

Uma Comparação entre os Métodos Evolução Diferencial e de Pontos Interiores/Exteriores na Resolução do Problema de Despacho Econômico e Ambiental

João Vitor Dias¹, Leonardo P. A. Campos², Rafael R. Souza³

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/UNESP, Bauru, SP

Antonio R. Balbo⁴

Departamento de Matemática/UNESP, Bauru, SP

Resumo.

Este trabalho realiza uma análise comparativa entre a metaheurística evolução diferencial e uma abordagem determinística que incorpora métodos primal-dual de pontos interiores/exteriores, na resolução do problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental. As funções objetivo consideradas são a de minimização do custo de geração de energia e de emissão de gases poluentes, objetivos estes que são conflitantes entre si. O problema considera a inserção de carregamento de pontos de válvula na função de despacho econômico, onde são adicionados termos modulares à função, o que a torna não convexa e não diferenciável em certos pontos do seu domínio. Ambas as abordagens utilizam o método de otimização multiobjetivo de restrições canalizadas progressivas, o qual gera uma sequência de subproblemas mono-objetivos. Os métodos determinísticos dependem das derivadas, diferentemente da abordagem metaheurística adotada neste trabalho, que explora a evolução de uma população de soluções candidatas através de operadores heurísticos inspirados em mecanismos gerais de adaptação natural. Em relação ao método determinístico, este foi aprimorado com um procedimento de suavização de funções para tratar a não diferenciabilidade da função de despacho econômico. O principal objetivo foi realizar uma comparação entre esses métodos, avaliando suas soluções eficientes e seus desempenhos. As implementações foram desenvolvidas utilizando o ambiente de programação Matlab e testadas em três cenários distintos. Os resultados alcançados pelos métodos revelaram-se promissores, evidenciando a eficácia e a robustez das abordagens empregadas nos problemas avaliados, determinando soluções e apresentando curvas de Pareto-ótimas semelhantes para os casos abordados.

Palavras-chave. Problema Multiobjetivo, Metaheurística, Método Determinístico. Otimização.

1 Introdução

Através da resolução do problema de despacho econômico (PDE), busca-se determinar o despacho ótimo de potência ativa das unidades geradoras de forma a minimizar os custos com os combustíveis, ao mesmo tempo em que se assegura o atendimento da demanda do sistema e se respeitam as restrições operacionais. Nos geradores com turbinas a vapor existem válvulas de admissão de vapor, cuja abertura influencia na saída da unidade. É possível expressar as perdas que ocorrem devido aos efeitos gerados em cada válvula de admissão de calor que se abre, denominados

¹joao.dias@unesp.br

²leonardo.pa.campos@unesp.br

³rr.souza@live.com

⁴antonio.balbo@unesp.br

efeitos de carregamento de pontos de válvula e, segundo [6], é definido como o ponto imediatamente anterior a abertura da próxima válvula. Após a inclusão da representação desse fenômeno, são adicionados termos modulares à função objetivo, o que a torna não convexa e não diferenciável em certos pontos do seu domínio.

Segundo [2], por muito tempo, o funcionamento ótimo de geração de energia termoelétrica levou em consideração somente os critérios econômicos, desconsiderando qualquer impacto ambiental causado, contribuindo assim, para a elevação da poluição atmosférica através da emissão de gases, como o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2), o óxido de nitrogênio (NO_x), entre outros; onde o combustível fóssil é utilizado de forma predominante. Diante dessa preocupação ambiental crescente, surge a necessidade de modelar um problema de despacho que leve em consideração não apenas os aspectos econômicos, mas também a minimização da quantidade de emissão de poluentes na natureza. Essa nova perspectiva resultou na concepção do problema de despacho ambiental (PDA), que busca encontrar soluções que otimizem não só a eficiência econômica do sistema de geração de energia, mas também a minimização dos impactos ambientais associados à sua operação [7].

Uma outra forma de modelagem dos problemas de despacho é a que considera a minimização simultânea dos custos dos combustíveis empregados e da emissão de poluentes, o problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental (PMDEA). O PMDEA é formulado buscando a minimização de dois objetivos conflitantes: o custo da geração de energia através de termoelétricas e a quantidade de emissão de gases poluentes, enquanto ainda se assegura o atendimento da demanda e os limites de operação do sistema. A função objetivo relativa ao custo pode ser modelada de diferentes formas, dentre elas, aquelas que podem ou não considerar os efeitos dos pontos de carregamento de válvula. Neste trabalho, o PMDEA é abordado considerando esses efeitos, recebendo o nome de problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental com os efeitos de carregamento de pontos de válvula (PMDEA-PV). Devido ao conflito existente entre os objetivos, não é possível encontrar uma única solução que otimize os dois objetivos diretamente. Assim, na literatura, algumas estratégias são propostas para transformar o problema multiobjetivo em um conjunto de problemas mono-objetivos, viabilizando a investigação e determinação da curva de soluções, tais como os métodos ϵ - restrito canalizado [4], restrições canalizadas progressivas (RCP) [3, 11], entre outros.

