

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Métodos de pontos interiores/exteriores e o problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental

Antonio Roberto Balbo¹

Departamento de Matemática, FC, Unesp, Bauru, SP.

Elis Gonçalves²

Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, FEB, Unesp, Bauru, SP.

Diego Nunes da Silva³

Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, EESC, Usp, São Carlos, SP

Resumo. Neste trabalho um método híbrido envolvendo métodos de pontos interiores/exteriores, procedimento previsor-corretor, estratégia de correção de inércia, técnica da suavização hiperbólica e método ε -restrito canalizado é aplicado à resolução do problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental, com pontos de carregamento de válvula (PMDEA-PV). O PMDEA-PV é formulado envolvendo a minimização do custo de geração de energia termoeletrica e a emissão de poluentes, dois objetivos conflitantes, sujeitos ao atendimento da demanda e aos limites de operação do sistema. A função objetivo relativa ao custo é modelada incluindo os pontos de carregamento de válvula, cujos termos modulares tornam-a não-diferenciável e não convexa. Uma variação da técnica de otimização multiobjetivo ε -restrito é proposta, denominada de método ε -restrito canalizado, a qual foi utilizada na resolução do problema. Os métodos implementados em linguagem Matlab 2011a foram aplicados em dois casos teste, de 6 e 10 geradores, demonstrando eficiência nos resultados obtidos quando comparados a outros encontrados na literatura.

Palavras-chave. Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental, Métodos de pontos interiores/exteriores, Estratégia da suavização hiperbólica, Método ε -restrito canalizado.

1 Introdução

O PMDEA (Problema Multiobjetivo de Despacho Econômico e Ambiental) está inserido na área de sistemas de energia elétrica e sua resolução tem por objetivo reduzir os custos de geração de energia (problema de despacho econômico - PDE) e a emissão de poluentes (problema de despacho ambiental - PDA), respeitando o atendimento da demanda de energia e as restrições operacionais dos geradores. Por ser multiobjetivo, métodos de

¹arbalbo@fc.unesp.br

²elisgon01@hotmail.com

³diegoitapeva996@hotmail.com

solução destes problemas são aplicados a resolução do PMDEA-PV a fim de transformá-lo em um conjunto de problemas mono-objetivo, entre elas destacam-se na literatura: soma ponderada, que considera a soma ponderada das funções ambientais e econômicas como uma única função objetivo; e a ε -restrito, que considera a minimização de uma das funções objetivo incorporando a outra ao conjunto de restrições do problema. As soluções ótimas dos problemas mono-objetivos, as quais se caracterizam por serem soluções não dominadas do problema multiobjetivo, definem o conjunto de soluções eficientes e a curva de Pareto-ótima deste problema.

Em sua formulação clássica, o PDE é modelado como um problema de otimização com função quadrática, porém, essa modelagem desconsidera alguns aspectos da geração termoeletrica, como por exemplo, os pontos de carregamento de válvula. Com a representação desses pontos, termos modulares são inseridos à função objetivo do problema, tornando-a não convexa e não diferenciável em alguns pontos de seu domínio. Devido a não convexidade da função custo, neste trabalho é proposta uma variação do método ε -restrito, denominada de ε -restrito canalizado e que inclui, além de um limitante superior, um limitante inferior para a restrição ambiental do problema de minimização dos custos, para facilitar a obtenção de pontos que compõe a curva de soluções eficientes.

Diversos autores têm proposto métodos de resolução para o PMDEA e o PMDEA-PV, em sua maioria baseados em heurísticas. Em [11] é apresentado um Algoritmo Genético Híbrido Co-Evolutivo (AGHCOE) para resolução do PMDEA e em [1] a técnica de evolução diferencial é empregada na resolução do PMDEA-PV. Neste trabalho é apresentado um acoplamento entre os métodos de otimização, de pontos interiores/exteriores, o método da suavização hiperbólica, utilizado para tratar os termos modulares da função custo e o método de resolução de problemas multiobjetivo, ε -restrito canalizado, com o objetivo de investigar soluções eficientes do PMDEA-PV.

2 Problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental com pontos de carregamento de válvula

No despacho econômico clássico, a função objetivo econômica F_e é uma função quadrática. Se a esta função forem acrescentados pontos de carregamento de válvula, termos senoidais modulares são inseridos em seu modelo, tornando-a não convexa e não diferenciável [14]. A função F_e , custo total do problema de despacho econômico com a inserção de pontos de válvula (PDE-PV) é definida em (1):

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

em que $F_{e_i}(P(V_i))$ é o custo total de combustível; n é o número de unidades geradoras do sistema; a_i , b_i e c_i são os coeficientes da função custo de cada unidade geradora i ; e_i e f_i representam as constantes do efeito de ponto de carregamento de válvula nos geradores; P_i é a potência ativa gerada por cada unidade geradora i .

