10 execuções da abordagem proposta, as fronteiras obtidas (círculos) são muito próximas, o que sugere uma boa capacidade de reprodutibilidade dos resultados pelo método proposto.

Figura 2: Soluções não dominadas obtidas.



Como apenas soluções de interesse prático fazem sentido no processo de decisão, parte das 30 soluções finais foram eliminadas. De forma geral, foram descartadas soluções que apresentaram custo operacional acima de 520 \$/h, emissão de poluentes acima de 0,21 toneladas/h e razão de perdas por potência gerada acima de 1%. Restaram as 11 soluções mostradas na Tabela II. A partir deste conjunto de soluções, a escolha da solução mais adequada ao problema proposto é realizada com o emprego dos métodos de auxílio à tomada de decisão apresentados na seção anterior. Esta tarefa é realizada de três maneiras, discutidas a seguir.

- **Tomada de decisão baseada em lógica *fuzzy*:** Para este caso aplicou-se o método de tomada de decisão baseado em lógica *fuzzy* adotando somente como critérios o custo operacional e emissão de poluentes, processo este muito comum na

literatura [6,7,9]. A solução obtida por este método é apresentada na Tabela II, numerada por 1.

- **Tomada de decisão baseada em lógica *fuzzy* considerando-se todos os critérios:** Neste processo é aplicado o método de tomada de decisão baseado em lógica *fuzzy* onde considera-se além do custo e emissão de poluentes, as perdas de potência ativa e o total de violações. Através deste mecanismo, obteve-se a solução numerada por 2, também presente na Tabela II.

- **Tomada de decisão através do TOPSIS considerando-se todos os critérios:** Este caso é similar ao anterior, pois também emprega a análise multicritério. A solução obtida por esta abordagem é numerada por 3 na Tabela II. Considerou-se que os critérios de custo e emissão de poluentes possuem o dobro de fator de peso em relação aos critérios de perdas e violação, i.e., $w = \left[\frac{1}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{6} \frac{1}{6} \right]$.

Pela Tabela II, nota-se que as soluções provenientes da análise multicritério proposta (numeradas por 2 e 3) se mostraram mais interessantes do que a solução obtida sem esta análise (numerada por 1) em três dos quatro critérios adotados, sendo um pouco pior que esta apenas no critério de emissão de poluentes, o que justifica a aplicação de técnicas de auxílio à decisão mais elaboradas ao invés de procedimentos simplificados usualmente empregados na literatura.

Na Figura 2 ainda cabe destacar que a abordagem sem os conceitos da teoria *fuzzy*, i.e., sem considerar as incertezas do problema, fornece soluções finais em geral bem caras (entre 600 e 650 \$/h); logo, a abordagem proposta permite não apenas identificar soluções de menor custo, mas também auxilia na escolha de uma solução final que representa um bom compromisso entre custo, emissão, perdas e sensibilidade às incertezas.

VI. CONCLUSÕES

Propôs-se nesta pesquisa uma abordagem multiobjetivo para o problema de Despacho Econômico e Ambiental, visando-se minimizar o custo operacional e a emissão de poluentes em sistemas termoeletrônicos. Esta modelagem se fez a partir da teoria de conjuntos *fuzzy*, o que viabilizou a incorporação de incertezas presentes na demanda de energia e a análise de soluções potenciais em outros cenários de carga.

Após a otimização multiobjetivo, com o uso do algoritmo NSGA-II, custo e emissão de poluentes foram tomados como critérios juntamente com outros adicionais, permitindo uma análise mais consistente das soluções não dominadas obtidas, auxiliando na tomada de decisão.

A análise multicritério proposta permitiu a seleção de soluções mais satisfatórias, de acordo com os critérios definidos, e uma tomada de decisão mais robusta, sustentada pela análise em diversos cenários e critérios.

Tabela I – Parâmetros para o sistema de 6 usinas geradoras.

Gerador	a	b	c	α	β	γ	ξ	ψ	P^{min} (p. u.)	P^{max} (p. u.)
1	10	200	100	4,091	-5,554	6,490	2,0e-4	2,857	0,05	0,5
2	10	150	120	2,543	-6,047	5,638	5,0e-4	3,333	0,05	0,6
3	20	180	40	4,258	-5,094	4,586	1,0e-6	8,000	0,05	1,0
4	10	100	60	5,326	-3,550	3,380	2,0e-3	2,000	0,05	1,2
5	20	180	40	4,258	-5,094	4,586	1,0e-6	8,000	0,05	1,0
6	10	150	100	6,131	-5,555	5,151	1,0e-5	6,667	0,05	0,6