Neste trabalho, foram utilizados os métodos evolução diferencial (ED) [13] e o primal-dual previsor-corretor barreira logarítmica modificada (PDPCBLM) [4], ambos integrados com o método RCP para a geração dos subproblemas mono-objetivos e realizadas comparações das soluções. É importante destacar que a combinação da ED com o método RCP representa uma inovação no campo de estudo, uma vez que, na literatura existente, apenas a aplicação da ED clássica e do PDPCBLM incorporado com o RCP foram previamente exploradas. Testes numéricos foram realizados com três casos contendo 3, 6 e 10 unidades geradoras, demonstrando a eficiência dos métodos e implementados em linguagem de programação Matlab. Na comparação dos métodos utilizados, ambos demonstraram alta eficiência e robustez na resolução dos problemas propostos. As diferenças observadas entre os resultados de cada método foram mínimas, indicando que ambos são eficazes para os casos testados. Assim, não se pode afirmar categoricamente que um método superou significativamente o outro; ao invés disso, ambos se destacaram por sua performance e por atenderem de maneira equivalente às demandas dos problemas abordados.

2 Modelo Matemático do PMDEA-PV

Como visto, o PMDEA-PV é formulado com o propósito de minimizar dois objetivos conflitantes e essa é uma tarefa desafiadora, pois reduzir o custo de geração de energia muitas vezes significa aumentar a quantidade de emissões de poluentes. Por outro lado, reduzir as emissões pode resultar

em um aumento dos custos de geração de energia. A equação empregada para calcular o custo de combustível levando em conta o efeito do ponto de carregamento de válvula é formulada da seguinte maneira [14]:

$$F_e = \sum_{i=1}^n [a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i + |e_i \text{sen}(f_i (P_i^{\min} - P_i))|], \quad (1)$$

onde F_e é a função objetivo econômica; i é o número de unidades geradoras; a_i , b_i , c_i , e_i e f_i são os coeficientes de custo; P_i é potência produzida pela unidade geradora i ; P_i^{\min} é o limite mínimo de potência gerada pela unidade geradora i e n é número de unidades geradoras. Segundo [7], a função objetivo relacionada à emissão de poluentes é representada por uma função polinomial de segunda ordem, definida na equação (2):

$$F_a = \sum_{i=1}^n [a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i], \quad (2)$$

sendo F_a a função objetivo relacionada à emissão de poluentes (função ambiental) e A_i , B_i e C_i são os coeficientes de emissão da unidade geradora i . O problema de otimização descrito por (3) – (6), define o PMDEA-PV abordado neste trabalho, que visa a minimização dos custos dos combustíveis e a emissão de poluentes concomitantemente, desprezando-se as perdas na transmissão:

$$\text{Minimizar} \{F_e, F_a\} \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D \quad (4)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

$$P_i \in \mathbb{R}, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

em que P_D é a potência total demandada pelo sistema (em MW) e P_i^{\max} é o limite máximo de potência gerada pela unidade geradora i . Nessa formulação, busca-se encontrar um ponto de equilíbrio entre os aspectos econômicos e ambientais da geração de energia, garantindo o atendimento da demanda, ao mesmo tempo em que se reduz o impacto ambiental causado pela operação das unidades geradoras.

3 Metodologia de Resolução

Antes de utilizar os dois métodos de otimização, recorreu-se ao método RCP [3, 11] para lidar com o problema multiobjetivo representado pelas equações (3) – (6). O objetivo do método RCP é transformar esse problema em um conjunto de subproblemas mono-objetivos que serão resolvidos pelos métodos ED e PDPCBLM, onde o primeiro não necessita da análise das derivadas e o segundo utiliza-se de métodos de suavização para poder explorar as derivadas, determinando assim, soluções de mínimos, das quais foram selecionadas as soluções eficientes e consideradas para gerar a curva de Pareto-ótima (ou curva *trade-off*). Isso é feito selecionando uma das funções objetivo para ser otimizada, enquanto a outra é incluída como uma restrição no problema, sendo limitada superiormente e inferiormente por valores pré-definidos a partir das soluções lexicográficas do problema, ou seja, quando resolve-se o problema de minimização (3) – (6), considerando-se somente