A função ambiental é modelada levando em consideração a relação entre a quantidade de cada poluente e a saída de potência da unidade geradora. Em [3] é apresentado um modelo para o PDA, expresso em 2:

$$F_a = \sum_{i=1}^n F_{a_i}(P_i) = \sum_{i=1}^n A_i P_i^2 + B_i P_i + C_i \quad (2)$$

em que $F_{a_i}(P_i)$ é a função ambiental da i -ésima unidade geradora; A_i, B_i e C_i são os coeficientes da função emissão de cada unidade geradora i .

Um problema que considera a minimização dos custos de geração e a emissão de poluentes é modelado como um problema multiobjetivo de despacho econômico e ambiental. Os dois objetivos são minimizados em uma única função, sujeitos às restrições de atendimento de demanda e capacidade dos geradores do sistema. Esse modelo é formulado em (3):

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } \{F_e, F_a\} \\ &\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n P_i = P_d \\ & \quad P_i^{Min} \leq P_i \leq P_i^{Max} \end{aligned} \quad (3)$$

em que P_d é a potência demandada e P_i^{min} e P_i^{max} são os limites operacionais inferiores e superiores, respectivamente, de saída das unidades de geração termoeleétrica.

Alguns métodos são propostos na literatura a fim de transformar o problema multiobjetivo em um conjunto de subproblemas mono-objetivos e tornar possível a investigação e determinação de soluções eficientes através de um método de otimização.

3 Metodologia

Neste trabalho uma composição de métodos é utilizada para a resolução do PMDEA-PV, envolvendo: o método de resolução de problemas multiobjetivo ϵ -restrito e uma variação deste, denominada ϵ -restrito canalizado; os métodos de pontos interiores/exteriores, com procedimento previsor-corretor, rescalamento não linear e estratégia de correção de inércia (PDPCBLM) e a técnica da suavização hiperbólica. O método PDPCBLM explorado neste trabalho foi proposto em [12].

O método ϵ -restrito [6] é utilizado para transformar um problema multiobjetivo em um conjunto de sub-problemas mono-objetivos e possibilitar a aplicação de um método de otimização à sua resolução. A ideia é incorporar a função ambiental ao conjunto de restrições do problema de despacho econômico, limitada superiormente por um valor máximo de emissão de poluentes. A não convexidade da função custo do PMDEA-PV, dificultou a obtenção de pontos da curva de soluções eficientes, e de modo a auxiliar a resolução, é proposta uma variação do método ϵ -restrito, denominada ϵ -restrito canalizado, que inclui, além de um limitante superior, um limitante inferior à restrição ambiental do problema de

minimização dos custos. A inserção de um limite inferior à função ambiental é para auxiliar a obtenção de pontos da curva de soluções eficientes. Estes valores são considerados dentro dos limites mínimo e máximo determinados, respectivamente, para o problema de despacho ambiental, quando os problemas mono-objetivos de despacho ambiental e de despacho econômico, separadamente, são resolvidos pelo método híbrido proposto. O limite inferior imposto é importante, em termos práticos, para a obtenção da curva de soluções eficientes do problema multiobjetivo investigado.

O modelo de otimização para o método ε -restrito canalizado do PMDEA-PV é apresentado em (4):

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } F_e \\ & \text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^n P_i = P_d \\ & F_a^{\min} \leq F_a \leq F_a^{\max} \\ & P_i^{\text{Min}} \leq P_i \leq P_i^{\text{Max}} \end{aligned} \quad (4)$$

em que F_a^{\min} é o limitante de níveis mínimos permissíveis de emissão.

Por apresentar termos modulares senoidais, a função custo do PMDEA-PV é não diferenciável e não convexa e é inviável que alguns métodos de otimização sejam aplicados diretamente à sua resolução. Neste trabalho, uma estratégia de suavização é empregada a esta função, possibilitando a obtenção de uma função aproximada e diferenciável. De acordo com o método da suavização hiperbólica, [2], a função suavizante é definida por: $\vartheta(x, \eta) = \sqrt{(f(x))^2 + \eta^2}$, em que $\vartheta(x, \eta)$ é a função objetivo aproximada e $\eta > 0$ é o parâmetro de suavização. Conforme $\eta \rightarrow 0$, a função suavizada se aproxima da função original e a resolução do problema suavizado é efetuada a partir da solução de problemas continuamente diferenciáveis.