Tabela II – Soluções Obtidas

Solução	P_1 (p. u.)	P_2 (p. u.)	P_3 (p. u.)	P_4 (p. u.)	P_5 (p. u.)	P_6 (p. u.)	Custo (\$/h)	Emissão (ton/h)	Perdas (p. u.)	Violação
1	0,279111	0,359265	0,350101	0,292313	0,366962	0,316266	444,1521	0,202347	0,017383	892,7205
2	0,169606	0,310139	0,423939	0,426576	0,3237	0,316118	431,8028	0,205292	0,01352	882,7989
3	0,162938	0,233662	0,375092	0,51858	0,342926	0,348025	428,7277	0,207736	0,013609	871,7444
4	0,310272	0,348333	0,388494	0,329686	0,447043	0,391598	496,4838	0,198646	0,021141	645,073
5	0,303971	0,307655	0,452459	0,30691	0,376263	0,424896	488,693	0,199361	0,01982	687,0228
6	0,133319	0,253023	0,369007	0,575587	0,334655	0,328028	428,0639	0,209651	0,014057	859,7955
7	0,273051	0,346185	0,396965	0,284961	0,33585	0,365765	452,7081	0,201549	0,017427	854,0078
8	0,291412	0,342784	0,38753	0,242508	0,392264	0,375741	463,0759	0,200736	0,018459	825,577
9	0,301836	0,388147	0,413993	0,359356	0,393279	0,426854	510,0623	0,197977	0,022369	578,2613
10	0,287801	0,304629	0,371337	0,362022	0,29337	0,339631	437,8242	0,203423	0,01709	897,6571
11	0,279615	0,354746	0,389004	0,29235	0,393157	0,407896	477,265	0,199727	0,01931	741,8995

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro das agências de fomento brasileiras CAPES, FAPEMIG e CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] E.S. Oliveira, “Metaheurísticas aplicadas ao problema do despacho econômico de energia elétrica”, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, 2015.
- [2] R.E.S. Azevedo, “Otimização Multicritério Para Despacho Econômico e Ambiental de Usinas Térmicas Utilizando Enxame de Partículas”, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2015.
- [3] L. Singh, J.S. Dhillon, “Interactive Fuzzy Approach for Economic-Environmental Electric Power Load Dispatch”, *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-6, 2016.
- [4] A. Hussien, S. Kamel, M. Ebeed, “Solution of Economic and Environmental Dispatch with Valve Point Effect Using Moth Swarm Algorithm”, *19th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 941-946, 2017.
- [5] D. Gong, Y. Zhang, C. Qi, “Environmental/economic power dispatch using a hybrid multi-objective optimization algorithm”, *Electrical Power and Energy Systems*, Elsevier, vol. 32, pp. 607-614, 2009.
- [6] M.A. Abido, “Environmental/Economic Power Dispatch Using Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Study”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no.4, pp. 1529-1537, 2003.
- [7] B.Y. Qu, Y.S. Zhu, Y.C. Jiao, M.Y. Wu, P.N. Suganthan, J.J. Liang, “A survey on multi-objective evolutionary algorithms for the solution of the environmental/economic dispatch problems”, *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 38, pp. 1-11, 2017.
- [8] E.A. Amorim, F.G.M. Lima, S.H.M. Hashimoto, J.R.S. Mantovani, “Algoritmo evolutivo multiobjetivo para o despacho econômico e ambiental”, *XLI SBPO*, pp. 1860-1871, 2009.
- [9] H. Shayeghi, A. Ghasemi, “A modified artificial bee colony based on chaos theory for solving non-convex emission/economic dispatch”, *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 344-354, 2014.
- [10] A. Salhi, T. Bouktir, “TVAC based PSO for solving economic and environmental dispatch considering security constraint”, *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 396-401, 2013.
- [11] M.H.R. Nascimento, “Uma nova solução para a otimização do despacho econômico e ambiental utilizando metaheurísticas da computação bioinspirada”, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2016.
- [12] J. Jin, D. Zhou, P. Zhou, X. Guo, Z. Sun, “Modeling for Dynamic Economic Emission Dispatch Under Uncertainty”, *Electric Power Components and Systems*, pp. 1630-1643, 2015.
- [13] M.F. Bendrinana, J.A. Bosco, C.A.F. Murari, C.A. Castro, “Decisions in Power System Operation based on Fuzzy Economic and Environmental Dispatch”, *IEEE Lausanne Power Tech*, pp. 1296-1301, 2007.
- [14] B.B. Pal, M. Kumar, “Interval goal programming for economic-environmental power generation - dispatch problems”, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pp. 1-8, 2013.
- [15] W. Aichen, P. Weiguo, W. Wenhuan, “A Study of Multi-objective Load Optimal Dispatch in Thermal Power Unit Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm”, *Advanced Materials Research*, pp. 1425-1430, 2013.
- [16] J.S.R. Jang, C.T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, 1997.
- [17] T. Liu, L. Jiao, W. Ma, J. Ma, R. Shang, “Cultural Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization for Environmental/Economic Dispatch”, *Applied Soft Computing*, Elsevier, vol. 48, pp. 597-611, 2016.
- [18] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II”, in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [19] E. Triantaphyllou, “Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study”, Springer, vol. 44, 1st ed, Flórida, 2000.
- [20] Y. Collette, P. Siarry, “Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies”, Springer, 2011.