um dos objetivos F_e ou F_a . Esses limitantes são atualizados a cada novo subproblema gerando subintervalos contidos entre os valores mínimo e máximo de F_a ou F_e determinados pelas soluções lexicográficas do problema. Neste trabalho, para cada subproblema considerou-se a minimização de F_e (não linear para ambos os métodos, não diferenciável para a ED e suavizada pelo método de suavização hiperbólica de funções [12], para a utilização do método PDPCBLM) e a canalização de F_a no intervalo $I = [F_a^{min}, F_a^{max}]$, que foi determinado considerando-se a resolução dos problemas lexicográficos minimizar $\{F_e \text{ s.a : (4) – (6)}\}$ e minimizar $\{F_a \text{ s.a : (4) – (6)}\}$, gerando p subproblemas definidos pelo RCP nos subintervalos:

$$I_k = [F_{a_k}^{min}, F_{a_k}^{max}], \quad k = 1, \dots, p, \quad I_k \subset I. \quad (7)$$

Os pontos de mínimo de cada função objetivo são empregados para limitar a curva de soluções do problema multiobjetivo. Após encontrar as soluções lexicográficas, é definido o conjunto de subproblemas mono-objetivos a serem resolvidos. Para o detalhamento do método RCP ver [4] e [11]. Esses problemas resultantes são então resolvidos pelos métodos ED e PDPCBLM, determinando a curva de Pareto-ótima. O método ED é baseado em população que se inspira no processo de evolução natural, utilizando uma população de soluções candidatas, representadas por vetores, e aplica operadores de recombinação, mutação e seleção para gerar novas soluções em cada iteração. Na operação de recombinação, dois vetores são combinados para formar um novo vetor. A mutação introduz aleatoriedade na população, alterando alguns componentes dos vetores. A seleção determina quais vetores devem ser mantidos na população com base na sua aptidão. O processo de evolução é repetido até que um critério de parada seja alcançado, geralmente um número máximo de iterações ou a convergência para uma solução satisfatória. O método ED é amplamente utilizado em problemas de otimização devido à sua simplicidade, eficácia e capacidade de lidar com funções objetivo complexas, não lineares, não convexas e, possivelmente, não diferenciáveis, como no caso do PMDEA-PV, em trabalhos como [1], [10], entre outros.

O método PDPCBLM, com base nos trabalhos de [9], [5], [8], [4] e [12] foi aplicado para resolver o PMDEA-PV junto à ED a fim de comparação. A maior dificuldade enfrentada ao utilizar métodos de barreira está relacionada ao mal condicionamento da matriz hessiana da função auxiliar, resultante da redução do parâmetro de barreira. Por isso, os métodos baseados em rescalamento não linear, especialmente aqueles que empregam a função barreira logarítmica modificada, se mostram como uma alternativa vantajosa para tratar as restrições de desigualdade. Esses métodos relaxam a região factível do problema original, o que ajuda a superar o desafio do mal condicionamento da matriz em pontos da fronteira desta, e torna a abordagem mais eficiente na resolução do problema.

4 Testes e Resultados

Para a utilização dos métodos ED e PDPCBLM, utilizou-se os dados de um PMDEA-PV com 3, 6 e 10 unidades geradoras descritas em [4]. As estratégias utilizadas foram implementadas em linguagem Matlab 2022a em um computador com processador Intel® Core™ i5-1035G1 de 1,19 GHz com 8 GB de memória RAM. Em cada caso, foi utilizado o método RCP para a determinação das faixas, limitadas superiormente e inferiormente para valores da função ambiental considerando (7). No caso com 3 geradores, o número de faixas utilizadas foi igual a 40, resultando em 40 subproblemas mono-objetivos que foram resolvidos com os métodos ED e PDPCBLM. As soluções lexicográficas, ou seja, (F_e^{min}, F_a^{max}) e (F_e^{max}, F_a^{min}) são (8234,06; 2275,72) e (8606,82; 2173,4). A solução ideal (mínimo de cada função) obtida é (8234,06; 2173,4). A solução ideal para cada cenário foi determinada através da minimização das funções objetivo de forma separada, mas sob as mesmas condições de restrições operacionais do sistema.