Após a transformação do problema multiobjetivo em um conjunto de problemas mono-objetivos e a suavização da função econômica, o método PDPCBLM, baseado na função barreira logarítmica modificada e apresentado por [12], foi aplicado à resolução do PMDEA-PV. A função barreira modificada [9] utilizada no método citado é $\psi(t) = \ln(t + 1)$, $t \in (-1, \infty)$ e está definida na fronteira da região factível, bem como em uma região relaxada exterior ao conjunto factível. Por esse motivo, os problemas relacionados ao mau condicionamento da matriz Hessiana presentes nos métodos de pontos interiores clássicos são aliviados, além de ser possível inicializar o método por pontos exteriores. Uma função Lagrangiana barreira logarítmica modificada é considerada para o problema (4), condições necessárias de primeira ordem (KKT) são aplicadas, obtendo-se um sistema de equações não-lineares envolvendo as restrições primais, as restrições duais e as relações de complementaridade entre as variáveis primais e duais positivas. Tal sistema é linearizado, originando os procedimentos previsor e corretor [5]. Devido à não-convexidade do problema, a resolução do sistema linear de busca pode ser ineficaz na produção de direções de descida, de modo que a estratégia de correção de inércia é aplicada para corrigir o número de autovalores positivos e negativos da matriz do sistema de direções, para a determinação de um ponto de mínimo local para o problema primal e de máximo local para o dual. A direção do procedimento corretor nem sempre é melhor que a do previsor, de modo que um

critério baseado no valor da complementaridade é adotado para a escolha entre a direção do previsor e do corretor. O parâmetro de barreira é utilizado tanto no passo previsor quanto no corretor, de modo análogo ao trabalho de [7].

3.1 Resultados

O método híbrido envolvendo o PDPCBLM, a suavização hiperbólica e o método ε -restrito canalizado foi implementado em linguagem Matlab 2011a com base na estrutura do algoritmo apresentado em [12] e, em seguida, aplicado à resolução de dois problemas testes do PMDEA-PV, com 6 e 10 geradores. O método híbrido e a técnica ε -restrito canalizado mostraram-se robustos à resolução destes problemas. Para o caso de 6 geradores os dados foram extraídos de [10], que resolveu o PDE-PV e de [11], que resolveu o PMDEA. Os dados do sistema de 10 geradores foram extraídos de [1], que resolveu o PMDEA-PV através de evolução diferencial.

O método ε -restrito canalizado foi utilizado para tratar o caso multiobjetivo e empregado da seguinte forma: i) a função ambiental é incorporada às restrições do problema de despacho econômico e limitada superior e inferiormente; ii) os problemas mono-objetivos de despacho, econômico e ambiental, são resolvidos e os valores determinados para as respectivas funções objetivo, associados aos pontos extremos, relativos as soluções eficientes obtidas; iii) entre os pontos obtidos através da resolução dos problemas de despacho mono-objetivos, vários subintervalos são determinados, de modo a possibilitar a convergência do método para soluções eficientes. O processo é realizado até que a curva de Pareto-ótima seja completada.

3.2 Caso 6 geradores

No teste de 6 geradores o algoritmo do método PDPCBLM foi aplicado ao PMDEA-PV para vários subintervalos entre os limites máximo e mínimo estabelecidos para a restrição ambiental. Foi determinada uma sequência de pontos que convergiu para uma solução ótima de cada subproblema mono-objetivo, gerado através da estratégia ε -restrito canalizado. O valor mínimo obtido para a função custo aproximada é de 860,7507 $\$/h$ (função custo original 862,7085 $\$/h$) para 341,3900 Kg/h de emissão. O valor mínimo obtido para a função emissão é 230,1000 Kg/h , com um custo de 1069,6050 $\$/h$. Esses pontos são os extremos da curva da Figura 1, denominada de curva de Pareto-ótima.

3.3 Caso 10 geradores

O algoritmo do método PDPCBLM foi aplicado ao PMDEA-PV de maneira análoga ao teste de 6 geradores. O valor mínimo da função econômica aproximada é 106185,9119 $\$/h$ (função custo original 106185,8583 $\$/h$) para 4050,00 $tons/h$ de emissão. O valor mínimo obtido para a função ambiental é 3570,00 $tons/h$, com custo aproximado de 111662,5774 $\$/h$. A curva de pontos da Figura 2 contempla as soluções eficientes do PMDEA-PV para o caso de 10 geradores.

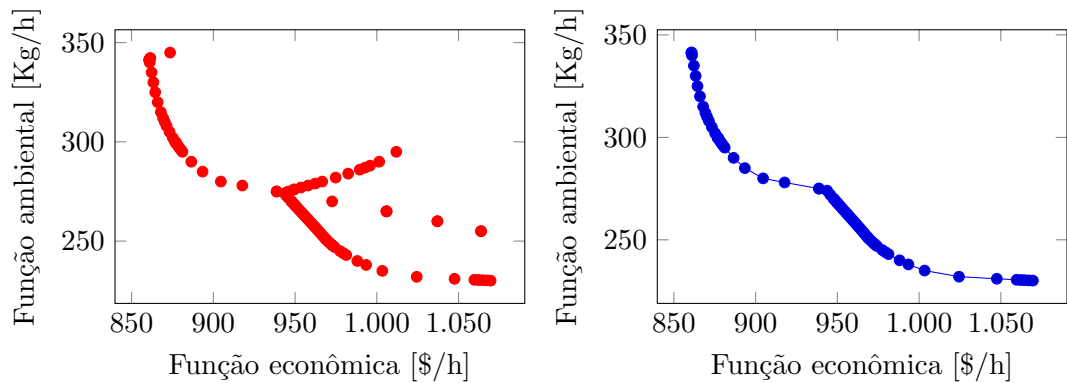


Figura 1: Caso 6 geradores: método ε -restrito canalizado - todas as soluções *versus* curva de Pareto-ótima

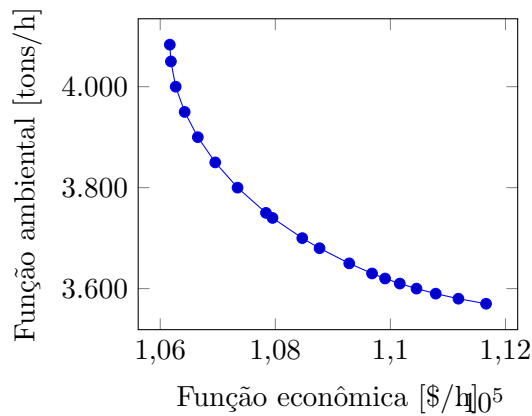


Figura 2: Caso 10 geradores: curva de Pareto-ótima

4 Conclusões

Neste trabalho um método híbrido envolvendo o primal-dual de pontos interiores, com procedimento predictor-corrector, e de pontos exteriores baseado na função barreira logarítmica modificada e rescalamento não linear, estratégia de correção de inércia, suavização hiperbólica e método ε -restrito canalizado, foi utilizado para resolução do PMDEA-PV. O método implementado foi aplicado aos testes de 6 e de 10 geradores, determinando um conjunto de soluções, das quais foram consideradas as não dominadas, de modo a obter a curva de Pareto-ótima para cada um dos casos investigados, mostrando a eficiência do método. Os pontos de carregamento de válvula inseridos na função custo, tornaram-a não convexa e não diferenciável e o uso da técnica da suavização hiperbólica permitiu a obtenção de valores mínimos próximos para a função original e a função aproximada, confirmando a eficiência do método híbrido proposto neste trabalho para resolução do PMDEA-PV.

Referências

- [1] M. Basu, Economic environmental dispatch using multi-objective differential evolution, *Applied Soft Computing*, vol. 11, 2845–2853, (2011).
- [2] X. Chen, Smoothing methods for nonsmooth, nonconvex minimization, Springer-Verlag, vol. 134, 97–138, (1996).
- [3] F. El-Hawary, J. H. Talaq, M. E. El-hawary, Minimum emissions power flow, *Power and Systems, IEEE on Transactions*, vol. 9, 429–425, (1994).
- [4] M. R. Gent, J. W. Lamont, Minimum-Emission Dispatch, *Power Apparatus and Systems, IEEE on Transactions*, vol. PAS-90, 2650–2660,(1971).
- [5] S. Mehrotra, On the Implementation of a Primal-Dual Interior Point Method, *SIAM Journal on Optimization*, (1992).
- [6] K. Miettinen, *Nonlinear Multiobjective Optimization*, Kluwer, (1999).
- [7] R. B. N. Pinheiro, A. R. Balbo, E. C. Baptista, L. Nepomuceno, Interior-Exterior Point Method with Global Convergence Strategy for Solving the Optimal Reactive Power Flow Problem, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 66, 235–246, (2015).
- [9] R. A. Polyak, Modified barrier functions, *Mathematical Programming*, vol. 54, (1992).
- [10] G. Ravi, R. Chakrabarti, S. Choudhuri, Nonconvex Economic Dispatch with Heuristic Load Patterns Using Improved Fast Evolutionary Program, *Electric Power Components and Systems*, vol. 34, 37–45 (2006).
- [11] M. M. A. Samed, Um algoritmo genético híbrido co-evolutivo para resolver problemas de despacho, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Química, UEM, (2004).
- [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 válvula e representação da transmissão, *Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru, Unesp*, (2014).
- [13] A. L. Stanzani, A. R. Balbo, E. C. Baptista, L. Nepomuceno, Solving the multiobjective environmental/economic dispatch problem using weighted sum and ε -constraint strategies and a predictor-corrector primal-dual interior point method, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 503–515, (2014).
- [14] M. J. Steinberg, T. H. Smith, *Economy Loading of Power Plants and Electric Systems*, J. Wiley & sons, Incorporated, (1943).