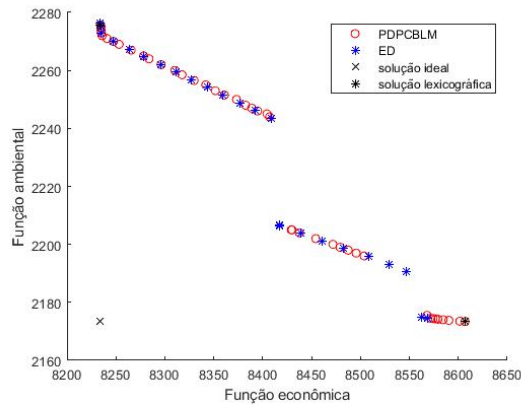


Figura 1: Caso 3 geradores - Soluções dos métodos ED e PDPCLM.

As curvas de soluções dos métodos analisados para o caso de 3 geradores estão apresentadas na Figura 1. A solução eficiente mais próxima da ideal encontrada pelo método ED foi de 8416,99 (\$/h) para a função custo e 2206,38 (kg/h) para a função ambiental. O método PDPCLM teve como solução 8429,24 (\$/h) e 2205 (kg/h). O comportamento da curva de Pareto-ótima obtida pelos métodos foram bem próximas uma da outra. No entanto, como as emissões são praticamente iguais, a diferença de desempenho entre as soluções não é significativa em termos de impacto ambiental. A escolha entre as duas soluções dependerá principalmente das prioridades do problema em questão: se o foco é principalmente na minimização de custos, a primeira solução seria preferível; se a preocupação ambiental é prioritária, ambas as soluções podem ser consideradas igualmente viáveis. Graficamente vemos que o conjunto de soluções dos métodos é muito parecido.

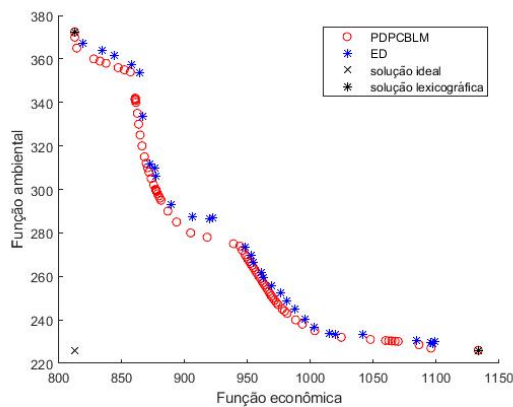


Figura 2: Caso 6 geradores - Soluções dos métodos ED e PDPCLM.

Na Figura 2 são apresentadas as curvas de soluções dos métodos para o caso de 6 geradores. O número de faixas utilizadas foi igual a 50. As soluções lexicográficas encontradas para este caso são (812,35; 372,45) e (1133,28; 225,99). A solução ideal obtida é (812,35; 225,99). A solução eficiente mais próxima da ideal encontrada pelo método ED foi de 906,01 (\$/h) para a função custo e 287,54 (kg/h) para a função ambiental. Já o método PDPCLM teve como soluções 904,59 (\$/h) e 280 (kg/h). As soluções encontradas no último caso analisado, contendo 10 geradores, estão

apresentadas na Figura 3. O número de faixas utilizadas neste caso foi igual a 30. Neste caso teste, as curvas de soluções de ambos os métodos também se assemelham. As soluções lexicográficas encontradas para este caso são (106166,49; 4083,23) e (111662,52; 3570). A solução ideal obtida é (106166,49; 3570). A solução eficiente mais próxima da ideal encontrada pelo método ED foi de 107326,69 (\$/h) para a função custo e 3804,92 (kg/h) para a função ambiental. O método PDPCBLM teve como soluções 107343,75 (\$/h) e 3800 (kg/h). Ambos os métodos apresentaram desempenho satisfatório na resolução dos casos investigados, alcançando soluções eficientes que estão relativamente próximas da solução ideal. Novamente, a diferença entre os valores das funções objetivo para as soluções de compromisso obtidos é muito pequena e pode ser insignificante dependendo das prioridades específicas do problema em questão.

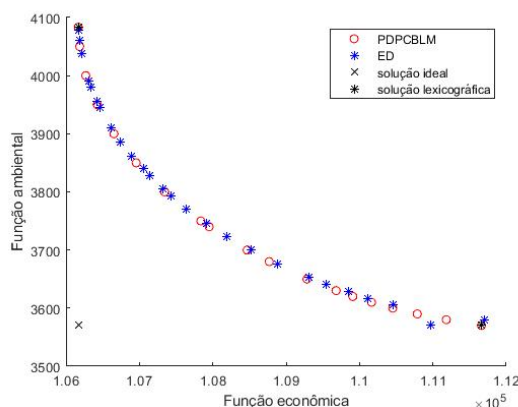


Figura 3: Caso 10 geradores - Soluções dos métodos ED e PDPCBLM.

5 Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi aplicar os métodos ED e PDPCBLM, ambos combinados com a metodologia RCP, para resolver o PMDEA-PV e comparar os resultados obtidos. Os testes computacionais realizados permitiram avaliar a eficiência e desempenho dos métodos implementados, fornecendo resultados promissores. As soluções obtidas mostraram-se viáveis para a resolução de problemas complexos de otimização em sistemas de geração de energia, considerando tanto os aspectos econômicos quanto ambientais. Os resultados obtidos neste trabalho proporcionam importantes contribuições para a compreensão e resolução de problemas multiobjetivo de otimização em sistemas de geração de energia, além de demonstrarem a capacidade dos métodos analisados em lidar com problemas quando incorpora, junto com o objetivo ambiental, a inserção de pontos de carregamento de válvula no objetivo econômico. Espera-se que os resultados e técnicas estudadas possam ser aplicadas e aprimoradas em trabalhos futuros, contribuindo para a melhoria e eficiência dos sistemas de geração de energia, com foco na sustentabilidade ambiental e no fornecimento de energia de forma mais eficiente e econômica.

6 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Projeto CNPQ-304218/2022-7.

Referências

- [1] J. V. Dias. “Evolução diferencial híbrida com o método BFGS para a resolução do problema de despacho econômico com o efeito de ponto de carregamento de válvula”. Dissertação de mestrado. Unesp, 2021.
- [2] M. R. Gent e J. W. Lamont. “Minimum-emission dispatch”. Em: **IEEE Transactions on power apparatus and systems** PAS-90 (1971), pp. 16250–2660. DOI: 10.1109/TPAS.1971.292918.
- [3] E. Goncalves et al. “Deterministic approach for solving multi-objective non-smooth Environmental and Economic dispatch problem”. Em: **International Journal of Electrical Power & Energy Systems** 104 (2019), pp. 880–897. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.056>.
- [4] E. Gonçalves. “Métodos híbridos de pontos interiores/exteriores e de aproximantes de funções em problemas multiobjetivo de despacho econômico e ambiental”. Dissertação de mestrado. Unesp, 2015.
- [5] I. Griva e R. A. Polyak. “Primal-dual nonlinear rescaling method with dynamic scaling parameter update”. Em: **Mathematical Programming** 106 (2006), pp. 237–259. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10107-005-0603-6>.
- [6] H. H. Happ. “Optimal power dispatchA comprehensive survey”. Em: **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems** 96 (1977), pp. 841–854. DOI: 10.1109/T-PAS.1977.32397.
- [7] M. E. El-Hawary, F. El-Hawary e G. A. N. Mbalamu. “NO_x emission performance models in electric power system”. Em: **Proceedings of the 1992 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering** 2 (1992), MA 8.11.1.
- [8] R. B. N. Pinheiro. “Um método previsor-corretor primal-dual de pontos interiores barreira logarítmica modificada, com estratégias de global e de ajuste cúbico, para problemas de programação não-linear e não-convexa”. Dissertação de mestrado. Unesp, 2012.
- [9] R. Polyak. “Modified barrier functions (theory and methods)”. Em: **Journal of Global Optimization** 54 (1992), pp. 177–222. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01586050>.
- [10] J. P. Roselyn, D. Devaraj e S. S. Dash. “Multi-objective differential evolution for voltage security constrained optimal power flow in deregulated power systems. International Journal of Emerging Electric Power Systems”. Em: **International Journal of Emerging Electric Power Systems** 14 (2013), pp. 591–607. DOI: 10.1515/ijepes-2013-0086.
- [11] M. R. B. Santos. “Métodos de pontos interiores/exteriores, de restrições canalizadas progressivas e de suavização arco tangente, em problemas de despacho econômico e ambiental”. Dissertação de mestrado. Unesp, 2016.
- [12] D. N. Silva. “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”. Dissertação de mestrado. Unesp, 2014.
- [13] R. Storn e K. Price. “Differential Evolution: A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces”. Em: **Journal of Global Optimization** 11 (1997), pp. 341–359. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>.
- [14] A. Wood, B. Wollenberg e Sheblé G. B. **Power generation, operation, and control**. 3a. ed. New Jersey: John Wiley, 1984. ISBN: 9780471790556.